

Research
Geodesy and Survey Engineering—Article

基于2013年、2015年和2017年星载BDS/GPS观测数据的FY-3C卫星精密轨道确定

李星星^{a,b,*}, 张柯柯^a, 孟祥广^{c,d,*}, 张伟^a, 张倩^a, 张小红^a, 李昕^a

^a School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

^b German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam 14473, Germany

^c National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

^d Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 July 2018

Revised 13 November 2018

Accepted 25 March 2019

Available online 5 September 2019

关键词

风云-3C

低轨卫星精密定轨

星载BDS/GPS

BDS码偏差

BDS/GPS双系统定轨

摘要

本文基于2013—2017年FY-3C卫星星载BDS和GPS观测数据,研究了星载BDS的定轨性能及其对低轨卫星精密定轨的贡献。结果显示,改正BDS卫星码偏差可以提高低轨卫星定轨精度,提升幅度可达12.4%。2013年、2015年和2017年的FY-3C卫星单GPS定轨的重叠轨道差异平均一维均方根(1D RMS)分别为2.0 cm、1.7 cm和1.5 cm。由于BDS二代区域系统和FY-3C较少的BDS跟踪通道, FY-3C卫星单BDS定轨的精度要远差于单GPS定轨,其2013年、2015年和2017年重叠轨道1D RMS分别为150.9 cm、115.0 cm和47.4 cm。对于BDS+GPS(GC)双系统定轨, FY-3C卫星在2013年、2015年和2017年的重叠轨道精度分别为2.5 cm、2.3 cm和1.6 cm。当不采用BDS GEO卫星观测值后, GC双系统定轨精度得到了显著提高,这是因为GEO卫星本身卫星跟踪条件较差且其轨道钟差产品精度不高。得益于近年来IGS精密轨道钟差产品精度的不断提高,特别是2015年高采样率(30 s采样间隔)卫星钟差产品的发布, FY-3C卫星的单BDS和GC双系统定轨精度从2013年开始逐步提高。此外,在不考虑BDS GEO观测值的条件下, GC双系统定轨结果在2017年要略优于单GPS定轨,这一结果说明BDS和GPS双系统融合能够提高低轨卫星的定轨精度。同时,由于系统冗余, GC双系统能够显著提高低轨卫星定轨的可靠性。随着未来更多BDS卫星发射升空以及BDS卫星产品精度的不断提高, BDS卫星将会为低轨卫星精密定轨做出更大的贡献。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在过去的20年里,低轨卫星(LEO)被广泛地应用于海洋学、固体地球物理学和海平面研究等一系列对地观测任务,这些任务通常需要厘米级的低轨卫星轨道。伴随着星载GPS精密定轨(POD)在TOPEX/POSEIDON卫星上的成功应用[1],基于星载GPS的高精度精密定轨成为可能,目前已被广泛地应用于众多低轨任

务。已有研究表明,仅利用星载GPS观测数据,对地观测卫星(如GRACE、GOCE和Swarm)能够实现厘米级的定轨精度[2–4]。

北斗卫星导航系统(BDS)是我国自主研发和运行的卫星导航系统。截至2012年年底, BDS已具备提供区域服务的能力。当前,共有34颗BDS卫星在轨运行,包括15颗BDS-2卫星[6颗地球同步轨道卫星(GEO)、6颗倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)和3颗中轨道卫星

* Corresponding author.

E-mail address: xxli@sgg.whu.edu.cn (X. Li), xgmeng@nssc.ac.cn (X. Meng).

(MEO)]和19颗BDS-3卫星(两颗IGSO和17颗MEO)。国内外学者针对BDS-2系统进行了大量的研究,主要涵盖BDS卫星精密轨道确定[5]、精密单点定位[6,7]和GNSS气象学[8-10]等方面。

我国新一代的气象卫星——风云三号C星(FY-3C)由国家卫星气象中心于2013年发射升空,该任务主要是为了满足我国对于地球大气监测、天气预报以及气候预测的需求。FY-3C卫星上搭载了能够同时跟踪BDS和GPS卫星的GNSS掩星探测仪(GNOS)。这为研究星载BDS定轨性能及其贡献提供了一个很好的机会。目前已有部分学者对FY-3C卫星精密定轨进行了初步研究。基于一个月的FY-3C星载数据,Li等[11]对FY-3C卫星进行了BDS单系统定轨和GC双系统定轨实验。重叠轨道比较结果显示,BDS单系统3D定轨精度为32.67 cm,而GC双系统定轨的3D精度为3.86 cm,要差于GPS单系统定轨精度。但是,当不考虑GEO观测值时,GC双系统能够达到与GPS单系统定轨相当的精度。Xiong等[12]利用FY-3C星载BDS和GPS伪距观测值,实现了1.24 m的实时定轨精度。Zhao等[13]利用估计得到的FY-3C轨道和区域测站观测值对BDS轨道进行了增强,使得BDS GEO、IGSO和MEO卫星定轨精度分别从354.3 cm、22.7 cm和20.9 cm提升至63.1 cm、20.0 cm和16.7 cm。

本文主要研究了星载BDS定轨性能及其对低轨卫星精密轨道确定的贡献。设计了多种策略对FY-3C精密定轨进行了详细的分析与评估,包括BDS卫星码偏差对POD的影响、基于不同BDS卫星轨道钟差产品的FY-3C定轨、BDS单系统定轨以及GC双系统定轨。此外,本文还对FY-3C卫星长时间跨度的定轨性能进行了研究。

2. FY-3C 卫星平台和数据采集

FY-3C是我国风云三号系列第一颗正式运行的卫星。其轨道高度为836 km,轨道倾角为 98.75° ,卫星在轨总重量为2405.7 kg [11]。为了满足掩星观测和精密定轨的需求,FY-3C卫星上搭载了由中国科学院空间科学与应用研究中心设计和研制的GNOS接收机。GNOS接收机采用了三组天线:定位天线(PA)、上升掩星天线和下降掩星天线[14]。GNOS接收机的定位天线分配有4个BDS和8个GPS跟踪通道。但是定位天线可以利用闲置的掩星天线通道,因此GNOS可以通过PA同时观测到多达6颗BDS卫星和8颗以上的GPS卫星[11]。本文利用了定位天线采集的GNSS数据进行FY-3C卫星的精密轨道确定。

