

CODE 新光压模型对北斗混合导航星座精密轨道确定的影响*

鞠冰^{1,2}, 昌琥¹, 谷德峰¹, 段晓君¹, 王正明¹

(1. 国防科技大学文理学院, 湖南长沙 410073;

2. 北京航天飞行控制中心 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094)

摘要:运用卫星定轨软件工具包 NUDTTK, 分析了欧洲定轨中心扩展的经验光压模型 (EECOM) 对北斗二代混合导航星座精密轨道确定的影响。研究表明:对地球静止轨道卫星而言,EECOM 能够明显改善定轨精度,相比于传统的 ECOM-9 和 ECOM-5 模型,卫星激光测距检核精度分别提高 17.4% 和 35.1%。对倾斜地球同步轨道卫星和中轨道卫星而言,采用 ECOM-5 模型的定轨精度要优于采用 EECOM 和 ECOM-9 模型的,新光压模型 EECOM 并不能有效改善倾斜地球同步轨道卫星和中轨道卫星的定轨精度。与 IGS 数据分析中心 WHU、GFZ 和 CODE 的轨道产品相互比对的结果显示:目前,国防科技大学北斗精密轨道产品中,地球静止轨道卫星的定轨精度为 1~4 m,倾斜地球同步轨道卫星的定轨精度为 25~30 cm,中轨道卫星的定轨精度为 10~20 cm。

关键词:经验光压模型;精密轨道确定;北斗卫星导航系统;混合星座;偏航姿态模式

中图分类号:P228 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)01-086-07

Analysis of CODE's new solar radiation pressure model on precise orbit determination for mixed-type BeiDou constellation

JU Bing^{1,2}, CHANG Xiao¹, GU Defeng¹, DUAN Xiaojun¹, WANG Zhengming¹

(1. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Sciences and Technology on Aerospace Flight Dynamic Laboratory, Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: The performance of CODE's new solar radiation pressure model, the EECOM (extended empirical CODE orbit model), was analyzed on precise orbit determination for mixed-type BeiDou constellation. This study is based on the NUDTTK software, which is a satellite orbit determination toolkit. The validation of satellite laser ranging reveals that the EECOM can improve orbital accuracy of geostationary earth orbit satellites by 17.4% and 35.1%, compared with traditional CODE's ECOM-9 and ECOM-5 models, respectively. As to the inclined geosynchronous earth orbit and the medium earth orbit satellites, the ECOM-5 model performs better than EECOM as well as ECOM-9 model. It means that CODE's new solar radiation pressure model is not able to improve the orbital accuracy of the inclined geosynchronous earth orbit and the medium earth orbit satellites. External orbit validation by IGS data analysis centers of GFZ, WHU and CODE indicates that the accuracy of our current BeiDou precision orbit is 1~4 m for geostationary earth orbit satellites, 25~30 cm for inclined geosynchronous earth orbit satellites and 10~20 cm for medium earth orbit satellites, respectively.

Key words: empirical solar radiation pressure model; precise orbit determination; BeiDou navigation satellite system; mixed-type constellation; yaw attitude mode

对导航卫星而言,太阳光压 (Solar Radio Pressure, SRP) 是除二体中心引力、地球非球形引力及日月引力外最大的摄动力项,量级可达 10^{-7} m/s^2 ^[1]。近来,相关学者对欧洲定轨中心 (the Center of Orbit Determination in Europe, CODE) 的经验光压模型 (Empirical CODE Orbit Model, ECOM) 在北斗混合星座精密定轨中的应

用开展了许多研究。Lou 等^[2]对比分析了 9 参数模型 ECOM-9 和 5 参数模型 ECOM-5 对北斗倾斜地球同步轨道 (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO) 卫星和中轨道 (Medium Earth Orbit, MEO) 卫星精密定轨的影响。研究表明: ECOM-5 模型的定轨精度显著优于 ECOM-9 模型的定轨精度。Liu 等^[3]依据北斗卫星不同的姿

* 收稿日期:2016-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61573367,61370013,91438202)

作者简介:鞠冰(1986—),男,辽宁东港人,博士研究生,E-mail:jucice@126.com;

