



引文格式:林高宇,王磊,何飞扬,等.Swarm低轨卫星星座的GPS接收机差分码偏差估计[J].武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1):119-126.DOI:10.13203/j.whugis20200479

Citation: LIN Gaoyu, WANG Lei, HE Feiyang, et al. GPS Differential Code Bias Estimation Using Swarm LEO Constellation Onboard Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(1): 119-126. DOI: 10.13203/j.whugis20200479

Swarm低轨卫星星座的GPS接收机差分码偏差估计

林高宇¹ 王磊² 何飞扬¹ 宋晓迪¹ 郭际明¹

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

² 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:差分码偏差(differential code bias, DCB)是指由全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)信号接收和发射硬件导致的频率相关的偏差项,对电离层估计有显著的影响,在利用GNSS观测数据提取电离层总电子含量时需要被精确修正,研究利用低轨卫星的星载GNSS观测数据估计DCB尤为重要。使用Swarm星座3颗卫星GPS接收机2016年1月的双频观测值,设计了独立估计和联合估计两种估计方案,采用附加限制条件的间接平差方法对GPS卫星以及星载接收机的DCB进行估计。以中国科学院和德国宇航中心的DCB产品作为参考,分析了两种估计方案的精度和稳定性,相较于独立估计方案,联合估计方案得到的GPS卫星DCB的稳定性较独立估计方案提高了16.6%,且与参考DCB具有更好的一致性。

关键词:低轨卫星;差分码偏差估计;Swarm卫星;参数估计;GPS

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-03-22

DOI:10.13203/j.whugis20200479

文章编号:1671-8860(2023)01-0119-08

GPS Differential Code Bias Estimation Using Swarm LEO Constellation Onboard Observations

LIN Gaoyu¹ WANG Lei² HE Feiyang¹ SONG Xiaodi¹ GUO Jiming¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The differential code biases(DCBs) have a great influence on the estimation of ionosphere with GPS observations, which should be precisely calibrated when obtaining ionospheric slant total electron content (STEC). With the increasing number of low-orbit satellites, DCB estimation of low earth orbit (LEO) receivers becomes particularly important for the topside ionosphere research. **Methods:** Based on the onboard observations of GPS satellites by the Swarm constellation, two different estimation schemes for three satellites in constellation are designed, including individually estimation and combined estimation. **Results:** Taking the DCB products provided by Chinese Academy of Sciences (CAS) and Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt (DLR) as reference values, we analyze the accuracy and stability of these two strategies. Compared with the individual estimation strategy, the combined estimation strategy achieves more stable satellite DCB with a stability improvement of 16.6% for GPS satellites, and the satellite DCB presents better consistency with the reference DCB provided by the two analysis centers. **Conclusions:** Both strategies can be used to estimate DCB and the combined estimation strategy results in better performance.

基金项目:国家自然科学基金(41704002,42074036);中央高校基本科研业务经费项目(2042022dx0001)。

第一作者:林高宇,硕士,主要从事大地测量数据处理工作。2016301610103@whu.edu.cn

通讯作者:王磊,博士,副研究员。lei.wang@whu.edu.cn

Key words: low earth orbit(LEO); different code biases estimation; Swarm satellites; parameter estimation; GPS

随着低轨(low earth orbit, LEO)卫星数量的不断增加,且大多数卫星都搭载双频全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机,利用其观测数据可以计算得到LEO卫星和GNSS卫星视线方向上的电离层总电子含量(total electron content, TEC),这为构建高分辨率的顶部电离层模型提供了重要契机^[1]。但利用LEO卫星双频观测值计算TEC数据时,存在许多误差的影响,其中GPS差分码偏差(differential code bias, DCB)是一项必须消除的误差,其对TEC估计的影响最大可达到几十TECU^[2-3]。DCB是由GPS信号卫星端和接收机端的两个频段在发射和接收信号时存在时间延迟造成的,受工作环境尤其是温度的影响,不具有长期的稳定性^[4-6]。GNSS卫星DCB对于基本定位、导航和授时(positioning navigation and timing, PNT)服务特别是对于需要更高精度的单频用户是必不可少的,DCB在诸如基于GNSS的电离层探测、精密单点定位(precise point positioning, PPP)和PPP模糊度解算以及GNSS卫星时钟估计等精确应用中也是重要的因素^[7-9]。目前GPS卫星端的DCB误差可以通过使用国际GNSS服务组织(international GNSS service, IGS)提供的DCB产品进行改正,该产品利用GPS地面观测数据确定GPS卫星DCB^[8],而对于低轨卫星上的接收机DCB仍然需要进行估计^[10]。