本文代表性地选取了2013年年积日(DOY)316~365、2015年DOY 96~145和2017年DOY 61~110的FY-3C卫星1 s采样间隔的BDS和GPS观测数据。可用数据包括BDS卫星C2I、C7I码观测值和L2I、L7I相位观测值,GPS卫星C1C、C2P码观测值和L1C、L2P相位观测值。

为了评估FY-3C卫星星载GNSS观测数据的可用性,本文首先对不同年份的BDS和GPS观测值数量进行了统计。图1(a)显示了不同年份FY-3C卫星的GPS和BDS观测值的日平均观测数。可以看出,对于GPS卫星,其C1C码观测值和L1C相位观测值在数量上与C2P码和L2P相位观测值几乎相当。尽管从2015年到2017年GPS观测数据数量没有出现明显下降,但是2013年的观测值数量要略小于2015年和2017年。对于BDS卫星,C2I

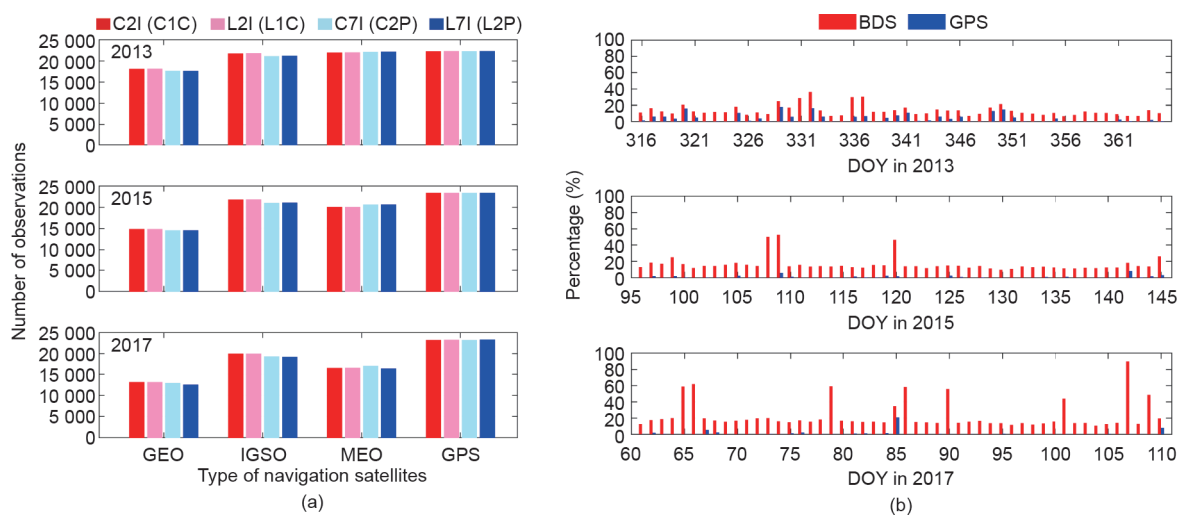


图1. (a) GPS和BDS卫星不同观测值的日平均观测数; (b) 星载GPS和BDS数据的日损失率。

和L2I观测值要稍多于C7I和L7I。与GPS卫星不同,从2013年到2017年,BDS观测值数量出现了明显的下降。

在此基础上,本文计算了每天BDS和GPS观测数据的损失率,结果显示于图1(b)。此处损失率定义为每天跟踪卫星数为零的历元数量与总历元数的比率。对于2013年的大部分天,GPS数据的损失率小于8%,而在2015年和2017年GPS数据损失率接近为零(除2017年DOY 85之外)。与之相反,在大部分天中,BDS数据的损失率大于10%。对于一些天,如2015年DOY 109和120以及2017年DOY 65和66,BDS数据的损失率甚至超过了50%,较高的BDS数据损失将对FY-3C单BDS定轨产生严重影响。同时能够看到,BDS数据丢失从2013年到2017年逐步增加,使得BDS观测值数量逐渐减少。但目前这一现象的具体原因仍不清楚,需要进一步研究。我们推测BDS数据损失率的增加与星载GNOS接收机硬件老化有关。

3. 精密定轨方法与策略

本文设计了四种简化动力学定轨策略,包括单BDS、单GPS、GC双系统(考虑GEO)以及GC双系统(不考虑GEO)。表1列出了FY-3C定轨过程中所采用的GPS和BDS精密产品。需要指出的是,2013年没有分析中心提供同时包含GPS和BDS卫星的MGEX轨道和钟差产品,因此我们在2013年采用的是由国际GNSS服务组织(IGS)产品和武汉大学(WHU)产品组合而成的混合精密轨道钟差产品。值得注意的是,IGS和WHU轨道产品采样间隔在2013年存在一定差异(IGS: 15 min, WHU: 5 min)。为此,我们仅简单地将相同历元的GPS和BDS轨道和钟差混合在一起。也就是说,混合轨道和钟差产品的采样间隔分别为15 min和5 min。此外,还需要注意的是,德国地学研究中心(GFZ)的轨道钟差产品的采样间隔自2015年DOY 123发生了改变。

表2提供了FY-3C卫星精密定轨的详细策略。本文选取了30 h的定轨弧长,相邻弧段存在6 h的重叠部分,即每个定轨弧长从前一天的21:00开始至下一天的3:00

结束。选用了IGS [15]、WHU [16]和GFZ [17]提供的最终轨道和钟差产品。GPS天线相位中心偏差(PCO)和天线相位中心变化(PCV)采用IGS模型igs08.atx [18]和igs14.atx [19]进行改正。对于BDS卫星,2013年采用MGEX推荐的PCO值,并且忽略PCV。而对于2015年和2017年,则采用欧洲空间局(ESA)提供的PCO和PCV改正值[20]。我们采用了与Li等[11]相同的PCO值对FY-3C天线相位中心偏差进行改正,并忽略了其接收机PCV。在定轨的过程中,本文对GPS、BDS IGSO和MEO卫星观测值采用了等权策略,并将GEO卫星观测值权重设为IGSO和MEO的2/5以减少GEO轨道产品的负面影响。

