

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: Swarm 低轨卫星星座的 GPS 接收机差分码偏差估计
作者: 林高宇, 王磊, 何飞扬, 宋晓迪, 郭际明
收稿日期: 2021-06-30
网络首发日期: 2021-09-15
引用格式: 林高宇, 王磊, 何飞扬, 宋晓迪, 郭际明. Swarm 低轨卫星星座的 GPS 接收机差分码偏差估计. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20210915.0905.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：

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. DOI: 10.13203/j.whugis20200479 (LIN Gaoyu, WANG Lei, HE Feiyang, et al. GPS Receiver Differential code bias estimation with the Swarm LEO constellation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. 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, 对电离层估计具有显著的影响, 因而在利用GNSS观测数据提取电离层总电子含量(total electron content, TEC)时需要被精确修正。DCB可分为卫星端DCB和接收机端DCB两部分, 目前DCB估计主要是利用地基GNSS观测数据。低轨(low earth orbit, LEO)卫星在高空电离层研究中扮演重要角色, 而研究利用LEO星载GNSS观测数据估计DCB也尤为重要。本文使用Swarm星座三颗卫星GPS接收机的双频观测数据对GPS卫星以及LEO卫星GPS接收机的DCB进行估计。本文设计了独立估计和联合估计两种估计方案进行了实验对比。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 **文献标志码:**A

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TEC,这为构建高时空分辨率的顶部电离层模型提供了重要契机^[1]。但利用LEO卫星双频观测值进行计算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估计的影响最大可以达到几十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的估计也被研究者逐渐重视,不同的估计方法不断的被提出。Xinan Yue等人将IGS发布的GPS卫星DCB作为真值,并利用球对称假设将电离层倾斜总电子含量(STEC)转化为垂直总电子含量(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^[11]。林剑等人使用COSMIC和CHAMP的数据,将GPS卫星的DCB作为未知数与LEO接收机DCB进行同时估计,COSMIC的估计精度为0.791ns,CHAMP卫星的估计精度为0.279ns^[12]。李文文等人在使用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DCB的月稳定性在0.1ns附近与地面数据估计得到的DCB产品相近,FY-3C接收机的DCB月稳定性为0.2ns附近。李星星等将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DCB的稳定性同样优于FY-3C^[13]。

Swarm星座是欧洲空间局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。该星座包括三颗相同的小卫星,每颗卫星都搭载相同类型的双频GPS接收机,可以同时接收最多八颗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(460km)且经度差约为1.4°(即距离约150km),而Swarm B单独飞行于530km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^[14]。本文利用欧空局公开的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星座中的三颗卫星进行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^[15]

$$\begin{aligned} P_r^s &= R_r^s + c(dt_r - dt^s) + \frac{40.28}{f_i^2} \cdot STEC + c(d_{r,i} + d_i^s) + \Delta_r^s \\ L_r^s &= R_r^s + c(dt_r - dt^s) - \frac{40.28}{f_i^2} \cdot STEC + B_r^s + \Delta_r^s \end{aligned} \quad (1)$$

其中 r 、 s 和 i 分别表示星载GNSS接收机、GNSS卫星和信号频率; P 、 L 表示以米为单位的伪距和载波观测值; R 表示实际的几何距离; c 是真空中光速; 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; $STEC$ 是沿卫星和接收机视线方向上的总电子含量; $d_{r,i}$ 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_r^s 表示其他与频率无关的观测误差,比如相对论误差和天线中心偏等。 B_r^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300km,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,因此在数据处理前需要先按照一定的高度截止角对数据进行截取,然后对剩余的数据用TurboEdit方法进行粗差消除和周跳改正^[16]。然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,得到结果如下^[17]:

$$\begin{aligned} P_{Gr}^s &= P_{r_1}^s - P_{r_2}^s = \alpha \cdot STEC + DCB_r + DCB^s \\ L_{Gr}^s &= L_{r_1}^s - L_{r_2}^s = -\alpha \cdot STEC + B_{r_2}^s \end{aligned} \quad (2)$$

无几何距离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。其中 $\alpha = 40.28 \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$,

DCB_r 是接收机 r 的差分码偏差, DCB^s 是GPS卫星 s 对应的差分码偏差,单位m。

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平均模糊度可以描述为:

$$\overline{B_{n,2}^s} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (L_{G_r}^s + P_{G_r}^s) - DCB_r - DCB^s \quad (3)$$