随着低轨卫星任务的增加,低轨卫星接收机DCB的估计也逐渐受到重视,许多不同的估计方法被提出。文献[11]将IGS发布的GPS卫星DCB作为真值,利用球对称假设将电离层倾斜总电子含量(slant total electron content, STEC)转化为垂直总电子含量(vertical total electron content, VTEC)和投影函数的形式,并通过历元内求差的方式消除了VTEC参数,使得最后只有LEO接收机DCB作为待估参数进行求取。

文献[12]使用COSMIC和CHAMP的数据,将GPS卫星的DCB作为未知数与LEO接收机DCB同时进行估计,COSMIC的估计精度为0.791 ns,CHAMP卫星的估计精度为0.279 ns。文献[13]在使用FY-3C的数据估计GPS卫星DCB和LEO接收机DCB时将VTEC同样视为未知参数进行估计,估计得到的GPS卫星的DCB月稳定性约为0.1 ns,与地面数据估计得到的DCB产品相近,FY-3C接收机的DCB月稳定性约为0.2 ns。文献[14]将FY-3D的DCB估计结果与FY-3C的估计结果进行了对比,结果显示,使用FY-3D估计得到的GPS卫星的DCB月稳定性优于FY-3C,且FY-3D接收机的DCB稳定性同样优于FY-3C。

Swarm星座是欧洲空间局(European Space Agency, ESA)建设的用于测量地球核心、电离层、海洋等地区磁场信息的对地观测卫星星座,该星座包括3颗相同的小卫星,每颗卫星都搭载相同类型的双频GPS接收机,可以同时接收最多8颗GPS卫星的双频信号。其中Swarm A和Swarm C卫星处于相同高度轨道(460 km)且经度差约为1.4°(即距离约150 km),而Swarm B单独飞行于530 km高度轨道。Swarm卫星为电离层电子密度随地理纬度和地理经度的变化提供了丰富的观测数据^[15]。本文利用ESA公开的Swarm卫星GPS数据、导航电文以及精密轨道信息(<http://swarm-diss.eo.esa.int>),基于电离层球对称假设,采用几何映射函数,通过最小二乘算法对Swarm星座中的3颗卫星进行DCB估计。

1 Swarm卫星接收机DCB估计方法

本文使用Swarm星座卫星双频GPS接收机获得的载波和伪距观测值的组合来估计DCB。载波和伪距观测值分别表示为^[16]:

$$\begin{cases} P_{r,i}^s = R_r^s + c(dt_r - dt^s) + \frac{40.28}{f_i^2} T_r^s + c(d_{r,i} + d_i^s) + \Delta_r^s \\ L_{r,i}^s = R_r^s + c(dt_r - dt^s) - \frac{40.28}{f_i^2} T_r^s + B_{r,i}^s + \Delta_r^s \end{cases} \quad (1)$$

式中,上标 s 、下标 r 和 i 分别表示GNSS卫星、星载GNSS接收机和信号频率; P 、 L 表示伪距和载波观测值(单位:m); R 表示实际的几何距离; c 是

真空中的光速; dt^s 和 dt_r 分别表示GNSS卫星和星载GPS接收机的时钟偏差; f_i 是对应信号的频率; T_r^s 是沿卫星和接收机视线方向上的STEC;

$d_{r,i}$ 和 d_i^s 分别表示 LEO 星载接收机和卫星端第 i 个频率伪距观测值的硬件延迟; Δ_i^s 表示其他与频率无关的观测误差, 如相对论误差和天线中心偏差; $B_{r,i}^s$ 是载波观测值的模糊度偏差。一般来说, 低轨卫星的高度高于 300 km, 因此不考虑对流层对 GNSS 观测值的影响。

由于接收机的快速移动和相对较低的信噪比, LEO 卫星的 GPS 观测值更容易出现周跳和异常值, 特别是在高度角较小时, 因此在数据处理前首先需要按照一定的截止高度角对数据进行截取, 然后对剩余的数据用 TurboEdit 方法进行粗差消除和周跳改正^[17], 最后对载波和伪距观测值采用无几何距离(geometry free, GF)组合, 可以有效消除观测值中与频率无关的误差, 得到^[18]:

$$\begin{cases} P_{G_r}^s = P_{r,1}^s - P_{r,2}^s = \alpha T_r^s + cD_r + cD^s \\ L_{G_r}^s = L_{r,1}^s - L_{r,2}^s = -\alpha T_r^s + B_{r,1,2}^s \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_G 和 L_G 分别表示 GPS 卫星伪距和载波 GF 观测量; α 为常转换系数, $\alpha = 40.28 \times \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$; D 是差分码偏差, 其中 D_r 是接收机 r 的差分码偏差, D^s 是 GPS 卫星 s 对应的差分码偏差; $B_{r,1,2}^s$ 是载波模糊度偏差的频间差值。式(2)表明, GF 组合结果中只包含了接收机和卫星的 DCB 误差以及电离层误差。