对于低轨卫星,其主要的非保守力包括大气阻力、太阳光压和地球反照压。这些力均与卫星的几何形状相关。由于缺少FY-3C卫星详细的几何信息,本文利用简化的几何模型和Box-wing模型对FY-3C所受太阳光压进行了建模。利用相同的卫星几何信息和大气密度模型DTM94 [21]计算了大气阻力,并同时大气阻力尺度参数作为分段常数参数进行估计,以部分吸收简化的几何模型和大气密度模型所带来的误差。本文在FY-3C定轨中未考虑地球反照辐射。

4. 结果分析

4.1. BDS 卫星码偏差的影响

与其他GNSS系统不同,BDS二代卫星存在系统性的卫星码偏差[22]。利用星载BDS观测数据,可以对BDS GEO卫星的卫星码偏差进行建模和改正。本文基于星载BDS数据的多路径组合观测值,对每颗BDS卫星的双频码偏差模型进行了估计,该模型由与高度角相关的分段线性参数组成。图2显示了估计出的分段线性模型。从图中可以看出,BDS卫星码偏差在低高度角时接近于零。当高度角大于 40° 时,码偏差随着高度角的增加逐渐减小到最小值。此外,C7I的码偏差要明显小于C2I。GEO卫星的C2I码偏差能够达到0.5 m,而C7I码偏差虽然相对较小,但仍大于0.2 m。这一结果说明

表1 FY-3C精密定轨所采用的精密轨道钟差产品

年份	机构	轨道产品采样间隔	钟差产品采样间隔
2013	MIX(IGS+WHU)	15 min	5 min
2015	GFZ	15 min/5 min	5 min/30 s
2017	GFZ	5 min	30 s

表2 FY-3C精密定轨策略

模型	描述
观测模型	
观测值	非差无电离层组合观测值
采样间隔	10 s
定轨弧长	30 h
截止高度角	1°
GPS PCO & PCV	2013年和2015年: igs08.atx, 2017年: igs14.atx
BDS PCO & PCV	2013年: MGEX PCO推荐值, 忽略PCV 2015年和2017年: ESA估计PCO和PCV模型
GNOS PCO	改正
GNOS PCV	未考虑
卫星姿态	名义姿态
定权策略	GPS:IGSO:MEO:GEO = 5:5:5:2
摄动力模型	
地球重力场	EIGEN6C (120×120)
N体引力	JPL DE405
海潮	FES 2004
相对论效应	IERS 2003
固体潮&极潮	IERS 2003
太阳光压	Box-wing
大气密度模型	DTM94
经验力模型	周期性经验力模型
待估参数	
FY-3C初始状态	初始历元位置和速度 X, Y, Z, V_x, V_y, V_z
大气阻力	每6 h估计一个大气阻力尺度参数
经验加速度	切向、法向和径向上估计分段周期项
接收机钟差	每个历元估计
模糊度参数	每个弧段估计一个
系统间偏差	仅双系统估计
估计器	
最小二乘	序贯最小二乘

在BDS精密应用中必须要考虑BDS GEO卫星的码偏差。BDS GEO卫星C7I码偏差与IGSO对应的码偏差类似, 这一结果与Zhao等的结果一致。相比于GEO和IGSO卫星, MEO卫星的码偏差量级最大, C2I码偏差可以超过1 m, C7I码偏差可达0.5 m。

为了评估BDS卫星码偏差对LEO卫星精密定轨的影响, 我们选用了FY-3C卫星2017年DOY 80~94的双频BDS和GPS数据进行GC双系统定轨实验。利用此前估计得到与高度角相关的分段线性模型对BDS卫星码偏差进行改正, 考虑改正BDS卫星码偏差和不改正码偏差两种情况。图3给出了两种情况的重叠轨道比较精度。其中, 重叠轨道偏差的一维均方根(1D RMS)为切向、法向和径向三个方向上RMS值的均方根。可以看出, 改正BDS码偏差后, FY-3C卫星的重叠轨道RMS

显著减小, 其在切向、法向和径向上分别减小了10.4%、29.0%和14.9%。这一结果说明, 在LEO卫星精密定轨过程中, 需要对BDS码偏差进行改正。

4.2. 重叠轨道比较

由于FY-3C卫星上未搭载激光反射棱镜, 本文选用了重叠轨道比较的方法对定轨精度进行评估。为了避免边界效应的影响, 本文仅考虑了中间5 h的重叠部分。

图4展示了FY-3C卫星单BDS定轨的重叠轨道RMS。结果显示, 切向方向的重叠轨道RMS最大, 法向RMS最小。2013年、2015年和2017年FY-3C卫星在切向、法向和径向上的平均RMS分别为204.1 cm、91.9 cm和151.2 cm, 142.5 cm、65.7 cm和122.6 cm, 58.2 cm、34.6 cm和46.5 cm。可以看出, 单BDS定轨仅能实现几