谷德峰(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:gudefeng@nudt.edu.cn

态控制模式,在 ECOM-9 模型的基础上采用试验设计方法进行模型参数优选,提出了一种适用于北斗地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星的6参数光压模型。实验结果表明:采用改进光压模型后的 GEO 卫星轨道重叠弧段精度和激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)检核精度均有明显提升。Guo 等^[4-5]基于 CODE 经验光压模型,分析了北斗卫星在不同偏航姿态控制模式下的定轨精度差异。研究表明:在 ECOM-5 模型的基础上引入切向经验加速度分量,可以显著提高 IGSO 和 MEO 卫星在零偏姿态模式期间的定轨精度。

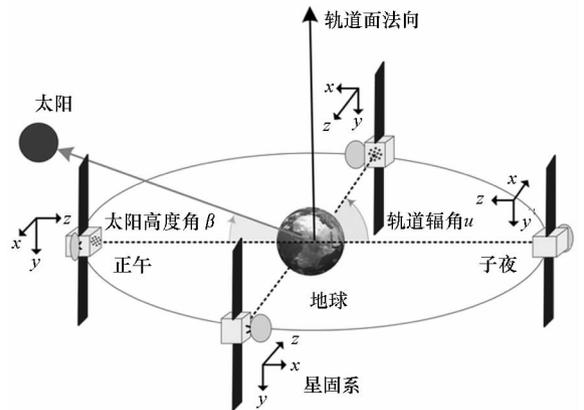
综上所述,当前研究多集中于 CODE 某一经验光压模型(或做适当的改进)对某一类北斗卫星精密定轨结果的影响,鲜有文献针对三类卫星的星体结构差异及姿态控制模式差异,系统地研究不同经验光压模型组合对北斗混合星座精密定轨的影响。另一方面,2015 年 CODE 发布了新的光压模型:扩展的经验光压模型(Extended Empirical CODE Orbit Model, EECOM)^[6],该模型在北斗卫星精密定轨中的性能尚无系统的分析和研究。因此,本文针对北斗三类卫星各自的星体特点和姿态控制模式,将 CODE 现有的三种光压模型(ECOM-9, ECOM-5 和 EECOM)分别应用于精密轨道确定,并通过激光测距检核、轨道天边界不一致性检核对各模型的定轨结果进行分析,从而优选出适合于北斗混合星座精密定轨的光压模型组合。

1 北斗卫星导航系统现状

与美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)不同,我国北斗二代卫星导航系统(BeiDou-2)采用混合星座设计,由5颗 GEO 卫星(C01~C05)、5颗 IGSO 卫星(C06~C10)和4颗 MEO 卫星(C11~C14)组成,于2012年底正式为亚太地区提供导航、定位与授时服务^[7]。2014年10月,C13卫星由于卫星故障,停止导航定位服务。随后,我国又于2015年3月至2016年6月先后发射了7颗北斗导航卫星。其中,2颗(1GEO+1IGSO)为北斗二代导航星座的组网卫星;5颗(2IGSO+3MEO)为新一代北斗导航试验卫星(BeiDou-3),用于新型导航信号体制、新型星载原子钟及星间链路等方面的技术验证。截至2016年10月,北斗二代导航系统共包含15颗在轨卫星,星座状态为:6GEO+6IGSO+3MEO^[8]。

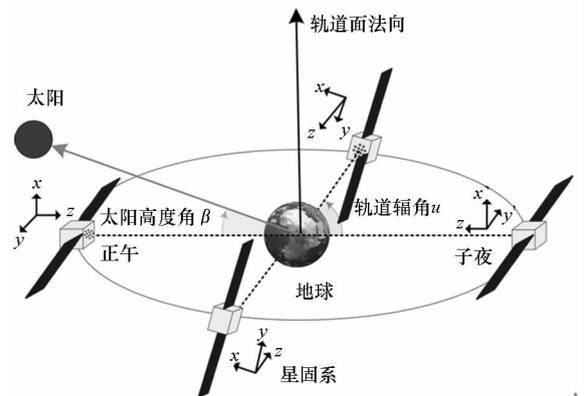
在卫星偏航姿态控制方面,北斗 GEO 卫星始

终采用零偏控制模式(如图1(a)所示),而北斗 IGSO 和 MEO 卫星采用零偏、动偏(如图1(b)所示)两种控制模式^[9]。当太阳高度角绝对值小于4且偏航角绝对值接近0时,IGSO 和 MEO 卫星的姿态控制模式由动偏转为零偏;当太阳高度角绝对值大于4且偏航角绝对值接近0时,IGSO 和 MEO 卫星的姿态控制模式由零偏转为动偏^[10-11]。在星体几何结构方面,北斗 GEO 卫星的+X面装有大口径C波段通信天线,使得 GEO 卫星的星体系+X面与+Z面呈现明显的不对称性^[12]。