虽然伪距观测值是绝对观测量, 但其精度相对较低, 而载波相位观测值精度较高, 但包含模糊度影响, 因此将伪距和相位观测值结合进行载波相位平滑伪距处理, 能够在提高精度的同时避免模糊度的影响, 是目前 GNSS 电离层研究中最主要的使用导出量。无周跳现象发生时, 相位模糊度为常数, 因此连续观测弧段内的模糊度估值可以描述为:

$$\bar{B}_{r,1,2}^s = \frac{1}{u} \sum_{k=1}^u (L_{G_r}^s + P_{G_r}^s) - cD_r - cD^s \quad (3)$$

式中, $\bar{B}_{r,1,2}^s$ 为弧段内的模糊度估值; k 表示沿观测弧段的第 k 个历元; u 表示弧段内历元总数。

$$\begin{bmatrix} \bar{L}_1^1 \\ \bar{L}_1^2 \\ \vdots \\ \bar{L}_1^m \\ \bar{L}_2^1 \\ \bar{L}_2^2 \\ \vdots \\ \bar{L}_n^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha m f_1^1 & 0 & \cdots & 0 & c & 0 & \cdots & 0 & c & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha m f_1^2 & 0 & \cdots & 0 & c & 0 & \cdots & 0 & 0 & c & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha m f_1^m & 0 & \cdots & 0 & c & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & c \\ 0 & \alpha m f_2^1 & \cdots & 0 & 0 & c & \cdots & 0 & c & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha m f_2^2 & \cdots & 0 & 0 & c & \cdots & 0 & 0 & c & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha m f_n^m & 0 & 0 & \cdots & c & 0 & 0 & \cdots & c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \\ D_1 \\ \vdots \\ D_n \\ D^1 \\ \vdots \\ D^m \end{bmatrix} \quad (7)$$

将模糊度估值从载波观测值中减去, 可以得到载波相位平滑伪距结果^[19]:

$$\bar{L}_r^s = \frac{1}{u} \sum_{k=1}^u (L_{G_r}^s + P_{G_r}^s) - L_{G_r}^s = \alpha T_r^s + cD_r + cD^s \quad (4)$$

式中, \bar{L}_r^s 为载波相位平滑伪距结果。

每一时段不同 GPS 卫星的 STEC 各不相同且均为未知参数, 为了减少未知参数的数量, 需要利用对应的顶部电离层穿刺点 (topside ionospheric pierce point, TIPP) 的投影函数 (mapping function, MF), 将观测得到的 GNSS 卫星与接收机之间信号路径上的 STEC 转换到垂直方向上的 VTEC, 一般来说, 在 LEO 卫星的电离层相关应用中有 3 种常用的投影函数, 包括薄层模型 (thin layer model, TLM)^[20]、F&K 投影函数^[21] 和 Lear 投影函数^[22]。

文献[23]对 3 种投影函数进行了评估, 结果显示 F&K 投影函数的精度最高, 因此本文使用 F&K 投影函数^[21] 将 STEC 转化为 VTEC:

$$T_r^s = \frac{1 + (h + R_e)/(H + R_e)}{\cos z + \sqrt{(h + R_e)^2/(H + R_e)^2 - \sin^2 z}} \cdot V_r^s \quad (5)$$

式中, V 是观测对应的 VTEC; R_e 是地球半径; h 为电离层有效高度 (ionosphere effective height, IEH); H 为低轨道卫星的轨道高度; z 是天顶角。文献[23]评估了 F&K 投影函数在不同 IEH 的性能, 发现基于太阳活动强度的质心方法更适用于星载 DCB 和 VTEC 估算。质心法可以表示为:

$$h = (0.0027F_{10.7} + 1.79)H - 5.52F_{10.7} + 1350 \quad (6)$$

式中, $F_{10.7}$ 为太阳 10.7 cm 波长射电通量。

根据电离层球对称假设, 同一接收机每个历元不同 GPS 卫星的 VTEC 数据相同, 因此将每一个历元不同 LEO 卫星对不同 GPS 卫星观测得到的式(4)进行堆叠, 可以得到以 VTEC、卫星和接收机 DCB 作为待求参数的观测方程组矩阵:

式中, m 指观测到的 GPS 卫星数量; n 为 LEO 卫星数量, 当使用单星估计时, $n=1$; mf_j^i 指对应的投影函数。此时该方程未知数大于方程个数, 该方程组无解。假设 GPS 卫星与接收机 DCB 在一天内为一个常数, 将星座内每颗卫星一天内的所有观测方程进行矩阵合并, 可以获得间接平差方程:

$$\begin{cases} Y = BX + \epsilon \\ X = [V, D^s, D_r]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中, Y 为由 n 颗 LEO 卫星当天观测 t 个历元得到所有 \bar{L} 组成的 $(m \times n \times t) \times 1$ 大小的矩阵; X 是由 $n \times t$ 个 VTEC 以及 m 颗 GPS 卫星 DCB 和 n 颗 LEO 接收机 DCB 组成的 $(n \times t + m + n) \times 1$ 大小的未知数矩阵; B 是从式(4)导出的 $(m \times n \times t) \times (n \times t + n + m)$ 大小的设计矩阵; ϵ 为残差项。由于 DCB 参数缺乏绝对基准, 因此无法直接求解 GPS 卫星和接收机单独的 DCB 数值。为了将卫星与 LEO 星载 GPS 接收机 DCB 分离, 避免最小二乘运算中的秩亏现象, 需要添加一个额外的约束条件。目前, IGS 及各个 GNSS 数据处理中心使用的约束条件是各卫星系统的 DCB 均值为零。对于 GPS 卫星, 零均值条件可以描述为^[8]:

$$\sum D^s = 0 \quad (9)$$

由于接收机得到的数据质量与卫星高度角相关, 因此需要对每个观测方程进行权值设定, 观测权值 P 的计算式为:

$$P = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (10)$$

式中, σ_0 和 σ_i 分别为先验方差和电离层观测方差, 其中 $\sigma_i = \frac{\sigma_0}{\sin e}$, e 是观测对应的卫星高度角。附加式(9)后通过最小二乘求解观测值的式(8), 即可得出 GPS 卫星和接收机 DCB 各自的估计值。

2 数据处理与结果分析

2.1 数据描述与处理

本文利用 ESA 提供的 Swarm 星座 3 颗卫星的 GPS 接收机原始双频载波观测值(L1C、L2W)和伪距观测值(C1C、C2W)以及精密轨道产品, 估计 GPS 卫星以及 Swarm 星座 GPS 接收机 C1C 与 C2W 频段的 DCB 差值, 其中观测数据的采样间隔为 1 s。本文选择 2016 年 01-01—01-30 时段的数据进行分析, 在该时段内 Swarm 星座 3 颗卫星均具有完整的全天观测值。

本文以天为单位对 GPS 卫星以及 3 颗 Swarm 卫星的 DCB 进行估计。首先对原始观测值按照一定的截止高度角 φ 进行截取, 本文设定 $\varphi=15^\circ$; 然后使用 TurboEdit 方法对载波观测值进行粗差剔除和周跳改正, 并利用载波观测值按照式(4)对伪距进行平滑; 最后按照上文方法建立平差方程, 求解 GPS 卫星以及 LEO 卫星接收机的 DCB 值, 部分计算结果如图 1 所示。

由于部分 GPS 卫星在某些天内不可用, 导致 DCB 估计的中心基准发生变化, 进而引起个别天的 DCB 值与其他时间存在一个系统性的变化。如图 1(a)所示, 由于 G27 号卫星第 8 天未观测到数据, 导致估计得到的 DCB 结果出现了一个整体的跳变。因此在分析比较 DCB 估计结果之前, 本文通过分析由整个时段内固定可见 GPS 卫星集合估计得到的 DCB 均值变化, 对所有卫星的 DCB 估值结果进行对齐调整, 保证处理时序内所有 DCB 估计结果处于同一基准, 进而消除跳变和平移现象^[4]。