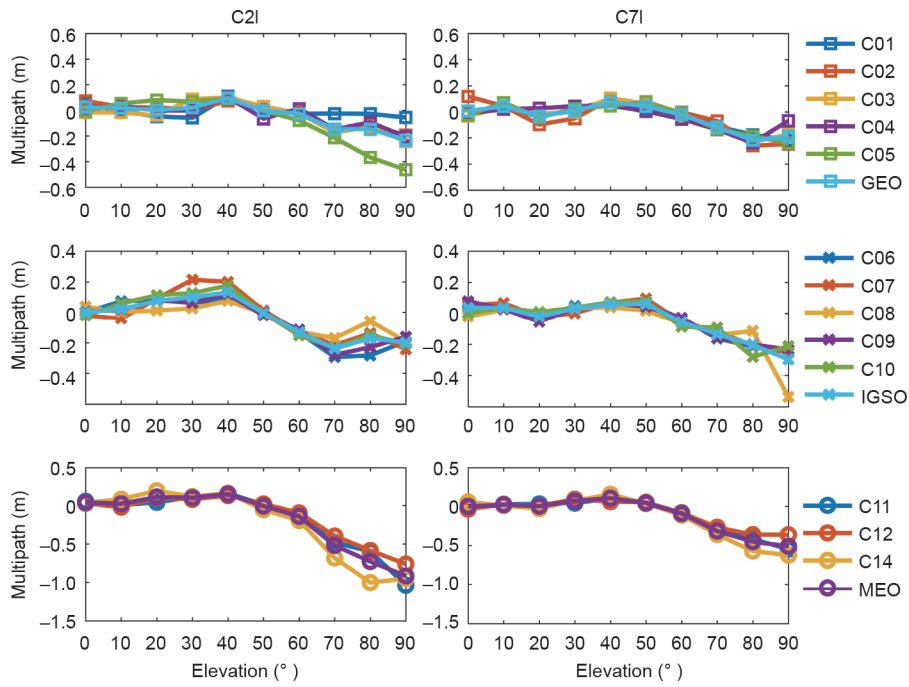


图2. 基于FY-3C星载数据估计的BDS GEO、IGSO和MEO卫星分段线性码偏差改正模型。

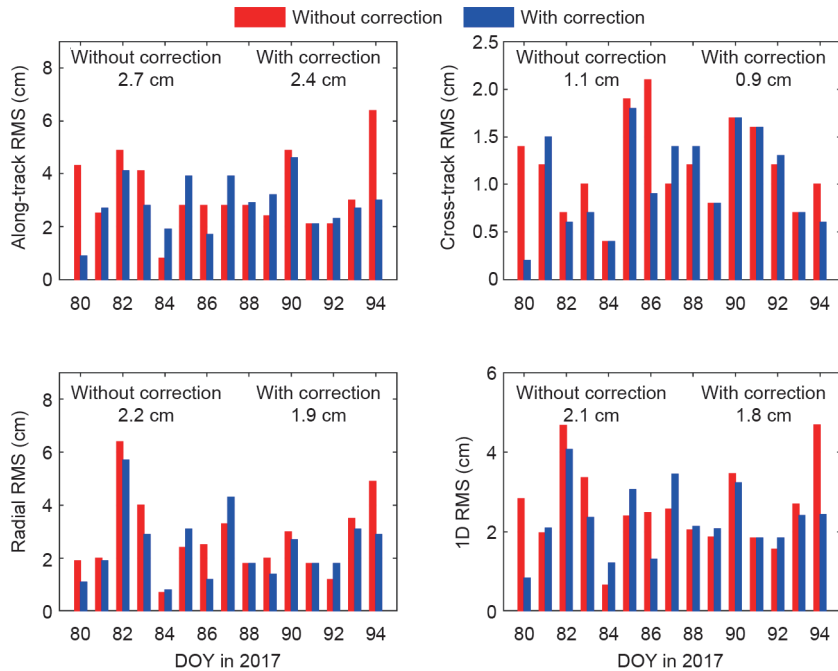


图3. 改正和不改正BDS卫星码偏差定轨方案的重叠轨道比较RMS。

分米的定轨精度，这主要是因为BDS-2仍是区域系统，同时FY-3C分配给BDS卫星的跟踪通道较少。此外，从图中还可以看出，从2013年至2017年BDS单系统定轨的重叠轨道精度在逐渐提高。这主要是得益于BDS精密轨道钟差产品精度的不断提高，特别是高采样率钟差产品的发布（从5 min提高至30 s）。高采样钟差产品能够显著减少钟差产品数值插值过程中的精度损失，进而提

高低轨卫星的定轨精度。表3列出了BDS单系统定轨相应的统计值。

图5显示了2013年、2015年和2017年FY-3C卫星GC（考虑GEO）定轨和GC（不考虑GEO）定轨方案的重叠轨道比较1D RMS时间序列。作为比较，单GPS定轨结果也显示在图中。表3给出了相应的统计值。对于单GPS定轨，FY-3C卫星在2013年、2015年和2017年的

重叠轨道差异的平均1D RMS分别为2.0 cm、1.7 cm和1.5 cm。这一精度与GRACE卫星定轨精度相当[2]。GC双系统定轨的平均1D RMS要大于单GPS定轨结果。双系统定轨方案精度下降的主要原因是相比于GPS, BDS轨道和钟差产品精度相对较低。与GC(考虑GEO)方案相比,在排除GEO观测值之后,GC(不考虑GEO)方案的定轨精度得到了明显的提升。2013年、2015年和2017年GC(不考虑GEO)定轨方案的重叠轨道平均1D RMS分别为2.0 cm、1.8 cm和1.3 cm。值得注意的是,2017年,GC(不考虑GEO)定轨方案的精度最高,甚至优于单GPS定轨结果。这一结果说明,在高质量BDS轨道钟差产品可用的条件下,GC双系统融合能够提高低轨卫星的定轨精度。此外,能够看到从2013年至2017年GC双系统定轨精度逐年提高,这一现象与单BDS定

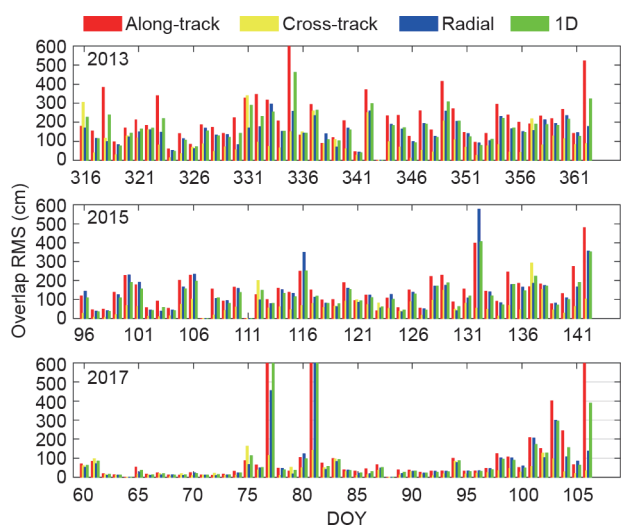


图4. FY-3C单BDS定轨重叠轨道比较RMS。

轨结果类似,主要是得益于BDS精密轨道钟差产品精度的不断提高,特别是钟差产品采样率的提高。

图6为2017年单GPS、GC(考虑GEO)和GC(不考虑GEO)定轨方案在切向、法向和径向三个方向上的重叠轨道比较结果。结果显示,相邻弧段切向方向上的重叠轨道差异最大,而法向差异最小。当不考虑BDS GEO卫星时,FY-3C卫星GC双系统定轨在切向和径向上的精度相比于单GPS定轨结果稍有提高。图7代表性地给出了2017年DOY 91 FY-3C卫星定轨可用卫星数量的时间序列。可以看出,GC双系统融合显著提升了FY-3C卫星定轨的可用观测值数量。在部分历元,可用卫星数量高达15颗(其中包括6颗BDS卫星)。这一结果表明GC双系统组合定轨不仅能在一定程度上提高低

