

一种确定单站接收机码间偏差的新算法*

谢益炳^{1 2)} 陈俊平²⁾ 伍吉仓^{1 3)}(1) 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092
(2) 中国科学院上海天文台, 上海 200030
(3) 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092

摘要 利用双频载波相位平滑伪距数据以及 GIM 提供的全球垂直方向电子含量 (VTEC) 和卫星码间差, 通过方差分量估计解算接收机码间差以及 VTEC 残差值。利用 35 个 IGS 站数据计算了接收机的码间差; 并与 IGS 提供的测站码间差相比较, 结果表明, 能够以优于 1ns 的精度确定接收机码间差。

关键词 GPS; 码间差; 垂直电子含量; B-SPLINE; 电离层

中图分类号: P207 文献标识码: A

A NEW ALGORITHM FOR DETERMINING SINGLE RECEIVER DCB

Xie Yibing^{1 2)}, Chen Junping²⁾ and Wu Jicang^{1 3)}(1) College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092
(2) Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030
(3) Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, SBSM, Shanghai 200092

Abstract Based on the variance components estimation, the receivers DCB and VTEC residual values are calculated by the pseudorange data with carrier phase smoothing and the vertical electronic content (VTEC) and the DCB of satellites. By using 35 IGS stations data, the DCB of 40 IGS receivers are estimated. The results show that the accuracy of DCB can be better than 1 nanosecond compared with the DCB provided by the IGS.

Key words: GPS; DCB; VTEC; B-SPLINE; ionosphere

1 引言

GPS 码间偏差 (DCB) 包含卫星的码间偏差和接收机的码间偏差。其中, 卫星的硬件延迟包括 P1/C1 和 P1/P2 的码间偏差。目前, 确定精确 TEC 和 DCB 值有不同的方法, 例如利用全球或者区域模型。这些方法中, 卫星和接收机的硬件延迟作为未知量参与解算。IGS 结合提供的数据综合得到 DCB。人们可以从 IGS 的 GIM (Global Ionosphere Maps) 中获取精确的 DCB。然而, IGS 只提供卫星的

DCB, 以及有限的 IGS 站接收机 DCB。因此, 需要研究利用 GIM 的 VTEC 来估算接收机 DCB 的方法。Arikan^[1] 给出了一种估算测站接收机 DCB 的方法——IONOLAB-BIAS, 它利用 GIM 的 VTEC 数据来估算每颗卫星、每个历元的接收机 DCB, 最后取各个历元的平均值作为最后的 DCB; Grejner-Brzezinska^[2] 利用 BERNESE 软件解算接收机 DCB, 而其计算方法未对用户公开; 宋小勇等^[3] 利用球谐函数建模估算接收机 DCB, 但由于该方法要进行建模, 计算效率并不高。本文提出了一种新的估算单站接

* 收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 国家自然科学基金 (41174024, 11273046)

作者简介: 谢益炳, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 数据处理. E-mail: xieyibing@163.com

收机 DCB 方法, 在利用 GIM 提供的 VTEC 估算接收机 DCB 过程中, 认为存在内插误差(或认为 GIM 提供的 VTEC 存在误差), 仅仅把内插值当作初始值, 用 3 维 B-SPLINE 模型来表述误差项, 通过方差分量估计法, 解算 B-SPLINE 系数和接收机 DCB。

2 DCB 计算原理

利用载波相位平滑伪距观测形成电离层残差组合(GF)^[4]:

$$\bar{P}_4 = \bar{P}_1 - \bar{P}_2 \quad (1)$$

$$\bar{P}_1 = \phi_1(t) + \bar{P}_1 - \bar{\phi}_1 + 2 \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} ((\phi_1(t) - \bar{\phi}_1) - (\phi_2(t) - \bar{\phi}_2)) \quad (2)$$

$$\bar{P}_2 = \phi_2(t) + \bar{P}_2 - \bar{\phi}_2 + 2 \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} ((\phi_1(t) - \bar{\phi}_1) - (\phi_2(t) - \bar{\phi}_2)) \quad (3)$$

