

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.008

确定 GPS 接收机码间偏差的一种新算法

田林亚,熊欢欢,石超,祖滢

(河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100)

摘要:针对目前求解 GPS 接收机码间偏差(B)的主要方法(球谐函数模型法、曲面拟合模型法等)存在计算繁琐和效率不高等问题,研究并提出一种新的计算方法,即利用双频载波相位平滑伪距数据以及 CODE 提供的全球电离层 V_{TEC} 地图和卫星 B 值,通过旋转地图内插 V_{TEC} 以及伪距差分进行单站 GPS 接收机 B 值的解算。采用此方法和 IGS 跟踪站的观测数据解算 GPS 接收机的 B 值,并与 CODE 提供的跟踪站的 B 值进行比较,结果表明,这种新算法能够以优于 0.4 ns 的精度确定 GPS 接收机的 B 值。

关键词: GPS;接收机;码间偏差;CODE;天顶方向总电子含量;相位平滑伪距;旋转地图;电离层格网

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2016)04-0330-05

A new algorithm for determining GPS receiver's differential code bias

TIAN Linya, XIONG Huanhuan, SHI Chao, ZU Ying

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Major methods for determining a GPS receiver's differential code bias (B), including the spherical harmonic function model and surface fitting model, have a high degree of computational complexity and poor efficiency. Based on the pseudorange data with carrier phase smoothing, global maps of vertical total electron content (V_{TEC}) of the ionosphere, and satellite B values provided by CODE, this paper proposes a new algorithm for determining the single GPS receiver's B through interpolated V_{TEC} values from rotated maps and the pseudorange difference. The GPS receiver's B values were estimated with the proposed method and observed data at IGS tracking stations, and were compared with those at the tracing stations provided by CODE. The results show that the new method can determine the GPS receiver's B with an accuracy higher than 0.4 ns.

Key words: GPS; receiver; differential code bias; CODE; vertical total electron content; carrier phase smoothed pseudorange; rotated map; ionosphere grid

GPS 码间偏差(difference code bias, B)是指由于硬件延迟造成同一时间不同频率或同一频率上不同伪码观测测量之间的时间偏差,包含 GPS 接收机码间偏差和卫星码间偏差^[1-3]。按照不同的接收机类型,接收机码间偏差可分为 P_1/P_2 、 C_1/P_1 和 C_2/P_2 等 3 种码间偏差;卫星 P_1/P_2 码间偏差通过导航电文播发给用户,对应于导航电文中的 τ_{GD} 字段。IGS 发布的 P_1/P_2 码间偏差(B_{P12})与导航电文发布的 τ_{GD} 关系一般表示为^[4-5]

$$\tau_{\text{GD}} = 1.55B_{\text{P12}} + d \quad (1)$$

式中: d ——常数差异。

目前,求解 GPS 接收机 B 值的方法较多,如 CODE 的球谐函数模型法、曲面拟合模型法等,这些方法都将卫星及接收机的 B 值视为未知参数参与平差解算。有人利用球谐函数进行区域电离层建模,从而解算接收机 B 值^[1,3],但这种方法的计算效率不高。有人利用 GIM 提供的电离层数据内插 V_{TEC} ,用 3 维 B-SPLINE 模型来表述误差项,通过方差分量估计法解算接收机 B 值^[6-8],但这种计算方法十分繁琐。本文提出一种解算 GPS 接收机 B 值的新算法,即利用旋转地图电离层格网内插及伪距观测值之差进行接收机 B 值的解算,

收稿日期:2015-10-15

作者简介:田林亚(1963—),江苏淮安人,教授,博士,主要从事卫星导航与定位研究。E-mail:lytian@sina.com

在提高解算效率的同时,有效保证了接收机 B 值的解算精度。

1 码间偏差的计算原理

考虑 GPS 卫星与接收机的硬件延迟时, GPS 伪距观测方程可以表示为

$$P_i = P_0 + \frac{I}{f_i^2} + c(b_{Ri} - b_{Si}) + \delta_{trop} + c(\delta_{Ri} - \delta_{Si}) + \varepsilon \quad (2)$$