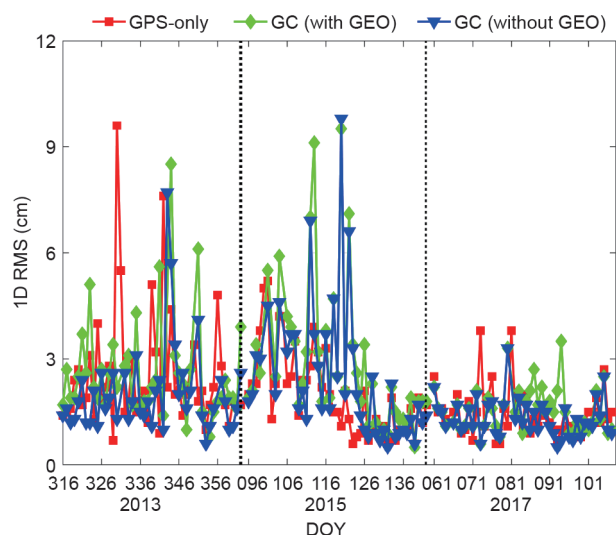


图5. FY-3C卫星单GPS、GC(考虑GEO)和GC(不考虑GEO)定轨重叠轨道比较1D RMS。

表3 单BDS、单GPS、GC(考虑GEO)和GC(不考虑GEO)四种定轨方案的重叠轨道比较平均RMS

方案	年份	切向 (cm)	法向 (cm)	径向 (cm)	1D (cm)
单BDS	2013	204.1	91.9	151.2	150.9
	2015	142.5	65.7	122.6	115.0
	2017	58.2	34.6	46.5	47.4
单GPS	2013	2.4	1.0	2.2	2.0
	2015	2.2	0.8	1.7	1.7
	2017	1.7	0.7	1.6	1.5
GC(考虑GEO)	2013	3.1	1.3	2.7	2.5
	2015	3.0	1.0	2.3	2.3
	2017	1.8	0.8	1.7	1.6
GC(不考虑GEO)	2013	2.5	1.1	2.1	2.0
	2015	2.5	0.8	1.9	1.8
	2017	1.6	0.7	1.5	1.3

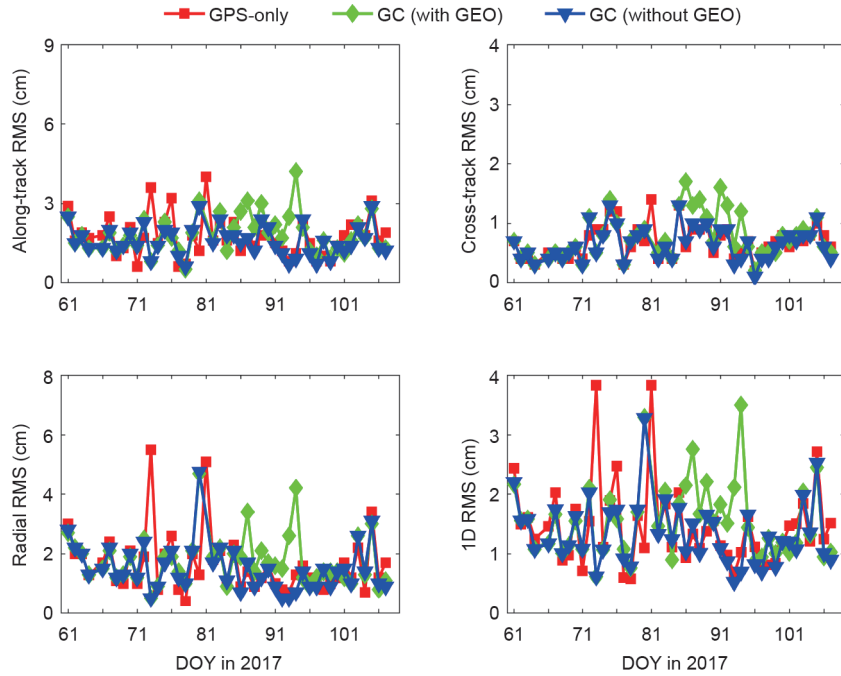


图6. 2017年单GPS、GC（考虑GEO）和GC（不考虑GEO）定轨重叠轨道比较RMS。

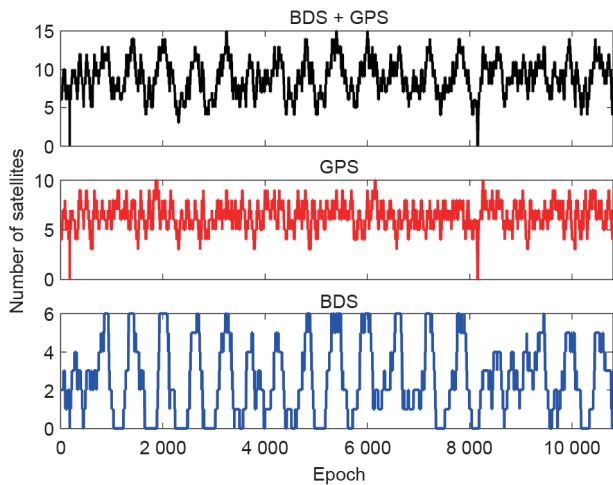


图7. 2017年DOY 91 FY-3C卫星定轨可用GPS和BDS卫星数量时间序列。

轨卫星定轨的精度，而且由于系统冗余，能够显著提高低轨卫星定轨的可靠性。

为了进一步评估钟差产品采样率对于低轨卫星定轨的影响，我们选用了FY-3C卫星2017年DOY 80~94的双频BDS和GPS数据以及30 s和5 min导航卫星钟差产品，分别进行单GPS和GC双系统定轨实验。精密钟差产品选用GFZ提供的多系统事后产品。由于2017年缺少5 min采样间隔的GFZ钟差产品，因此我们将30 s的钟差产品稀释至5 min。图8显示了采用不同钟差产品的定