式中 \bar{P}_1 和 \bar{P}_2 是载波相位平滑伪距观测 $\phi_1(t)$ 、 $\phi_2(t)$ 是 t 时刻频率 F_1 和 F_2 上的载波相位观测值, $\bar{P}_1 - \bar{\phi}_1 = 1/N \sum_{i=1}^N (P_1 - \phi_1)_i$, N 是连续弧段上观测历元数, P_1 是频率 F_1 上的伪距观测值, 同理可得频率 F_2 上的 $\bar{P}_2 - \bar{\phi}_2$ 。通过调用 BERNSE 软件进行 GPS 数据预处理, 得到式(1)定义的载波相位平滑伪距观测值。该组合可以消除对流层和钟差的影响, 剩下的参数只是电离层延迟、卫星和接收机的 DCB:

$$\bar{P}_4 = - \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(z) I_r + c\Delta b^s + c\Delta b_r \quad (4)$$

式中 Δb^s 是卫星 DCB, Δb_r 是接收机 DCB, I_r 是接收机垂直方向的电离层延迟:

$$I_r = \frac{40.3}{f_1^2} VTEC \quad (5)$$

设 $F(z)$ 是电离层投影函数, z 为卫星的天顶距。本文采用单层模型, 则投影函数为:

$$F(z) = \frac{1}{\cos(z')} \quad (6)$$

$$\sin(z') = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha z) \quad (7)$$

式中 z' 为穿刺点 (IPP, ionospheric pierce point) 的天顶距, R 是地球半径, H 是电离层单层模型的高, α 为改正系数^[5]。

由于 GIM 每两小时提供一次垂直电子含量, 因此要进行内插, 其内插公式为^[6]:

$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_i(\beta, \lambda) + \frac{-T_i + t}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda) \quad T_i \leq t < T_{i+1} \quad (8)$$

式中 $E_i = E(T_i)$, $E_{i+1} = E(T_{i+1})$, t 为观测时刻, T_{i+1}

和 T_i 为 t 前后相邻时刻, β 、 λ 为穿刺点的地理纬度和经度, $E_i(\beta, \lambda)$ 为在 i 时刻、经度 λ 、纬度 β 下的电离层垂直电子含量。

3 DCB 计算原理的改进

分析可见, 利用 GIM 提供的数据通过式(8)内插得到的垂直电子含量有误差, 仅把内插得到的值作为初始值, 卫星 DCB 从 IGS 获取而固定, 然后利用最小二乘平差同时解算垂直电子含量误差项和接收机 DCB, 因此式(4)变成:

$$\bar{P}_4 = - \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(z) (I_r + \Delta I) + c\Delta b^s + c\Delta b_r \quad (9)$$

根据获取的已知值, 式(9)可变为:

$$y = - \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(z) \Delta I + c\Delta b_r \quad (10)$$

其中:

$$y = \bar{P}_4 + \left(\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(z) I_r - c\Delta b^s \quad (11)$$

式中,

$$\Delta I = \Delta VTEC =$$

$$\sum_{k_1}^{m_{j_1}-1} \sum_{k_2}^{m_{j_2}-1} \sum_{k_3}^{m_{j_3}-1} d_{J_1 J_2 J_3 K_1 K_2 K_3} \phi_{J_1 J_2 J_3 K_1 K_2 K_3}(\lambda, \phi, t_1) \quad (12)$$

为简化计算过程, 3-D 尺度函数可分离为:

$$\phi_{J_1 J_2 J_3 K_1 K_2 K_3}(\lambda, \phi, t_1) = \phi_{J_1 K_1}(\lambda) \phi_{J_2 K_2}(\phi) \phi_{J_3 K_3}(t_1) \quad (13)$$