式中: P_i ——第 i 频点上的伪距观测值; P_0 ——理论卫星至接收机的距离; I ——观测历元电离层改正因子; f_i ——对应的载波频率; c ——光速; b_{Ri} 、 b_{Si} ——第 i 频点上接收机及卫星的硬件延迟误差; δ_{trop} ——对流层延迟改正项; δ_{Ri} 、 δ_{Si} ——接收机与卫星的钟差; ε ——测量噪声,包括多路径效应。

将同一历元 P_1 、 P_2 伪距观测方程直接求差,可得组合观测方程:

$$P_1 - P_2 = \left(\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} \right) I + c(B_R - B_S) + \varepsilon' \quad (3)$$

式中: B_S ——卫星 P_1/P_2 的码间偏差; B_R ——接收机 P_1/P_2 的码间偏差; ε' ——组合观测噪声。

由于 $P_1 - P_2$ 的精度较低(大约为 0.43 m),而载波相位观测值 $\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2$ 的精度较高(一般为毫米级)^[6],可先采用 GF-MW 组合法进行载波相位观测值的周跳探测及修复^[9-12],再利用已完成周跳修复后的载波相位观测值对 P_1 、 P_2 伪距观测值进行平滑,以此提高 B 的解算精度。采用 Hatch 滤波和双频载波相位观测值平滑 P_1 、 P_2 伪距观测值的逐历元递推公式如下:

$$\begin{cases} \bar{P}_i(t_i) = \frac{1}{w(k)} P_i(t_i) + \left(1 - \frac{1}{w(k)}\right) \left[\bar{P}_i(t_{i-1}) + \bar{\lambda} (\bar{\varphi}(t_i) - \bar{\varphi}(t_{i-1})) \right] \\ \bar{P}_i(t_1) = P_i(t_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_i(t_i)$ ——历元 t_i 的伪距观测值; $\bar{P}_i(t_{i-1})$ ——前一历元 t_{i-1} 的伪距平滑值; $w(k)$ ——平滑因子; $\bar{\varphi}_i(t_i)$ ——双频载波相位消电离层组合值; $\bar{\lambda}$ ——载波相位消电离层组合波长。

由式(3)可以看出,解算接收机 B 值的精度与卫星 B 值及电离层延迟精度有关。解算接收机 B 值的方法一般有 2 种:一种是建立区域电离层模型,同时解算卫星 B 参数、电离层模型参数及接收机 B 参数;另一种是将 IGS 发布的全球电离层数据作为已知值,经电离层参数改正后再解算接收机 B 参数。

将 CODE 提供的卫星 B 参数作为已知值,由式(3)及式(4)可得解算接收机 B 值的观测方程:

$$y = m_f V_{TEC} F(z') + cB_R + \varepsilon' \quad (5)$$

其中

$$y = \bar{P}_1 - \bar{P}_2 + cB_S$$

式中: m_f ——频率相关因子; V_{TEC} ——天顶方向的总电子含量; $F(z')$ ——投影函数; z' ——穿刺点(IPP)的天顶距。

GPS 常用的投影函数有 Klobuchar 模型投影函数、 Q 因子投影函数、分段提取的电离层投影函数等^[12-13],其中电离层投影函数为

$$F(z') = \frac{1}{\cos \left[\arcsin \left(\frac{R}{R + H} \alpha z' \right) \right]} \quad (6)$$

式中: R ——地球平均半径,一般取为 6 371 km; H ——单层电离层模型高度,一般取为 506 km; α ——改正系数^[9]。

利用球谐函数模型解算接收机 B 值时, V_{TEC} 需要用球谐函数建立区域电离层模型,联合解算模型参数以及接收机 B 值,球谐函数模型为^[13]:

$$V_{TEC} = \sum_{n=0}^{\max} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \left[\bar{C}_{nm} \cos(ms') + \bar{S}_{nm} \sin(ms') \right] \quad (7)$$