轨方案在各方向上的定轨精度。各方向的平均RMS值显示在相应的子图上方。从图中可以明显看到，当采用30 s钟差产品时，FY-3C卫星在各方向上的定轨精度得到了明显的提高。相比于5 min钟差产品方案，30 s钟差产品方案的单GPS定轨结果在切向、法向和径向上分别提高了50.0%、51.6%和36.3%。对于GC双系统定轨方案，在采用高采样率钟差产品后，其精度提升幅度要小于单GPS定轨结果，其在三个方向上分别提高了8.8%、9.6%和19.4%。上述结果说明高采样率的钟差产品能够减少钟差插值误差，提高LEO卫星定轨精度。

4.3. 残差分析

图9展示了单GPS、GC（考虑GEO）和GC（不考虑GEO）三种定轨方案中的GPS无电离层组合相位（LC）和码伪距（PC）观测值残差的RMS。单GPS、GC（考虑GEO）和GC（不考虑GEO）方案的LC残差在2013年、2015年和2017年的平均RMS分别为27.5 mm、19.8 mm和12.6 mm，27.6 mm、20.5 mm和13.1 mm，27.3 mm、20.3 mm和13.0 mm。两个双系统定轨方案的GPS LC残差要明显大于单GPS方案。这说明当引入BDS观测值时，由于BDS卫星轨道和钟差产品精度相对较低，会使得GPS LC残差变大。值得注意的是，GC（考虑GEO）和GC（不考虑GEO）方案的GPS LC残差从2015年

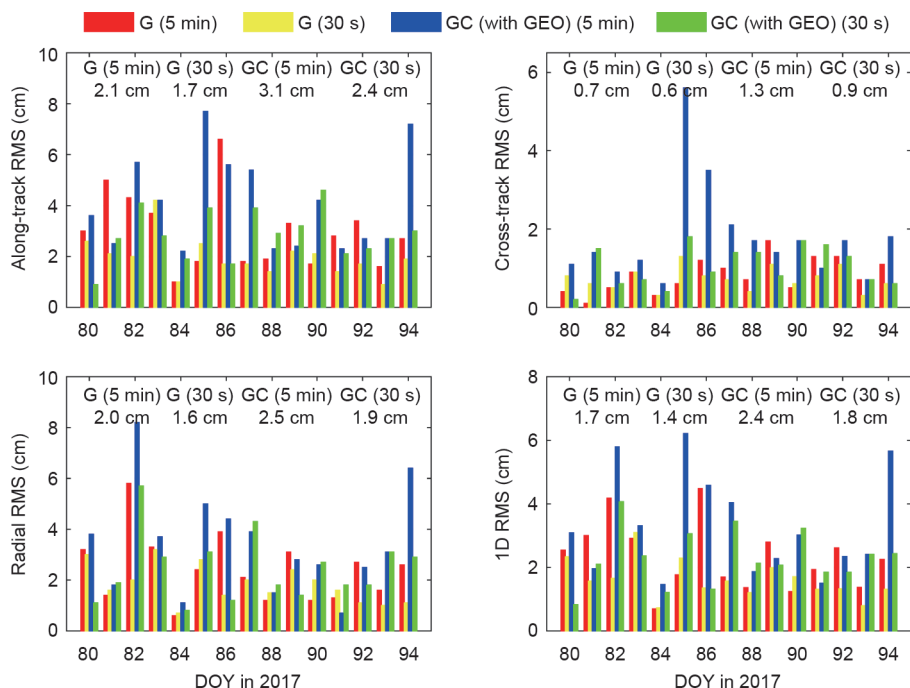


图8. 基于30 s和5 min钟差产品的单GPS定轨和GC双系统定轨的重叠轨道比较。

DOY 121开始显著减小。主要原因是从2015年DOY 123开始, GFZ提供的GPS轨道和钟差产品的采样间隔分别从15 min和5 min变为5 min和30 s。同时能够看到, 两个双系统方案的GPS LC残差从2013年至2017年逐渐减小, 这是得益于导航卫星轨道钟差产品精度和采样间隔的不断提高。对于PC残差, 单GPS、GC(考虑GEO)和GC(不考虑GEO)方案在2013年、2015年和2017年的平均RMS分别为16.1 dm、19.5 dm和20.1 dm, 16.1 dm、19.8 dm和20.2 dm, 16.1 dm、19.7 dm和20.3 dm。结果显示, 单GPS定轨方案的PC RMS最小, 而GC(考虑GEO)方案PC RMS最大。

同样地, 我们统计了2013—2017年单BDS、GC(考虑GEO)和GC(不考虑GEO)三种定轨方案中的每颗BDS卫星无电离层组合相位和码伪距观测值残差的RMS。如图10所示, 单BDS方案GEO卫星的LC残差RMS要大于IGSO和MEO卫星, 这是因为GEO卫星本身轨道产品精度较低。除2013年以外, 单BDS定轨的PC残差RMS约为2 m。2013年较大的伪距残差可能与该时间段BDS轨道和钟差产品精度较低有关。对于GC(考虑GEO)方案, 其GEO卫星的LC残差要远大于单BDS方案。但是GC(考虑GEO)定轨重叠轨道精度却要优于单BDS定轨, 见4.2节。这可能是因为在单BDS定轨方案中, 观测值数量较少, 解的强度较弱, 使得GEO卫