式中 λ 、 ϕ 、 t_1 分别表示地理纬度、经度及时间, 下标 J_i 相对应于第 i 个尺度函数的变量上限, 下标 K_i 为第 i 个尺度函数中不超过上限的某个值。文中采用正则化平方 B-SPLINE 函数基 $N^2(x)$ 作为一维尺度函数,

$$N_{JK}^m(x) = \frac{x - t_k^j}{t_{k+m}^j - t_k^j} N_{JK}^{m-1}(x) + \frac{-x + t_{k+m+1}^j}{t_{k+m+1}^j - t_{k+1}^j} N_{JK}^{m-1}(x) \quad (14)$$

当 $m=0$ 时, $N_{JK}^m(x)$ 为:

$$N_{JK}^0(x) = \begin{cases} 1 & t_k^j \leq x < t_{k+1}^j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中 t 是一个递减数组。根据 t 的性质, 需将 3 个 $\phi_{JK}(x)$ 函数自变量从一个矩形体

$$B^3 = [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}] [\phi_{\min}, \phi_{\max}] [t_{1\min}, t_{1\max}]$$

换到一个单位立方体(为了避免与上述数组 t 混淆, 这里用 t_1 来表示时间变量)

$$B^3 = [0, 1] [0, 1] [0, 1]$$

其转换公式见文献[7, 9]。

根据分析, 观测方程(10)可以改写成:

$$y = AX + \epsilon \quad (16)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} \phi_{0 \ 0 \ 0}^{J_1 J_2 J_3} (R_1) & \cdots & \phi_{m_{J_1-1} \ m_{J_2-1} \ m_{J_3-1}}^{J_1 J_2 J_3} (R_1) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ \phi_{0 \ 0 \ 0}^{J_1 J_2 J_3} (R_n) & \cdots & \phi_{m_{J_1-1} \ m_{J_2-1} \ m_{J_3-1}}^{J_1 J_2 J_3} (R_n) & 1 \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} d_{0 \ 0 \ 0} \\ \vdots \\ d_{m_{J_1-1} \ m_{J_2-1} \ m_{J_3-1}} \\ c\Delta b_r \end{bmatrix} \quad y \text{ 与式(11) 相同。}$$

从式(16) 平差模型中可看出,参数 $d_{J_1 J_2 J_3}$ 与 $\phi_{J_1 K_1}(\lambda) \phi_{J_2 K_2}(\varphi) \phi_{J_3 K_3}(t_1)$ 的乘积有关,并称 $\phi_{J_1 K_1}(\lambda) \phi_{J_2 K_2}(\varphi) \phi_{J_3 K_3}(t_1) \neq 0$ 区域为有效区。然而,在实际计算中,有效区的范围是有限的,不在有效区域内的 $d_{J_1 J_2 J_3}$ 无法解算其值,因此需要从式(16) 剔除相应的列。同时为了使解算过程更具稳定性,引入先验信息^[9,10]:

$$\begin{aligned} \mu_d + e_d &= d \\ D(\mu_d) &= \sigma_d^2 P_d^{-1} \end{aligned} \quad (17)$$

式中 σ_d^2 代表未知参数 d 的方差, P_d 是 $\phi_{J_1 J_2 J_3 K_1 K_2 K_3}(\lambda \ \varphi \ t_1)$ 的权阵,

$$P_d = \text{diag}(\omega_{0 \ 0 \ 0}, \dots, \omega_{m_{J_1-1} \ m_{J_2-1} \ m_{J_3-1}}, 1) \quad (18)$$

将先验信息与式(18) 组合形成:

$$\begin{bmatrix} y \\ \mu_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ e_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} X \quad (19)$$

$$D\left(\begin{bmatrix} y \\ \mu_d \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} \sigma_y^2 P_y^{-1} & 0 \\ 0 & \sigma_d^2 P_d^{-1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

由于 σ_d^2 和 σ_y^2 是未知的,因此需要用方差分量估计来解算参数。算法步骤如下:

1) 首次进行最小二乘平差时,给定先验权: P_d 为式(21) $P_y (P_y = \sin(z) \ z \text{ 为高度角})$;