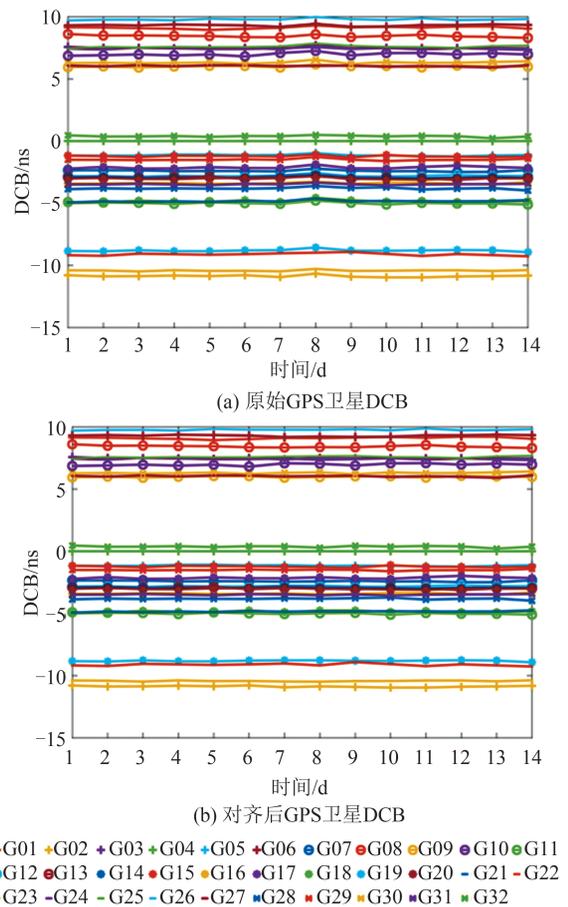


图1 GPS 卫星 DCB 估计结果对齐比较

Fig. 1 Comparison of Original and Aligned Results of GPS Satellite DCB Estimation

2.2 DCB 估计结果与分析

本文采用两种方案估计 DCB 并进行对比分析,一种是使用 Swarm 星座 3 颗卫星独立进行估计 DCB;另一种是使用 Swarm 星座整体联合估计,同时估计 GPS 与 3 颗 Swarm 卫星的 DCB。

本文以德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 和中国科学院 (Chinese Academy of Sciences, CAS) 发布的 GPS 卫星 DCB 作为参考,DLR 和 CAS 产品是使用地面 GPS 观测数据解算的,二者的差别在于估计 DCB 使用的电离层模型不同。DLR 和 CAS 的 DCB 产品在很多研究中被作为参考^[13-14,24]。本文从两方面评价 DCB 估计结果的质量。

1) 以 CAS 和 DLR 发布的 DCB 产品为参考,计算每颗 GPS 卫星 DCB 估计值与参考值间的月平均差值和所有 GPS 卫星的总体月平均差值来评估外部精度,计算式分别为:

$$\begin{cases} V_s = \frac{\sum_{j=1}^M D^{s,j} - \hat{D}^{s,j}}{M} \\ \bar{V} = \frac{\sum_{s=1}^m |V_s|}{m} \end{cases} \quad (11)$$

式中, V_s 表示第 s 号卫星 DCB 估计值与参考值间的月平均差值; \bar{V} 为所有 GPS 卫星总的月平均差值; M 表示用于计算的天数; j 表示第 j 天; $D^{s,j}$ 为第 s 号卫星第 j 天的 DCB 估计值; $\hat{D}^{s,j}$ 为相应的 DLR 或 CAS 发布的 DCB 参考值。

2) 通过计算 GPS 和接收机 DCB 的标准差 (standard deviation, STD) 评估其稳定性,计算式为:

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (D_j - \bar{D})^2}{M - 1}} \quad (12)$$

式中, D_j 是第 j 天的 DCB 估计值; \bar{D} 为估计时段内的 DCB 均值, $\bar{D} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M D_j$ 。

计算得到处理时段内 DLR 和 CAS 产品的月标准差分别为 0.053 6 ns 和 0.071 2 ns,二者均小于 0.1 ns;DLR 和 CAS 产品之间较差的均方根 (root mean square, RMS) 为 0.115 6 ns,可见两种 DCB 产品虽然存在一定的不同,但差异不大。

2.2.1 GPS 卫星端 DCB 估计精度评估

本文两种估计方案得到的每颗 GPS 卫星 DCB 估计值与 DCB 产品间的月平均差值如图 2 所示,其中 GPS 卫星 G04 由于在该时段内未得到观测,所以其 DCB 未进行估计。从图 2 可以看出,两种估计方案得到的 GPS 卫星 DCB 与参考 DCB 产品间的月平均差值大部分均在 ± 1 ns 以内,但存在少部分大于 1 ns 的情况,与 FY-3C 的星载估计结果^[14]相比差异较大,这是因为 Swarm 星座的飞行高度远低于 FY-3C 卫星,而 DCB 估计时使用的电离层球对称假设对于不同的轨道高度具有不同的影响,通常轨道越高,误差越小^[12]。