星产品的模型误差被待估参数所吸收, 导致定轨精度较低。当不考虑GEO卫星时, GC(不考虑GEO)方案的LC和PC残差RMS要略小于GC(考虑GEO)方案。整体而言, 可以看到, 由于BDS卫星产品精度的提升, 单BDS定轨和GC双系统定轨的BDS卫星LC和PC残差从2013年至2017年呈现出明显的下降趋势。以单BDS定轨为例, 与2015年的结果相比, 2017年GEO、IGSO和MEO的LC残差分别减少了48.9%、57.9%和55.6%。上述结果说明了BDS卫星轨道和钟差产品精度和采样率的提升能够极大地提高LEO卫星的轨道精度。

5. 结论

本文主要聚焦于FY-3C单BDS定轨和GC双系统定轨, 以研究星载BDS定轨性能及其对低轨卫星精密轨道确定的贡献。选用并处理了2013年DOY 316~365、2015年DOY 96~145以及2017年DOY 61~110三个时段的FY-3C星载BDS和GPS数据。

首先分析了FY-3C星载数据的可用性。结果显示, 受限于BDS-2区域系统和FY-3C有限的BDS跟踪通道, 星载BDS观测值要明显少于GPS观测值。而且, 从2013年到2017年, BDS观测值数量呈现明显的下降趋势。这一趋势与BDS观测值逐渐增加的数据丢失有关,

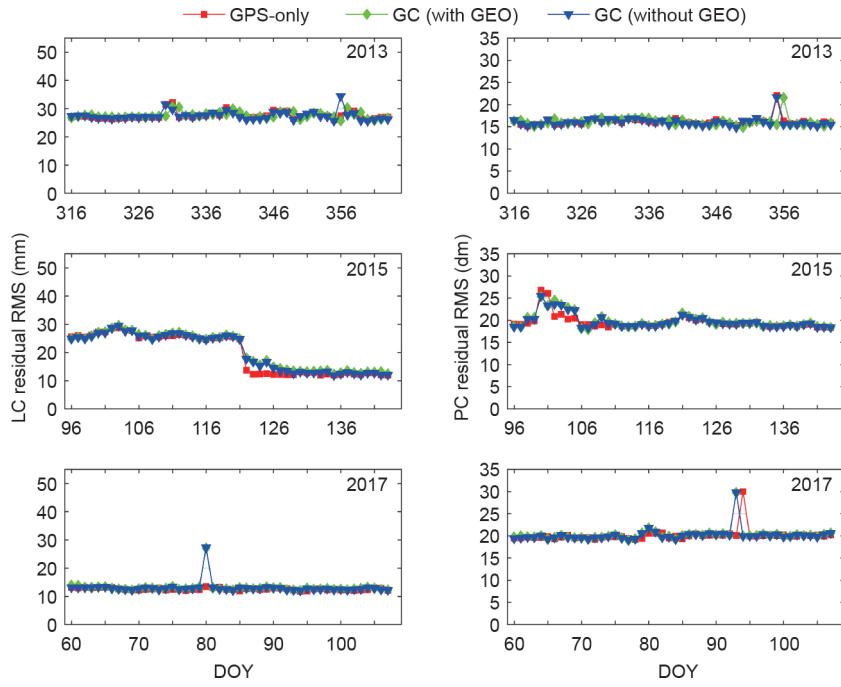


图9. 2013年、2015年和2017年GPS卫星LC和PC残差RMS。

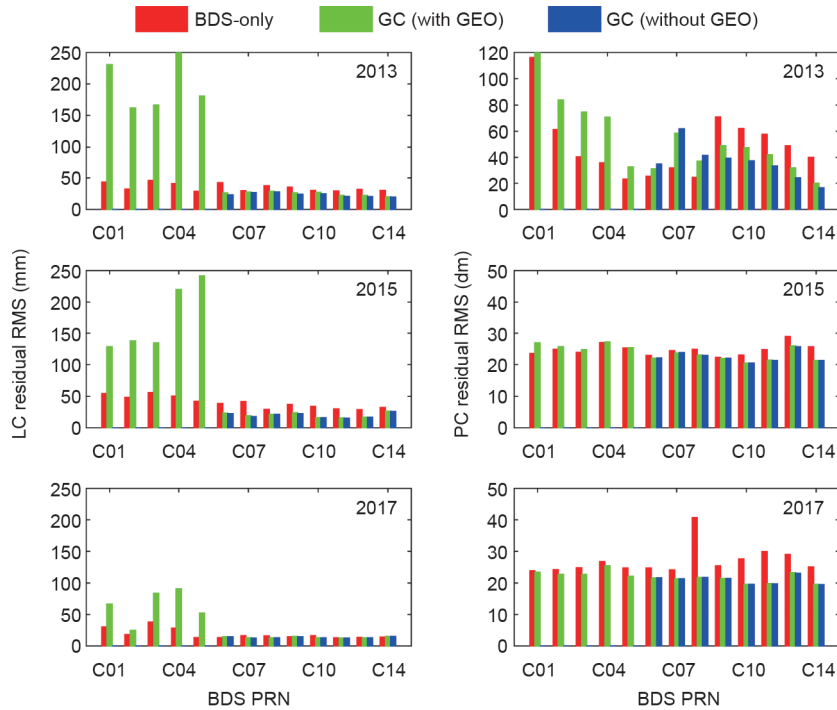


图10. 2013年、2015年和2017年BDS卫星LC和PC残差RMS。PRN: 伪随机噪声码。

可能是由于GNOS接收机老化造成的。

当改正BDS卫星伪距码偏差之后，FY-3C卫星GC双系统定轨重叠轨道精度得到了明显的提升，这说明对于LEO精密定轨，改正BDS卫星码偏差是十分重要的。FY-3C卫星单GPS定轨能够实现几厘米的定轨精度，其

在2013年、2015年和2017年的重叠轨道差异1D RMS分别为2.0 cm、1.7 cm和1.5 cm。单BDS定轨精度要远差于单GPS的定轨精度，主要原因是BDS-2仍是区域系统，同时FY-3C上搭载的GNOS接收机仅能同时跟踪不超过6颗BDS卫星。FY-3C卫星GC双系统定轨的重叠轨