2) 进行最小二乘平差,求解 $[e \ e_d]$;

3) 方差分量估计,求解新的 σ_d^2 和 $\sigma_y^{2[11]}$;

4) 重新定权。 $P'_i = \frac{c}{\sigma_i^2 P_i^{-1}} (i = y, d)$ c 可以取

σ_i^2 其中的任一个值;

5) 重复步骤 2) ~ 4), 直到 $\sigma_i^2 (i = y, d)$ 相等为止。

4 计算结果分析

利用 35 个 IGS 站的观测数据,计算一周的接收机 DCB,考虑到计算效率和电离层变化,在采用 3-D B-SPLINE 模型时,取 $J_1 = J_2 = 3, J_3 = 4$,形成 1 800 个电离层残差未知参数。

为了评价本文算法的精度,将计算结果与 IGS 提供的接收机 DCB 进行对比。图 1 是连续 7 天的接收机 DCB 与 IGS 提供的差值,图 2 是计算得到的 35 个 IGS 接收机 DCB 在一周内的变化。

ALBH、ALGO、AMC2、BOGT、BSHM、CEDU、CHAT、CHUR、CRAO、CRO1、DGAR、DRAO、DUBO、FAA1、FLIN、GODE、GOLD、GOPE、GUAM、GUAO、HARB、HERS、HLFX、HOFN、HOLM、HRAO、IENG、IISC、INVK、IQAL、IRKJ、KOUR、MAL2、WTZZ、ZWE2 为选取的 35 个 IGS 站,对应于图 1(a~g) 中横轴(IGS 站)的 IGS 站名。图 1(c) 中,DOY122 缺少 HOLM 站数据;图 1(f) 中,DOY125 缺少 CHUR, CRO1 站数据;图 1(g) 中,DOY126 缺少 CEDU、CRO1、FAA1 站的数据。从图 1 可看出,参与解算的 IGS 站的接收机 DCB 与 IGS 提供的相比,差值几乎都在 1 ns 以内,而且大部分小于 0.5 ns;另外 DOY120 ~ 126 依次对应的均方根分别为:0.346 7、