其中

$$s' = \lambda - \lambda_0$$

式中: φ ——穿刺点的地理纬度; s' ——穿刺点的日固经度; λ ——穿刺点的地理经度; λ_0 ——太阳的地理经度; $\bar{P}_{nm}$ —— n 阶 m 次缔合 Legendre 多项式系数; $\bar{C}_{nm}$ 、 $\bar{S}_{nm}$ ——待估球谐函数的系数。

由于利用球谐函数建立区域电离层模型需要引入大量的待估球谐函数系数,例如将球谐函数展开至4阶时需要引入的待估球谐函数系数多达25个,且需要构建电离层模型,因此,用这种方法解算接收机 B 值的效率不高,计算也十分繁琐。

2 码间偏差的新算法

由上可知,基于球谐函数模型解算接收机 B 值的主要工作是利用球谐函数模型建立区域电离层模型,解算天顶方向的总电子含量。鉴于CODE、JPL等机构会发布每日全球或区域电离层产品和卫星码间偏差(副产品,每日1套),还增加了部分IGS跟踪站的接收机码间偏差,CODE发布的每日IONEX1.0文件中含有25张 V_{TEC} 地图,对应于每日的0:00—24:00整点时刻,JPL发布的每日IONEX1.0文件中含有13张 V_{TEC} 地图,对应于0:00,2:00,⋯,24:00,因此,利用这些机构发布的电离层产品可以内插出任意时刻、任意地心经纬度 (φ, λ) 处的 V_{TEC} ^[14-15]。取任意2个相邻时刻 V_{TEC} 地图内插 V_{TEC} 的算法如下:

$$V_{\text{TEC}} = E(\varphi, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_i(\varphi, \lambda'_i) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\varphi, \lambda'_{i+1}) \quad (8)$$

其中

$$T_i \leq t \leq T_{i+1}$$

式中: T_i, T_{i+1} ——与 t 相邻的整点时刻; $\lambda'_i, \lambda'_{i+1}$ ——与 T_i, T_{i+1} 对应的旋转后地理经度。

由于在电离层数据内插过程中涉及电离层电离程度与太阳位置强相关的一般性假设,为了提高电离层 V_{TEC} 内插精度,需要使用旋转地图内插 V_{TEC} ,以补偿其与太阳位置的强相关性。以式(8)中 $E_i(\varphi, \lambda'_i)$ 为例,内插经度 λ 处 t 时刻的平太阳时角假设为 s ,三者的关系为

$$s = \lambda + t - 12 \quad (9)$$

由于没有发布内插时刻 t 的 V_{TEC} 地图,在使用 T_i 时刻 V_{TEC} 地图内插时,为了最大程度地接近一般性假设,须使用经度 λ' 代替经度 λ 进行内插,经度 λ'_i 处 T_i 时刻的平太阳时角保持为 s ,则

$$\lambda'_i = s - T_i + 12 \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)可得

$$\lambda'_i = \lambda + t - T_i \quad (11)$$

必须注意的是,在使用旋转地图进行 V_{TEC} 内插时,当内插经度 λ 接近 $\pm 180^\circ$ 时,可能会出现 $\lambda'_i > +180^\circ$ 或 $\lambda'_{i+1} < -180^\circ$ 的情况,须谨慎处理。

在考虑接收机 B 值与卫星 B 值的情况下,对于双频GPS观测数据,测站至卫星路径上的总电子含量的观测方程如下^[8]:

$$T_{\text{EC}} = 9.52437(\bar{P}_2 - \bar{P}_1 + cB_R + cB_S) \quad (12)$$

由式(6)(8)(12)可得利用旋转地图电离层内插 $E(\varphi, \lambda, t)$ 及伪距差分 $\bar{P}_2 - \bar{P}_1$ 来确定接收机DCB的观测方程的最终形式为

$$E(\varphi, \lambda, t) F(z') = 9.52437(\bar{P}_2 - \bar{P}_1 + cB_R + cB_S) \quad (13)$$