道比较精度明显差于单GPS定轨。这说明由于轨道钟差产品精度较低，BDS GEO卫星的加入会显著地降低低轨卫星的定轨精度。对于GC（不考虑GEO）方案，其在2013年、2015年和2017年的重叠轨道差异1D RMS分别为2.0 cm、1.8 cm和1.3 cm。在2017年，GC（不考虑GEO）方案的重叠轨道精度在切向、法向和径向上均稍优于单GPS方案，三个方向对应的重叠轨道RMS分别为1.6 cm、0.7 cm和1.5 cm。这一结果说明，当采用高精度的BDS轨道和钟差产品时，GC双系统融合定轨能够提高LEO卫星的定轨精度。同时，GC双系统融合的优势还在于系统冗余所带来的定轨可靠性的提高。此外，得益于BDS轨道和钟差精度的不断提高，2013—2017年，FY-3C卫星单BDS定轨和GC双系统定轨精度得到了明显的提升。

随着越来越多的BDS卫星提供服务以及BDS轨道和钟差产品精度的不断提高，未来星载BDS观测值以及多系统融合有望为低轨卫星定轨带来更显著的精度提升。

致谢

感谢IGS、GFZ和WHU提供的GPS和BDS卫星精密轨道和钟差产品。同时，感谢GFZ的EPOS-RT/PANDA软件。本研究由国家自然科学基金（41774030、41974027、41974029和41505030）以及湖北省自然科学基金（2018CFA081）资助。本文的数值计算得到了武汉大学超级计算中心的计算支持和帮助。

Compliance with ethics guidelines

Xingxing Li, Keke Zhang, Xiangguang Meng, Wei Zhang, Qian Zhang, Xiaohong Zhang, and Xin Li declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Tapley BD, Ries JC, Davis GW, Eanes RJ, Schutz BE, Shum CK, et al. Precision orbit determination for TOPEX/POSEIDON. *J Geophys Res Oceans* 1994;99(C12):24383–404.
- [2] Kang Z, Tapley B, Bettadpur S, Ries J, Nagel P, Pastor R. Precise orbit determination for the GRACE mission using only GPS data. *J Geod* 2006;80(6):322–31.
- [3] Bock H, Jäggi A, Meyer U, Visser P, van den Ijssel J, van Helleputte T, et al. GPS-derived orbits for the GOCE satellite. *J Geod* 2011;85(11):807–18.
- [4] van den Ijssel J, Encarnação J, Doornbos E, Visser P. Precise science orbits for the Swarm satellite constellation. *Adv Space Res* 2015;56(6):1042–55.
- [5] Zhao Q, Guo J, Li M, Qu L, Hu Z, Shi C, et al. Initial results of precise orbit and clock determination for COMPASS navigation satellite system. *J Geod* 2013;87(5):475–86.
- [6] Li X, Zhang X, Ren X, Fritsche M, Wickert J, Schuh H. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Sci Rep* 2015;5:8328.
- [7] Li P, Zhang X, Guo F. Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou. *J Geod* 2017;91(1):25–40.
- [8] Xu A, Xu Z, Ge M, Xu X, Zhu H, Sui X. Estimating zenith tropospheric delays from BeiDou navigation satellite system observations. *Sensors* 2013;13(4):4514–26.
- [9] Li M, Li W, Shi C, Zhao Q, Su X, Qu L, et al. Assessment of precipitable water vapor derived from ground-based BeiDou observations with Precise Point Positioning approach. *Adv Space Res* 2015;55(1):150–62.
- [10] Li X, Zus F, Lu C, Dick G, Ning T, Ge M, et al. Retrieving of atmospheric parameters from multi-GNSS in real time: validation with water vapor radiometer and numerical weather model. *J Geophys Res Atmos* 2015;120(14):7189–204.
- [11] Li M, Li W, Shi C, Jiang K, Guo X, Dai X, et al. Precise orbit determination of the Fengyun-3C satellite using onboard GPS and BDS observations. *J Geod* 2017;91(11):1313–27.
- [12] Xiong C, Lu C, Zhu J, Ding H. Orbit determination using real tracking data from FY3C-GNOS. *Adv Space Res* 2017;60(3):543–56.
- [13] Zhao Q, Wang C, Guo J, Yang G, Liao M, Ma H, et al. Enhanced orbit determination for BeiDou satellites with Fengyun-3C onboard GNSS data. *GPS Solut* 2017;21(3):1179–90.
- [14] Cai Y, Bai W, Wang X, Sun Y, Du Q, Zhao D, et al. In-orbit performance of GNOS on-board FY3-C and the enhancements for FY3-D satellite. *Adv Space Res* 2017;60(12):2812–21.
- [15] Dow JM, Neilan RE, Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J Geod* 2009;83(3–4):191–8.
- [16] Guo J, Xu X, Zhao Q, Liu J. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison. *J Geod* 2016;90(2):143–59.
- [17] Uhlemann M, Gendt G, Ramatschi M, Deng Z. GFZ global multi-GNSS network and data processing results. In: Rizos C, Willis P, editors. *IAG 150 years: Proceedings of the IAG Scientific Assembly; 2013 Sep 1–6; Postdam, Germany*. Cham: Springer; 2015. p. 673–9.
- [18] Schmid R, Dach R, Collilieux X, Jäggi A, Schmitz M, Dilssner F. Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *J Geod* 2016;90(4):343–64.
- [19] Rebischung P, Schmid R. IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products. *American Geophysical Union Fall Meeting 2016; 2016 Dec 12–16; San Francisco, CA, USA, 2016*.
- [20] Dilssner F, Springer T, Schönemann E, Enderle W. Estimation of satellite Antenna Phase Center corrections for BeiDou. *International GNSS Service Workshop 2014; 2014 June 23–27; Pasadena, CA, USA, 2014*.
- [21] Berger C, Biancale R, Ill M, Barlier F. Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM94—a comparative review of various temporal variations and prospects in space geodesy applications. *J Geod* 1998;72(3):161–78.
- [22] Wanninger L, Beer S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy. *GPS Solut* 2015;19(4):639–48.