(a) 北斗 GEO 卫星零偏姿态控制模式

(a) Yaw-fixed mode for BeiDou GEO satellite



(b) 北斗 MEO 和 IGSO 卫星动偏姿态控制模式

(b) Yaw-steering mode for BeiDou IGSO and MEO satellite

图1 北斗卫星姿态控制模式示意图

Fig. 1 Attitude mode for BeiDou satellites

2 光压模型的分类

导航卫星精密定轨中所采用的光压模型主要有分析型、经验型以及半分析、半经验型三类^[13]。①分析型光压模型根据星体几何结构、表面材料光学属性以及姿态控制模式等对卫星进行光压摄动力分析,从而获得具有明确物理意义的光压模型。如:Box-Wing 模型^[14], T20/T30 模型^[1,15], 基

于射线追踪算法的 UCL 模型^[16]、北斗 IGSO 卫星光压模型^[17]以及 IGGSPM 模型^[18]。此类模型具有较高的轨道预报精度,但模型本身的建立受限于卫星几何参数及光学属性参数的准确获取。②经验型太阳光压模型不依赖于卫星星体结构和表面光学属性,而是根据卫星实际在轨数据拟合得到的一类纯数学模型。如:Colombo 模型^[19], CODE 的经验光压模型 ECOM-9^[20]及其改进型 ECOM-5^[21], 美国喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的 GSPM 模型^[22-23]。此类模型最初使用卫星的长期在轨数据拟合得到相应的光压模型参数,随后,逐渐演变为在精密定轨的同时估计光压参数,以进一步提高定轨精度^[6]。③半分析、半经验型光压模型介于分析型和经验型模型之间,希望模型既具有明确的物理意义,同时又具备经验模型的定轨精度。如:可校正的 Box-Wing 模型^[24]。此类模型的参数之间往往具有较强的相关性,在定轨解算时需要对光压参数添加额外的先验约束,并且与经验型光压模型相比,尚不能显著提高定轨精度。

近来, Montenbruck 等^[13]针对 Galileo-IOV 卫星的精密定轨问题,提出了一种增强的光压摄动建模方法。该方法在 ECOM-5 模型的基础上,根据卫星长期定轨数据拟合得到一个先验的分析型光压模型;然后在精密定轨过程中,同时利用先验光压模型并改进 ECOM-5 模型中的光压系数,从而有效地提高了 Galileo-IOV 卫星的定轨精度,为太阳光压建模提供了一种新的解决思路。

目前, CODE 模型及其改进型是国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)各数据分析中心采用最多的光压模型,被广泛应用于 GPS 卫星的精密轨道确定。

3 CODE 经验光压模型

1994 年, Beutler 等^[20]首次提出了 9 参数的 CODE 经验光压模型 ECOM-9, 用于 GPS 卫星的精密轨道确定。该模型将光压摄动分解到如式(1)所示的三个正交的轴向,并在每个方向上按傅里叶级数展开。

$$\begin{cases} \mathbf{e}_D \triangleq \frac{\mathbf{r}_s - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|} \\ \mathbf{e}_Y \triangleq \frac{\mathbf{e}_D \times \mathbf{r}}{|\mathbf{e}_D \times \mathbf{r}|} \\ \mathbf{e}_B \triangleq \mathbf{e}_D \times \mathbf{e}_Y \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{r}_s 和 \mathbf{r} 分别表示太阳和卫星在地心惯性系