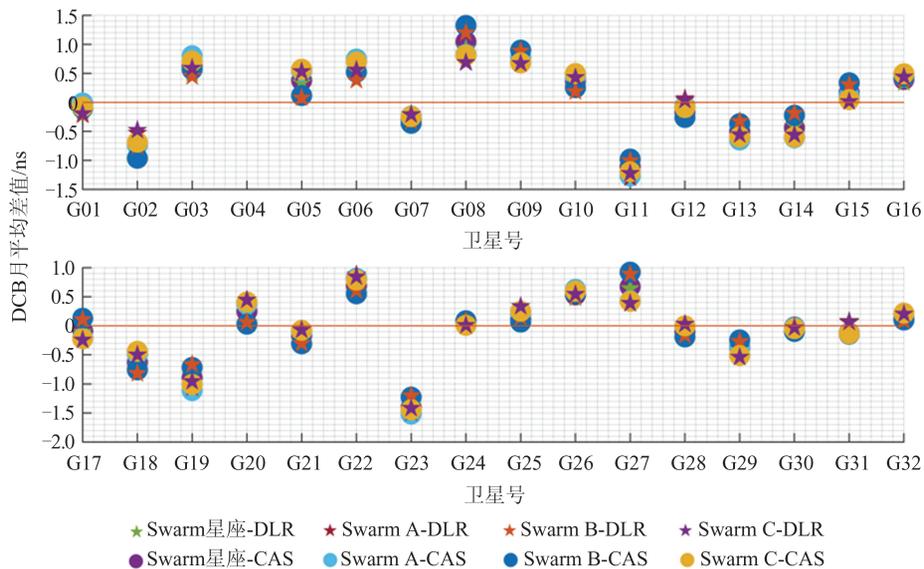


图 2 使用 Swarm 数据估计的卫星端 DCB 与参考 DCB 产品的月平均差值

Fig. 2 Monthly Mean Differences of Satellite DCBs Between the Solutions Estimated from Swarm Constellation and the Reference Solutions

表1给出了两种方案估计得到的GPS卫星端DCB与参考DCB产品间的总体月平均差值。两种方案得到的DCB估计值与DLR和CAS产品间的差距均为0.4~0.5 ns,总体上两种方案的估计结果均与DLR产品更加符合。在单星估计方案中,Swarm B的DCB结果与DCB产品的差距最小,而Swarm A和Swarm C的单星估计卫星端DCB与DCB产品的差值处于同一水平,这是因为Swarm A和Swarm C并行飞行于一个较低的轨道,而Swarm B单独飞行于一个较高的轨道。相较于单星估计方案,联合估计方案得到的GPS卫星端DCB与DCB产品间的较差与方案一中最优结果Swarm B单星估计处于相似水平,两者之差小于0.01 ns。

表1 不同估计方案的GPS卫星DCB与参考DCB产品间的总体月平均差值/ns

Tab.1 Monthly Mean Differences Between GPS Satellite DCBs from Different Estimation Strategies and the Reference Products/ns

方案	总体月平均差值	
	CAS	DLR
Swarm A单星估计	0.479 6	0.455 7
Swarm B单星估计	0.446 6	0.415 3
Swarm C单星估计	0.470 0	0.444 8
Swarm星座联合估计	0.450 1	0.421 7

图3展示了不同方案估计得到的每颗GPS卫星DCB的月标准差。由图3可以看出,大部分卫星DCB的月标准差在0.05~0.1 ns量级。表2给出了不同方案估计得到的GPS卫星DCB以及参考DCB月标准差的平均值。在单星估计方案中,使用Swarm A单星星载数据估计得到的GPS卫星DCB的月标准差均值最小为0.078 3 ns,联合估计得到的GPS卫星DCB的月标准差均值为0.065 3 ns,相较于单星估计方案的最优结果提升了16.6%,且方案二结果稳定性优于CAS、略差于DLR。总体而言,使用Swarm星座联合估计得到的GPS卫星DCB结果优于Swarm单星估计结果。

2.2.2 Swarm卫星接收机端DCB估计精度评估

本文分别使用了两种方案估计了Swarm星座3颗卫星GPS接收机在2016年01-01—01-30期间的接收机端DCB时间序列,结果如图4所示。

从图4可以看出,两种方案获得的3颗卫星GPS接收机DCB值的变化处于相似的趋势,但没有明显的周期性,且月间变化均小于0.5 ns。

Swarm A与Swarm C卫星的GPS接收机DCB变化趋势基本相同,因为Swarm A与Swarm C运行于相同高度的轨道,运行期间受到的温度辐射等变化影响基本相似,因此接收机DCB的变化趋势也趋于相同与实际情况相符。