新的观测方程中只含有接收机 B 一个参数,解算过程中观测量依据卫星高度角加权,权函数可表示为

$$P(z) = P'_0 \sin^2(z) \quad (14)$$

式中: P'_0 ——天顶方向观测值的权值; z ——卫星高度角。

3 计算结果分析

为了验证本文提出新算法的可靠性及解算精度,利用中国区域内的BJFS、BJNM、CHAN、URUM等4个IGS跟踪站2015年3月16—22日7d的观测数据,分别解算各站接收机 B 值,并与CODE、JPL机构提供的数据进行对比,分析新算法的可靠性;利用BJFS、URUM2015年3月1—30日的观测数据,分析新算法的解算精度。所用数据均可在IGS网站下载得到。

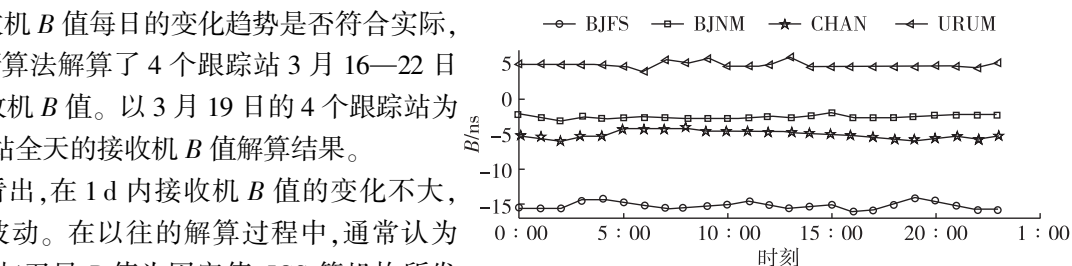
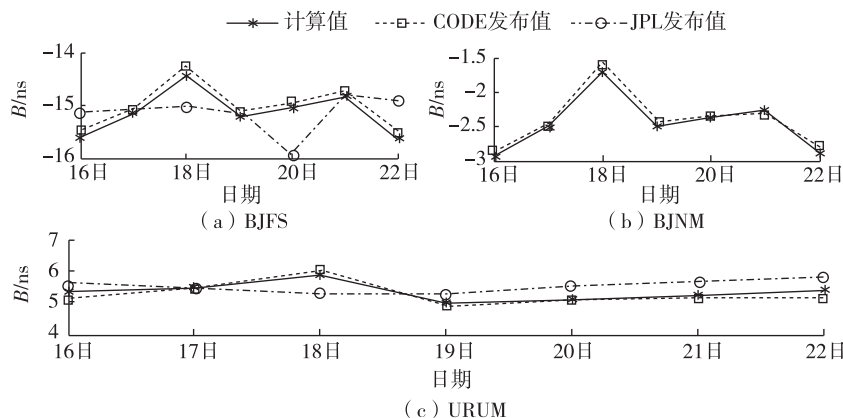
3.1 算法可靠性分析

使用上述4个IGS跟踪站的数据,首先对原始观测数据进行处理,处理过程中剔除卫星高度角小于 10° 的观测值和同一卫星连续观测少于10个历元的观测值,因为CODE提供的 V_{TEC} 地图每天有25张,每张 V_{TEC} 地图时间间隔较JPL的短,为提高 V_{TEC} 内插精度,在内插穿刺点 V_{TEC} 、获取各卫星 B 值信息时,均采用CODE提供的IONEX文件给出的数值。

为了验证接收机 B 值每日的变化趋势是否符合实际,采用本文研究的新算法解算了 4 个跟踪站 3 月 16—22 日内每天 24h 的接收机 B 值。以 3 月 19 日的 4 个跟踪站为例,图 1 给出了各站全天的接收机 B 值解算结果。