其中 k 表示沿观测弧段的第 k 个历元; n 表示弧段内历元总数。将弧段平均模糊度从载波观测值中减去, 可以得到载波相位平滑伪距结果^[18]:

$$L_{sm} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (L_{G_r}^s + P_{G_r}^s) - L_{G_r}^s = \alpha \cdot STEC + cDCB_r + cDCB^s \quad (4)$$

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, 有三种常用的投影函数, 包括薄层模型(Thin Layer Model, TLM)^[15]、F&K^[19]和Lear投影函数^[20]

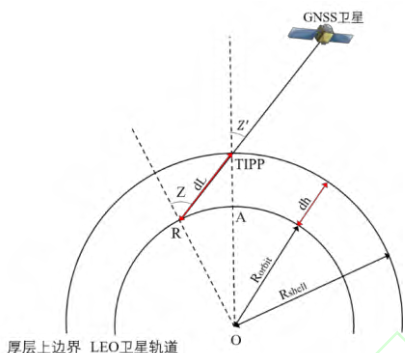


图1 F&K投影函数原理示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of F&K Mapping Function

Zhong等人^[21]对三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^[19]将STEC转化为VTEC:

$$STEC = F \cdot Kmf \cdot VTEC$$

$$= \frac{1 + (h_{shell} + R_e) / (H_{LEO} + R_e)}{\cos z + \sqrt{(h_{shell} + R_e)^2 / (H_{LEO} + R_e)^2 - \sin^2 z}} \cdot VTEC \quad (5)$$

其中, R_e 是地球半径, h_{shell} 为电离层有效高度 (ionosphere effective height, IEH); H_{LEO} 为低轨道卫星的轨道高度; z 是天顶角。Zhong等人^[21]评估了F&K映射函数在不同IEHs的性能, 发现基于F10.7的质心方法更适用于星载DCB和VTEC估算。质心法可以表示为:

$$h_{shell} = (0.0027 \cdot F_{10.7} + 1.79) \cdot H_{LEO} - 5.52 \cdot F_{10.7} + 1350 \quad (6)$$

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, 因此每一个历元不同LEO卫星对不同GPS卫星观测得到的公式(4)进行堆叠可以得到以VTEC, DCB_r 和 DCB^s 作为代求参数的观测方程组矩阵:

$$\begin{bmatrix} L_1^s \\ L_2^s \\ \vdots \\ L_m^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cdot mf_1^1 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \alpha \cdot mf_1^2 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \alpha \cdot mf_n^m & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} VTEC_1 \\ \vdots \\ VTEC_n \\ DCB^1 \\ \vdots \\ DCB^m \\ DCB_r \\ \vdots \\ DCB_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 m 指观测到的GPS卫星数量, n 为LEO接收机的数量, 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:

$$Y = BX + \varepsilon$$

$$X = [VTEC^T, DCB_s^T, DCB_r^T]^T \quad (8)$$

其中 Y 为由星座 n 颗LEO卫星当天观测 t 个历元得到所有 L_{sm} 组成的 $(m \times n \times t) \times 1$ 大小的矩阵, \hat{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 是从公式(4)导出的 $(m \times n \times t) \times (n \times t + m + n)$ 大小的设计矩阵。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]:

$$\sum_{s=1}^{N_{GPS}} DCB_s = 0 \quad (9)$$

由于接收机得到的数据质量与卫星高度角相关, 因此按照公式(10)对每个观测方程进行权值设定。

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

其中 P 是观测权值, e 是对应的卫星高度角, σ_0 和 σ_i 分别为先验方差和电离层观测方差。附加公式(9)后通过最小二乘求解观测值的线性方程组(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

本文利用欧洲空间局 (ESA) 提供的Swarm星座三颗卫星的GPS接收机原始双频载波观测值L1C/L2W和伪距观测值C1C/C2W以及精密轨道产品用于估计GPS卫星以及Swarm星座GPS接收机的C1C-C2W DCB, 其中观测数据的采样间隔为1s。本文选择2016年1月1日到1月30日时段的数据进行分析, 在该时段内Swarm星座三颗卫星均具有完整的全天观测值。

本文以天为单位对GPS卫星以及三颗Swarm卫星

的DCB进行估计。首先对原始观测值按照一定的高度截止角 σ 进行截取，本文设定 $\sigma=15^\circ$ ，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公式(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。

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2(a)由于第8天未观测到G27号卫星导致估计得到的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]。