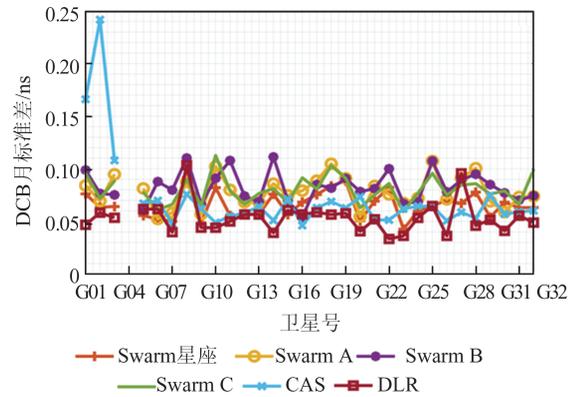


图3 不同估计方案的GPS卫星DCB的月标准差
Fig.3 Monthly STD of GPS Satellite DCBs from Different Estimation Strategies

表2 不同估计方案的GPS卫星DCB月标准差均值/ns
Tab.2 Mean Values of Monthly STD of GPS Satellite DCBs from Different Estimation Strategies/ns

方案	月标准差均值
Swarm A单星估计	0.078 3
Swarm B单星估计	0.082 6
Swarm C单星估计	0.080 2
Swarm星座联合估计	0.065 3
CAS	0.071 2
DLR	0.053 6

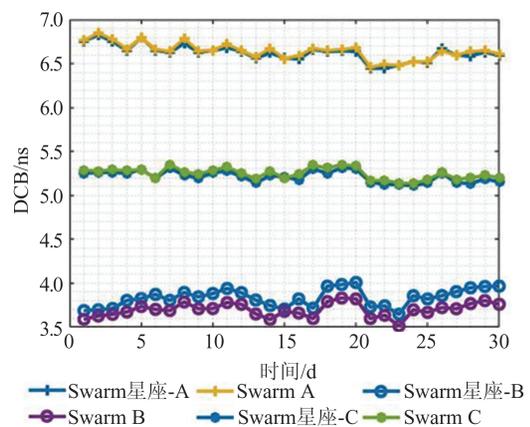


图4 不同方案估计的接收机DCB时间序列
Fig.4 Time Series of Receiver DCBs from Different Estimation Strategies

表3给出了两种方案估计的3颗Swarm卫星GPS接收机DCB的月均值以及标准差。从表3可以看出,使用星座联合估计得到的Swarm A和Swarm C的接收机DCB稳定性与单星估计结果

基本相同,而联合估计得到的 Swarm B 的 DCB 稳定性略差于单星估计结果。

表 3 Swarm 星座估计的接收机 DCB 月均值和标准差/ns

方案	LEO 卫星	月均值	STD
单星估计	Swarm A	6.640 3	0.094 1
	Swarm B	3.696 5	0.078 2
	Swarm C	5.246 4	0.063 0
联合估计	Swarm A	6.623 4	0.093 9
	Swarm B	3.838 7	0.098 1
	Swarm C	5.212 9	0.063 5

3 结 语

本文研究了利用低轨卫星观测数据进行接收机端 DCB 估计的方法,比较分析了单星估计与星座联合估计两种方案。使用 2016 年 1 月的 Swarm 星座星载 GPS 接收机双频观测值对 GPS 卫星以及星载接收机 C1C 与 C2W 频段的 DCB 进行估计,并将估计结果与 DLR、CAS 两个分析中心发布的参考 DCB 进行对比分析,得到如下结果:

1) 基于 Swarm 低轨卫星的 GPS 卫星 DCB 估计结果与参考 DCB 的月平均差约为 0.4 ns,与类似的低轨卫星 DCB 估计结果水平相当。

2) 相对于单星估计方案,联合估计获得的 GPS 卫星 DCB 结果具有更好的稳定性,且与地基参考 DCB 有更好的一致性。

3) 两种方案的 Swarm 星座 GPS 接收机 DCB 估计结果均具有较好的内符合精度,其月标准差均在 0.06~0.1 ns 之间。

通过试验可以看出,使用 LEO 卫星的双频观测值进行 DCB 估计获得的结果及其稳定性与传统地面站联合估计方法获得的结果相差不大,总体而言,星座联合估计方法优于单星估计方法,更适用于低轨卫星的 DCB 估计。