由图 1 可以看出,在 1 d 内接收机 B 值的变化不大,均在某一值附近波动。在以往的解算过程中,通常认为 1 d 内接收机 B 值与卫星 B 值为固定值,IGS 等机构所发布电离层文件中也是以日为单位给出的,因此新算法所得的 B 值在 1 d 内的变化趋势符合实际情况。

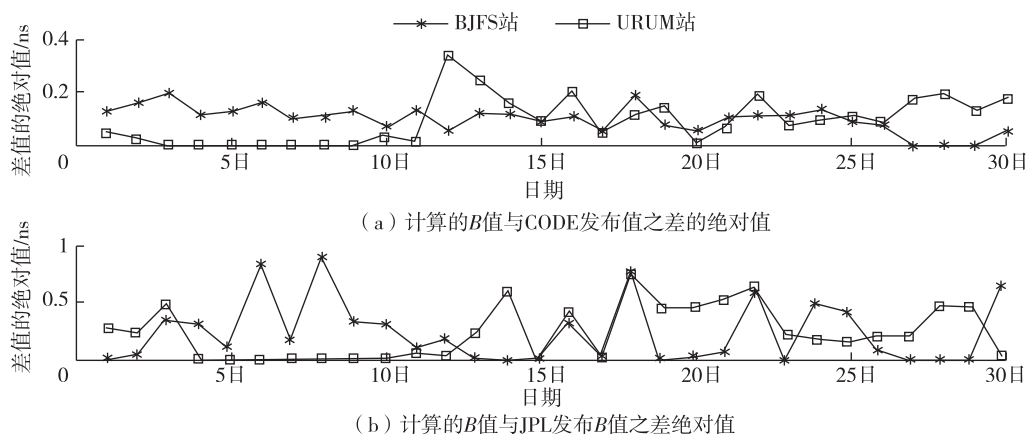
为了验证解算结果的可靠性,需要以日为单位解算 4 个跟踪站每天的 B 值,并与 CODE、JPL 等机构发布的跟踪站 B 值对比。图 2 为 1 周内 4 个跟踪站 B 值解算结果与 CODE、JPL 发布值的对比。

图 1 接收机 1 d 的 B 值变化Fig. 1 Change of receiver's B in one day图 2 1 周的 B 值对比Fig. 2 Comparison of B values over one week

由于 CODE 没有发布 CHAN 站的 B 值, JPL 没有发布 BJNM、CHAN 站的 B 值, 因此, 图 2 没有给出相应的值。由图 2 可以看出, 在 1 周时间内, 新算法解算的 B 值与 CODE、JPL 发布值相差均不超过 1 ns, 即使 3 月 18 日 BJNM 站 B 值变化幅度较大, 新算法的解算结果仍能很好地符合 CODE 的发布值, 说明新算法的解算结果是可靠的。

3.2 计算精度分析

采用同样的数据处理方法和接收机 B 值的新算法, 解算 BJFS、URUM 跟踪站 3 月 1—30 日的接收机 B 值, 并与 CODE、JPL 发布的 B 值作差, 分析新算法的解算精度。图 3 中, 差值为 0 表示相应机构没有发布该日此跟踪站的 B 值。

图 3 1 个月内 B 的差值Fig. 3 Difference in B values obtained from different methods over one month

从图3可以看出,本文新算法解算的接收机 B 值与CODE机构发布的 B 值的差值基本保持在 0.2 ns 以内,与JPL机构发布 B 值的差值也保持在 1 ns 以内,其中绝大部分在 0.5 ns 以内,CODE与JPL发布值相差在 1 ns 以内。之所以解算出的 B 值相对于JPL给出的值差值较大,原因可能是在内插穿刺点 V_{TEC} 与获取各卫星 B 值时均采用CODE提供的IONEX文件,而CODE与JPL提供的IONEX文件中 V_{TEC} 值和各卫星 B 值实际是有差异的,所以解算结果更接近CODE发布的跟踪站 B 值。以CODE提供的 B 值为真值,新算法解算的2个跟踪站BJFS、URUM 1个月的 B 值中误差分别为 0.1136 ns 、 0.1414 ns ,中误差均小于 0.2 ns ,因此本文提出的新算法具有较高的解算精度。