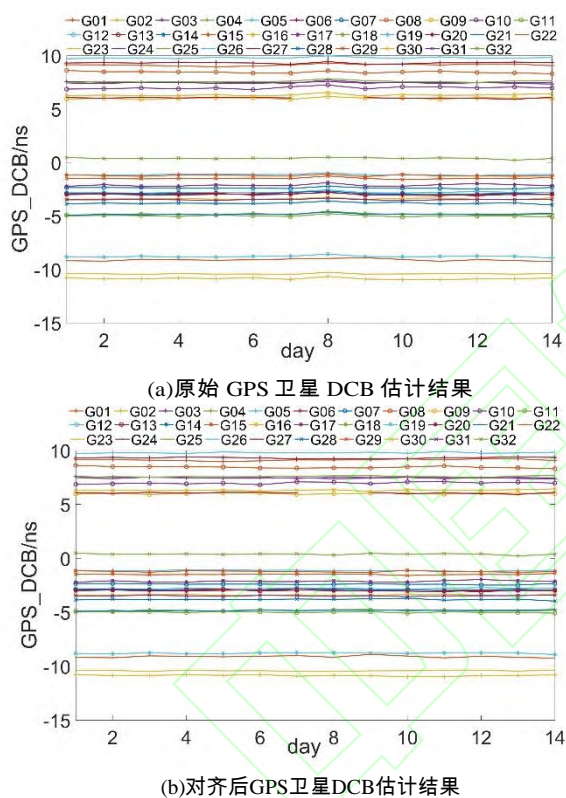


图2 DCB估计结果对齐比较

Fig. 2 DCB Estimates Result Alignment Comparison

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：① Swarm星座三颗卫星独立进行估计DCB；②使用Swarm星座整体联合估计，同时估计GPS与三颗Swarm卫星的DCB。

本文以德国宇航中心(DLR)和中国科学院测量与地球物理研究所(CAS)发布的GPS卫星DCB做为参考，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产品在很多研究中都被作为参考^[22-24]。本文从两方面评价DCB估计结果的质量：①通过计算每颗GPS卫星DCB估计值与DLR和CAS发

布的DCB之间的月平均差值 V_i 和所有卫星总的月平均差值 \bar{V} 来评估计算的外部精度；

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n DCB_{i,j} - DCB_{i,j}}{n}, \bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^{32} |V_i|}{32} \quad (11)$$

②通过计算GPS和接收机DCB的标准差(STD)评估其稳定性。

$$STD_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (DCB_{i,j} - \overline{DCB}_i)^2}{n}} \quad (12)$$

处理时段内的DLR, CAS产品的月标准差通过计算得到分别为0.0536ns和0.0712ns,均小于0.1ns, DLR和CAS之间较差的RMS计算得到为0.1156ns,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3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。从图中可以看出两个估计方案得到的GPS卫星DCB与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1ns的情况与FY-3C的星载估计结果^[23]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]。

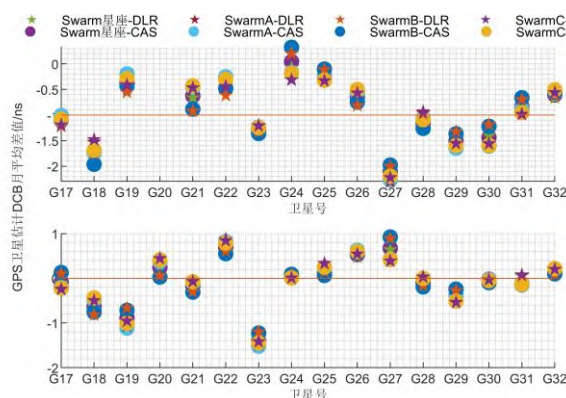


图3 使用Swarm数据估计的卫星端DCB与参考DCB产品的月平均差值

Fig. 3 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产品间的差距均在0.4-0.5ns之间，总体上两种方案的估计结果均与DLR产品更加的符合。在单星估计方案中，SwarmB的DCB结果与DCB产品的差距最小，而SwarmA和SwarmC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SwarmA和SwarmC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SwarmB单星估计处于相似水平，两者之差小于0.01ns。