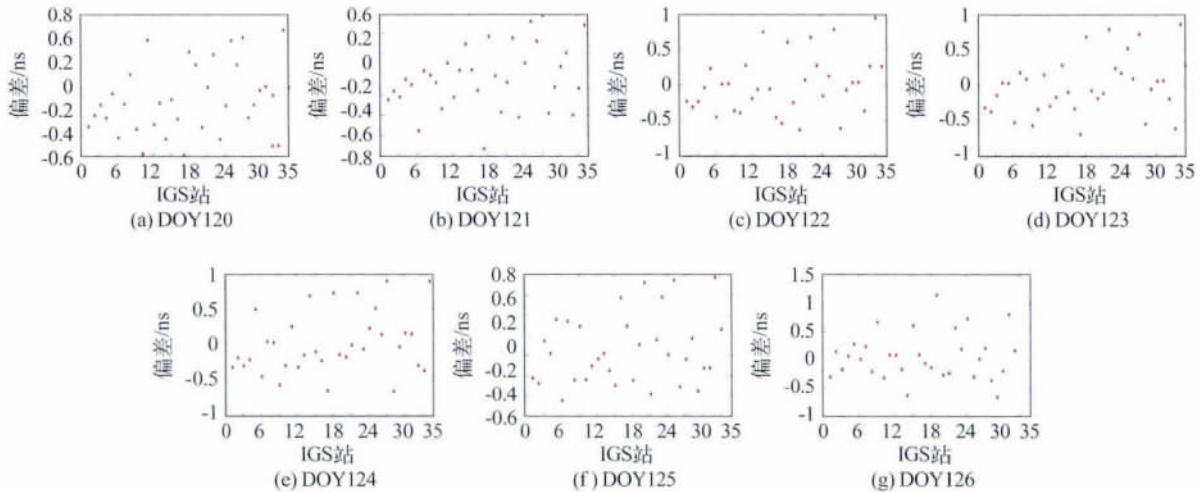


图 1 7 天的 DCB 差值

Fig. 1 Difference of DCB in seven days

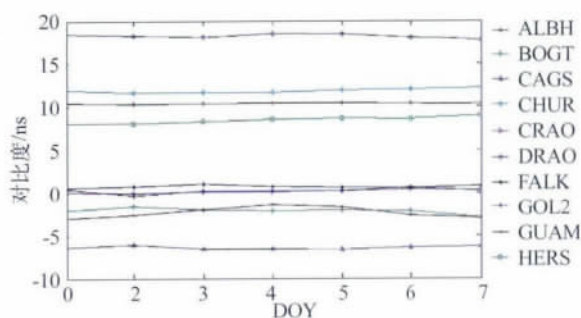


图2 IGS 站接收机 DCB 一周内的变化

Fig.2 The DCB changes of IGS receivers within a week

0.303 1、0.395 9、0.393 0、0.461 8、0.333 3、0.391 4 纳秒(ns),可见其 RMS 都在 0.5 ns 以内,说明本文的算法是有效的,且精度也能达到相应的要求。同时我们选取 10 个 IGS 站,计算其 7 天的接收机 DCB,从图 2 可看出,10 个站的接收机 DCB 较稳定,变化幅度在 1ns 以内。

5 结论

提出的方法是同时解算接收机 DCB 以及电离层延迟残差模型系数。通过解算 40 个 IGS 站的接收机 DCB 与 IGS 提供的值相比,结果表明其差值基本上都能达到 1ns 以内,而且大部分在 0.5ns 以内,说明本文的算法是有效的。通过解算单站接收机 DCB,可以有效分析测站接收机的硬件延迟变化趋势以及是否变更接收机类型,其效率比利用多站数据,通过建立电离层模型解算有明显的优势。但本文解算 DCB 时,未考虑太阳活动对电离层变化的影响;在利用电离层单层模型时,选择的高度是 450 km,未与取其他高度值比较,需要作进一步的研究。

参 考 文 献

1 Arikan F, et al. Estimation of single station interfrequency re-

ceiver bias using GPS-TEC [J]. Radio Science: RS4004. doi: 10.1029/2007RS003785.

- 2 Grejner-Brzezinska D A, et al. An analysis of the effects on different network-based ionosphere estimation models on rover positioning accuracy [J]. J Global Positioning Syst., 2004, 3: 115 - 131.
- 3 宋小勇,等. GPS 接收机码间差(DCB)的确定[J]. 大地测量学与地球动力学,2009,(1): 127 - 131. (Song Xiaoyong, et al. Determining the DCB of receiver[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics 2009,(1): 127 - 131)
- 4 Rolf Dach, et al. Bernese GPS software version 5.0 [M]. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2007.
- 5 Maxim Keshin. A new algorithm for single receiver DCB estimation using IGS TEC maps [J]. GPS Solut, Doi: 10.1007/s10291-011-0230-z.
- 6 Stefan Schaer and Werner Gurtner(1998). IONEX: the IONosphere map exchange format version 1. Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop, ESOC, Darmstadt, Germany, February 9 - 11, 1998.
- 7 Nohutcu M, Karlioglu M O and Schmidt M. B-spline modeling of VTEC over Turkey using GPS observations [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2010, 72, 617: 624.
- 8 Michael Schmidt. Wavelet modeling in support of IRI [J]. Advances in Space Research 2007, 39, 932: 940.
- 9 Zeilhofer C, et al. Regional 4-D modeling of the ionospheric electron density from satellite data and IRI [J]. Advances in Space Research 2009, 43: 1 669 - 1 675.
- 10 Koch K R and Kusche J. Regularization of geopotential determination from satellite data by variance components [J]. Journal of Geodesy 2002, 76: 259 - 268.
- 11 崔希璋,等. 广义测量平差[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (Cui Xizhang, et al. General surveying adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002)