4 结 语

本文提出的利用单站双频GPS观测值,采用旋转地图内插获取 V_{TEC} ,解算接收机 B 值的算法,与传统的利用多站观测数据建立区域电离层模型相比,提高了 B 值的解算效率。采用新算法解算的 B 值与CODE机构发布的 B 值相比,差值基本保持在 0.2 ns 以内,比传统算法的解算精度略有提高。另外,采用新算法解算的 B 值精度与采用的电离层格网精度强相关,在IGS跟踪站较少和电离层格网精度较低的地区,解算精度有待进一步研究和提高。

参考文献:

- [1] 宋小勇, 杨志强, 焦文海, 等. GPS接收机码间偏差(DCB)的确定[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1):127-131. (SONG Xiaoyong, YANG Zhiqiang, JIAO Wenhai, et al. Determination of GPS receiver's DCB[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(1):127-131. (in Chinese))
- [2] JIN Rui, JIN Shuanggen, FENG Guiping. M_DCB: matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases[J]. Gps Solutions, 2012, 16(4):541-548.
- [3] 张伟, 邱卫宁, 畅鑫. 基于球谐函数模型的GPS差分码延迟估计[J]. 测绘通报, 2013, 41(6):19-21. (ZHANG Wei, QIU Weining, CHANG Xin. Estimation of GPS differential code delay based on spherical harmonic function model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013, 41(6):19-21. (in Chinese))
- [4] 耿长江. 利用地基GNSS数据实时监测电离层延迟理论与方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2011.
- [5] 魏传军. 基于地基GNSS观测数据的电离层延迟改正研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [6] HONGC K, GREJNER-BRZEZINSKA D A, KWON J H. Efficient GPS receiver DCB estimation for ionosphere modeling using satellite-receiver geometry changes[J]. Earth Planets & Space, 2008, 60(11):25-28.
- [7] 谢益炳, 陈俊平, 伍吉仓. 一种确定单站接收机码间偏差的新算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4):142-145. (XIE Yibing, CHEN Junping, WU Jicang. A new algorithm for determining GPS single receiver DCB[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(4):142-145. (in Chinese))
- [8] 章红平. 基于地基GPS的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海天文台), 2006.
- [9] KESHINM. A new algorithm for single receiver DCB estimation using IGS TEC maps[J]. GPS Solutions, 2012, 16(3):283-292.
- [10] 陈央央. GPS周跳探测与修复问题研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [11] PARK B, KEE C. Optimal hatch filter with a flexible smoothing window width[J]. Journal of Navigation, 2005, 61(3):435-454.
- [12] 王维, 王解先, 高俊强. GPS周跳探测的方法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2010(6):687-690. (WANG Wei, WANG Jiexian, GAO Junqiang. Cycle slip detection of GPS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010(6):687-690. (in Chinese))
- [13] 李征航, 黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 2版. 武汉:武汉大学出版社, 2012:104-105.
- [14] 吴继忠, 高俊强, 李明峰. IGS精密星历和钟差插值方法的研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(7):52-54. (WU Jizhong, GAO Junqiang, LI Mingfeng. Research on interpolation method for IGS precise ephemeris and clockbias[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(7):52-54. (in Chinese))
- [15] 王五魁, 刘长建, 吴洪举. IGS电离层VTEC产品内插算法解析[J]. 全球定位系统, 2013(6):17-21. (WANG Wukui, LIU Changjian, WU Hongju. Interpolating algorithm analysis of IGS ionosphere VTEC product[J]. Gns World of China, 2013(6):17-21. (in Chinese))