下的矢量。上述 DYB 三轴的指向取决于太阳、卫星和地球三者之间的相对几何关系。 $-\mathbf{e}_D$ 方向始终与太阳光线的入射方向保持一致; \mathbf{e}_Y 始终垂直于太阳、卫星和地球三者所确定的平面,在动偏姿态控制模式下,与太阳帆板转轴方向保持一致; 单位矢量 \mathbf{e}_B 与 $\mathbf{e}_D, \mathbf{e}_Y$ 构成右手系。于是,卫星所受的光压摄动加速度可表示为:

$$\mathbf{a}_{\text{SRP}} = \mathbf{a}_0 + D(u)\mathbf{e}_D + Y(u)\mathbf{e}_Y + B(u)\mathbf{e}_B \quad (2)$$

$$\begin{cases} D(u) = D_0 + D_C \cos u + D_S \sin u \\ Y(u) = Y_0 + Y_C \cos u + Y_S \sin u \\ B(u) = B_0 + B_C \cos u + B_S \sin u \end{cases} \quad (3)$$

其中, \mathbf{a}_0 是先验光压摄动加速度,采用 T20/T30 模型计算得到; $D_0, D_C, D_S, Y_0, Y_C, Y_S, B_0, B_C, B_S$ 为待估的傅里叶展开系数,利用卫星长期的轨道数据拟合得到; u 为卫星在轨道平面内的幅角(如图 1 所示)。ECOM-9 模型的提出弥补了先验光压模型 T20/T30 表示精度不足的问题,使得 GPS 卫星的精密定轨精度得到显著提升。

1999 年, Springer 等^[21]基于长期的 GPS 轨道预报和轨道拟合结果分析,在 ECOM-9 模型的基础上进一步优化,得到 5 参数的光压模型 ECOM-5。

$$\begin{cases} D(u) = D_0 \\ Y(u) = Y_0 \\ B(u) = B_0 + B_C \cos u + B_S \sin u \end{cases} \quad (4)$$

该模型早期仍以 T20/T30 模型作为先验模型,但在精密定轨的同时仅估计 5 个光压模型参数: D_0, Y_0, B_0, B_C, B_S 。自 2013 年后, CODE 不再采用任何先验光压模型^[6],直接将经验光压模型 ECOM-5 用于导航卫星的精密轨道确定。

2015 年, Arnold 等^[6]针对 GLONASS 卫星的星体结构不对称问题^[25-26],对 CODE 太阳光压模型进行重新建模分析,并指出:当卫星处于正常的偏航姿态旋转模式时, D 方向的光压摄动只与偶数阶的周期项有关,而 B 方向的光压摄动只与奇数阶的周期项有关,即

$$\begin{cases} D(u) = D_0 + \sum_{i=1}^{n_D} [D_{2i,C} \cos 2iu + D_{2i,S} \sin 2iu] \\ Y(u) = Y_0 \\ B(u) = B_0 + \sum_{i=1}^{n_B} [B_{2i-1,C} \cos(2i-1)u + B_{2i-1,S} \sin(2i-1)u] \end{cases} \quad (5)$$

进一步的分析结果表明:将 D 方向的傅里叶级数展开至 4 阶、 B 方向的傅里叶级数展开至

1 阶(D4B1 方案),或者 D 方向的傅里叶级数展开至 2 阶、 B 方向的傅里叶级数展开至 1 阶(D2B1 方案),能够显著降低星体几何结构对光压摄动建模的影响,提高定轨精度。其中,采用 D4B1 方案的定轨结果略优于 D2B1 方案,因此在后续研究中 EECOM 模型所使用的是 D4B1 方案。

4 北斗导航星座精密轨道确定

为开展多系统导航信号监测及相关技术研究^[27],IGS 于 2012 年启动了多模 GNSS 实验(Multi-GNSS Experiment, MGEX)项目。选取 60 个 MGEX 测站在 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日的观测数据,基于国防科技大学自主研发的卫星定轨软件工具包 NUDTTK,采用非差定轨方法对北斗导航星座进行精密轨道解算。13 颗在轨北斗卫星的星下点轨迹及 MGEX 测站分布如图 2 所示。

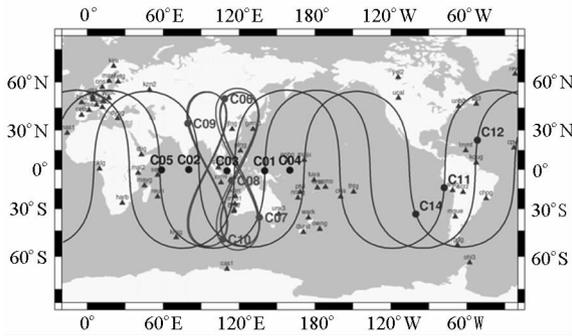


图 2 MGEX 测站分布和北斗卫星星下点轨迹

Fig. 2 Distribution of MGEX stations (triangle) and footprints of BeiDou navigation satellites