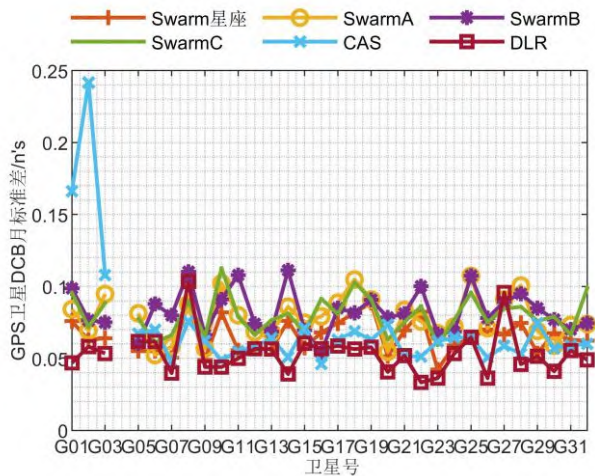


图 4 不同DCB估计方案得到的GPS卫星DCB的月标准差
Fig. 4 Monthly STDs of GPS Satellite DCBs from Different DCB Estimation Strategy.

表 1 不同DCB估计方案获得GPS卫星DCB与参考值的较差绝对值
Tab. 1 Absolute Value of the Mean Differences Between Estimated DCB and the Reference Products

方法	与参考较差绝对值的月平均值 (ns)	
	CAS	DLR
Swarm-A	0.4796	0.4557
Swarm-B	0.4466	0.4153
Swarm-C	0.4700	0.4448
Swarm星座	0.4501	0.4217

表 2 不同估计方案的GPS卫星DCB月标准差均值比较
Tab. 2 Comparison of the Mean Values of STD for the GPS Satellite DCBs from Different Estimation Strategy

方法	月标准差均值(ns)
Swarm-A	0.0783
Swarm-B	0.0826
Swarm-C	0.0802
Swarm星座	0.0653
CAS	0.0712
DLR	0.0536

图 4展示了不同方案估计得到的每颗GPS卫星DCB的月标准差，可以看出大部分卫星DCB的月标准差在0.05-0.1ns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SwarmA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0.078ns，联合估计估计得到的GPS卫星DCB的月标准差均值为0.0653ns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星座三颗卫星GPS接收机在2016年1月1日至1月30时段内的接收机端DCB时间序列，其结果如图 5所示。

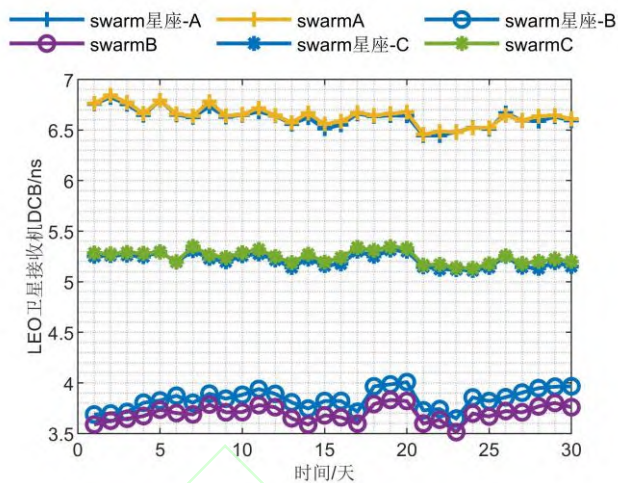


图 5 不同方案估计的接收机DCB时间序列
Fig. 5 Time Series of Receiver DCB Estimated with Different Strategies

从图 5中可以看出两种方案获得的三颗卫星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0.5ns。从图中可以看出SwarmA与SwarmC卫星的GPS接收机DCB变化趋势基本相同，因为SwarmA与SwarmC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。表3给出了两种方案估计的三颗Swarm卫星GPS接收机DCB的月均值以及标准差，可以看出使用星座联合估计得到的SwarmA和SwarmC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SwarmB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的月均值以及标准差
Tab. 3 Monthly Mean and STD Value of the Receiver DCBs Estimated from the Swarm Constellation

方法	LEO卫星	均值(ns)	标准差(ns)
单星估计方案	Swarm-A	6.6403	0.0941
	Swarm-B	3.6965	0.0782
	Swarm-C	5.2464	0.0630
联合估计方案	Swarm-A	6.6234	0.0939
	Swarm-B	3.8387	0.0981
	Swarm-C	5.2129	0.0635

3. 结论

本文研究了利用低轨卫星观测数据进行接收机端差分码偏差 (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。本文使用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的C1C-C2W DCB进行估计。并将估计结果与两个分析中心DLR、CAS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估计结果与地基参考DCB的月平均差距约为0.4ns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0.06-0.1ns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,更适合于低轨卫星的DCB估计。