参 考 文 献

- [1] Hartman W A, Heelis R A. Longitudinal Variations in the Equatorial Vertical Drift in the Topside Ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, 112(A3): 1-6.
- [2] Dai Wei, Jiao Wenhai, Jia Xiaolin. Application Research for Compass Navigation Satellite Interfrequency Bias Correction Terms[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2009, 26(5): 367-369. (戴伟,焦文海,贾小林. Compass 导航卫星频间偏差参数使用方法[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(5): 367-369.)
- [3] Wu Xiaoli, Ping Jinsong, Liu Li, et al. Hardware Delay Solution of Regional Satellite Navigation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10): 1218-1221. (吴晓莉,平劲松,刘利,等. 区域卫星导航系统硬件延迟解算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1218-1221.)
- [4] Sanz J, Juan J M, Rovira-Garcia A, et al. GPS Differential Code Biases Determination: Methodology and Analysis[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1549-1561.
- [5] Huang C S, Rich F J, de la Beaujardiere O, et al. Longitudinal and Seasonal Variations of the Equatorial Ionospheric Ion Density and Eastward Drift Velocity in the Dusk Sector[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A2): 1-6.
- [6] Ma Xiaoxue, Dai Xiaolei, Liu Yang, et al. Ultra-Rapid Orbit Determination of GLONASS Satellite After Ambiguity is Fixed[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1932-1940. (马小雪,戴小蕾,刘杨,等. 固定模糊度的 GLONASS 卫星超快速轨道确定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1932-1940.)
- [7] Li X X, Li X, Yuan Y Q, et al. Multi-GNSS Phase Delay Estimation and PPP Ambiguity Resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(6): 579-608.
- [8] Schaer S, Géodésique S H D S N C. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[M]. Zurich: Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, 1999.
- [9] Li Haodong, Zhao Qile, Tao Jun, et al. FCB Estimation and Ambiguity Resolution of BDS-3[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1439-1446. (李浩东,赵齐乐,陶钧,等. 北斗三号卫星 FCB 估计及其模糊度固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1439-1446.)
- [10] Wang Lei, Chen Ruizhi, Li Deren, et al. Quality Assessment of the LEO Navigation Augmentation Signals from LuoJia-1A Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2191-2196. (王磊,陈锐志,李德仁,等. 珞珈一号低轨卫星导航增强系统信号质量评估[J].

- 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2191-2196.)
- [11] Yue X N, Schreiner W S, Hunt D C, et al. Quantitative Evaluation of the Low Earth Orbit Satellite Based Slant Total Electron Content Determination [J]. *Space Weather*, 2011, 9(9): 1-12.
- [12] Lin Jian, Wu Yun, Xiong Jing, et al. Estimation of LEO GPS Receiver Instrument Biases [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(5): 1034. (林剑, 吴云, 熊晶, 等. LEO GPS接收机仪器偏差估计 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(5): 1034.)
- [13] Li W W, Li M, Shi C, et al. GPS and BeiDou Differential Code Bias Estimation Using Fengyun-3C Satellite Onboard GNSS Observations [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1239.
- [14] Li X X, Ma T Z, Xie W L, et al. FY-3D and FY-3C Onboard Observations for Differential Code Biases Estimation [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 57.
- [15] Ji S Y, Chen W, Ding X L, et al. Ambiguity Validation with Combined Ratio Test and Ellipsoidal Integer Aperture Estimator [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(10): 597-604.
- [16] Xu Lei, Chang Guobin, Gao Jingxiang, et al. Estimation of BDS DCB Based on Closure Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 520-529. (徐磊, 常国宾, 高井祥, 等. 附加闭合差约束的BDS频间偏差估计模型 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(4): 520-529.)
- [17] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202.
- [18] Sardón E, Rius A, Zarraoa N. Estimation of the Transmitter and Receiver Differential Biases and the Ionospheric Total Electron Content from Global Positioning System Observations [J]. *Radio Science*, 1994, 29(3): 577-586.
- [19] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps [J]. *Navigation*, 2014, 61(3): 191-201.
- [20] Vandierendonck A. Global Positioning System: Theory and Applications [J]. *American Institute of Aeronautics & Ast*, 1996, 1(8): 329-408.
- [21] Foelsche U, Kirchengast G. A Simple "Geometric" Mapping Function for the Hydrostatic Delay at Radio Frequencies and Assessment of Its Performance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 111-114.
- [22] Lear W. GPS Navigation for Low-Earth Orbiting Vehicles [R]. Houston: NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Mission Planning and Analysis Division, 1987.
- [23] Zhong J H, Lei J H, Dou X K, et al. Assessment of Vertical TEC Mapping Functions for Space-Based GNSS Observations [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 353-362.
- [24] Wautelet G, Loyer S, Mercier F, et al. Computation of GPS P1-P2 Differential Code Biases with JASON-2 [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1619-1631.