由于现阶段在轨的北斗导航卫星数量较少且地面观测几何相对较差,采用“两步法”^[4]实现北斗卫星的精密轨道确定。首先以 IGS 提供的 GPS 精密星历为时空基准,利用 GPS 观测数据进行测站的精密单点定位解算,获得测站坐标、钟差及天顶对流层延迟参数的先验值。然后再利用北斗伪码和载波相位非差观测数据(加权),估计卫星的初始轨道参数、光压模型参数、卫星钟差、测站坐标、测站钟差及测站天顶对流层延迟参数,进而确定北斗卫星的精密轨道。在轨道改进过程中,测站坐标及测站天顶对流层延迟参数紧约束到 GPS 的精密单点定位先验值,相位模糊度采用浮点解,不进行整周固定。精密定轨相关的模型信息详见表 1。

表 1 北斗精密定轨相关的模型信息

Tab. 1 Models for BeiDou POD processing

项目	描述
观测值	24 h 观测弧长,非差、双频消电离层组合伪码和载波相位数据,采样间隔 5 min
截止高度角	7°
观测模型	相位:伪距为 100 : 1,根据卫星高度角 θ 加权,大于 30°时权值为 1;小于 30°时权值为 $2\sin\theta$
对流层延迟修正	Saastamoinen 模型
PCO/PCV 修正	igs08_1888.atx
天线相位缠绕	处于动偏控制模式的卫星修正
卫星姿态模型	GEO 卫星 零偏模式 IGSO/MEO 卫星 动偏模式 + 零偏模式
卫星轨道力学模型	地球重力场模型 GGM02C(12 × 12) 固体潮、海潮修正 IERS2010 规范 三体引力摄动 JPL-DE405 行星历 相对论修正 仅 Schwarzschild 项 太阳光压摄动 ECOM - 9/ECOM - 5/EECOM
参考框架	惯性系 J2000.0 地固系 ITRF2008 岁差、章动修正 IERS2010 规范 地球旋转参数 IERS 快速 EOP 产品 (Bulletin A)

5 结果分析

5.1 卫星激光测距检核

作为一种独立的轨道检核手段,SLR 检核可以有效反映卫星精密定轨的径向偏差^[28]。表 2 给出了采用不同光压模型定轨的 SLR 检核结果。表 3 给出了各卫星可视的 SLR 测站个数(高度截止角为 5°)及数据使用情况统计。

由表 2 知,GEO 卫星 C01 的 SLR 检核均方根误差在分米量级,采用 EECOM 模型的检核残差最小($RMS = 30.0$ cm),较 ECOM - 5 和 ECOM - 9 分别降低了 35.1% 和 17.4%。这表明:EECOM 模型比 ECOM - 5 和 ECOM - 9 模型更适合于星体结构不对称(GEO 卫星装有大口径通信天线)情况下的太阳光压建模。IGSO 卫星 C08 和 C10 在动偏模式下的 SLR 检核精度明显优于零偏模式;在两种姿态控制模式下,采用 ECOM - 5 模型的 SLR 检核结果均优于 ECOM - 9 和 EECOM。这表明:尽管 EECOM 模型具有较高的表示精度,

但却显著降低了 IGSO 卫星的定轨精度,即使在动偏模式下,采用 ECOM - 5 模型的定轨精度也明显优于 EECOM 模型。这一现象的原因目前尚不明确,但很可能与 IGSO 卫星的太阳帆板指向偏差有关。MEO 卫星 C11 在动偏模式下的 SLR 检核精度优于零偏模式,其中 ECOM - 5 和 EECOM 的 SLR 检核精度相当,均优于 ECOM - 9;零偏模式下,采用三种光压模型的 SLR 检核精度相当。根据上述分析可知,对北斗混合导航星座而言,IGSO 和 MEO 卫星采用 ECOM - 5 光压模型、GEO 卫星采用 EECOM 光压模型进行精密定轨解算效果最佳。