参考文献

- [1]Hartman W, Heelis R.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 (05): 367-369+374.)
- [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, et al.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]Ruan Rengui, Feng Laiping, JIA Xiaolin. Equipment Delay Estimation for GNSS Satellite Combined Orbit Determination with Satellite-ground Link and Inter-Satellite Link Observations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014,43(2):137-142,157 (阮仁桂,冯来平,贾小林.导航卫星星地/星间链路联合定轨中设备时延估计方法[J].测绘学报,2014 (02): 137-142+157.)
- [7]Li X, Li X, Yuan Y, 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, Gódsique S H D S N C. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System[M]. 59. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich,1999.
- [9]Zhang Hui, HAO Jinming, LIU Weiping, et al. Influence of Satellite Differential Code Bias on Precise Point Positioning Based on Raw Observation [J/OL] . Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 0(0):1-9 (张辉, 郝金明, 刘伟平, et al.卫星差分码偏差对非组合精密单点定位的影响分析[J].武汉大学学报(信息科学版): 2019, 0(0):1-9.)
- [10]Wang Lei, Chen Rui-zhi, LI Del-ren, 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, et al.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, 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): n/a-n/a.
- [12]Lin Jian, WU Yun, Xiong Jing, et al. Estimation of LEO GPS receiver instrument biases[J].Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2010, 53 (05): 1034+1037-1038. (林剑, 吴云, 熊晶, et al.LEO GPS接收机仪器偏差估计[J].地球物理学报,2010, 53 (05): 1034+1037-1038.)
- [13]Li X, Ma T, Xie W, et al.FY-3D and FY-3C onboard observations for differential code biases estimation[J].GPS Solutions,2019, 23 (2):57-61
- [14]Ji S, Chen W, Ding X, et al.Ambiguity validation with combined ratio test and ellipsoidal integer aperture estimator[J].Journal of Geodesy,2010, 84 (10): 597-604.
- [15]Vandierendonck A.Global Positioning System: Theory & Applications (Volume One)(Progress in Astronautics and Aeronautics)[J].AIAA (American Institute of Aeronautics & Ast, 1996, 1 (8): 329-408
- [16]Blewitt G.An automatic editing algorithm for GPS data[J].Geophysical Research Letters,1990, 17 (3): 199-202.
- [17]Sardán 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.
- [18]Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi - GNSS observations and global ionosphere maps[J].Navigation: Journal of the Institute of Navigation,2014, 61 (3): 191-201.
- [19]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): 111-1-111-4.
- [20]Lear W.GPS navigation for low-earth orbiting vehicles[J].NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Mission planning and analysis division, 1st revision, NASA,1987.
- [21]Zhong J, Lei J, Dou X, et al.Assessment of vertical TEC mapping functions for space-based GNSS observations[J].GPS solutions,2016, 20 (3): 353-362.
- [22]Li 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.
- [23]Li X, Ma T, Xie W, et al.FY-3D and FY-3C onboard observations for differential code biases estimation[J].GPS Solutions,2019, 23 (2): 57.
- [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.

GPS receiver differential code bias estimation with the Swarm LEO constellation

LIN Gaoyu¹ WANG Lei^{2*} HE Feiyang¹ SONG Xiaodi¹ GUO Jiming¹

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

Abstract: The differential code biases 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). So far, the estimation of GPS satellite DCB is mainly based on the ground-based GPS observation data. With the increasing number of low-orbit satellites, DCB estimation of LEO receivers becomes particularly important for the topside ionosphere research. In this study, onboard observations of GPS satellites by the Swarm constellation are applied to estimate GPS DCBs and receiver DCBs. Since there are three satellites in the constellation, two different estimation schemes are designed, individually estimation and combined estimation respectively. 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 it's satellite DCB presents better consistency with the reference DCB provided by the two analysis centers.

Key words: LEO; Different code biases estimation; Swarm satellites; Parameter estimation; GPS

First author : LIN Gaoyu, Master, specializes in geodetic data processing. E - mail: 2016301610103@whu.edu.cn

Corresponding author: WANG Lei, PhD, Associate Research Fellow, E - mail: lei.wang@whu.edu.cn

Funding: Natural Science Foundation of China (41704002, 42074036) the Fundamental Research Funds for the Central Universities