表 2 北斗卫星轨道的 SLR 检核残差均方根

Tab. 2 RMS of SLR residuals of BeiDou satellite orbits
cm

姿态	模型	C01	C08	C10	C11
动偏	ECOM - 9		26.2	23.2	10.8
	ECOM - 5		7.1	7.7	4.4
	EECOM		12.0	9.4	5.0
零偏	ECOM - 9	36.3	46.3	37.9	15.4
	ECOM - 5	46.2	10.8	11.2	14.9
	EECOM	30.0	35.9	28.6	16.9

表 3 SLR 测站个数及数据使用情况统计

Tab. 3 Statistics of SLR stations and data used

卫星	测站数目	观测点数目	超差阈值/m
C01	6	1670	1.5
C08	8	1357	0.5
C10	10	1529	0.5
C11	17	2244	0.5

5.2 天边界不一致性检核

除 SLR 检核外,轨道天解之间的一致性也是衡量定轨精度的重要指标。采用天边界不一致性^[29](Day Boundary Discontinuities, DBDs)指标对轨道内符合精度进行检核。图 3 给出了三种经验光压模型用于北斗三类卫星精密定轨的 DBDs 检核结果。由图 3 可知, GEO 和 MEO 卫星采用 ECOM - 5、EECOM 模型的轨道天解一致性相当,均优于 ECOM - 9 模型。IGSO 卫星采用 ECOM - 5 模型的轨道天解一致性显著优于 ECOM - 9 和 EECOM 模型。IGSO 卫星和 MEO 卫星采用了相同的卫星平台和姿态控制模式,但不同光压模型对定轨结果的影响却差异显著。对 IGSO 卫星而言,采用 EECOM 模型的定轨精度明显低于 ECOM - 5 模型,这进一步说明了 IGSO 卫星的太

阳帆板可能存在显著的指向偏差,造成 *DYB* 三轴的指向与卫星实际所受光压摄动力的方向不匹配。

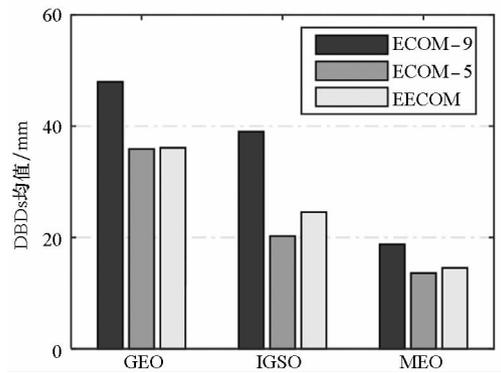


图 3 北斗卫星轨道的 DBDs 检核结果

Fig. 3 DBDs validation for BeiDou satellite orbits

5.3 轨道互比对

SLR 检核和 DBDs 检核结果显示: GEO 卫星采用 EECOM 模型, IGSO、MEO 卫星采用 ECOM - 5 模型是当前 CODE 经验光压模型用于北斗混合星座精密定轨的最佳模型组合。

以下将采用两种模型组合解算得到的精密轨道与 IGS 三家数据分析中心 CODE、德国地学研究中心(GFZ)及武汉大学(WHU)的北斗轨道产品进行比较,以进一步评估国防科技大学(NUDT)北斗精密轨道产品的精度。其中, CODE、GFZ、WHU 及 NUDT 的定轨策略比较见表 4。

表 4 CODE, GFZ, WHU 和 NUDT 的北斗定轨策略

Tab. 4 POD strategies of CODE, GFZ, WHU and NUDT for BeiDou navigation satellite system

	机构			
	CODE	GFZ	WHU	NUDT
定轨软件	Bernese	EPOS. P8	PANDA	NUDTTK
观测模型	双差	非差	非差	非差
数据采样率	3 min	5 min	30 s	5 min
观测网	MGEX	MGEX	MGEX + iGMAS + BETN	MGEX
截止高度角	3°	7°	7°	7°
观测弧长/d	3	1	1	1
PCO/ PCV 修正	MGEX	ESA	WHU	MGEX
SRP 模型	ECOM - 5	ECOM - 5	ECOM - 5	ECOM - 5 + EECOM
参考文献	Guo 等 (2016) ^[27]	Uhlemann 等 (2015) ^[30]	Guo 等 (2015) ^[24]	

图4给出了CODE,GFZ及WHU三家数据分析中心之间2015年北斗精密轨道产品互比对结果(3D RMS)。由图4可知:三家数据分析中心IGSO卫星平均轨道互比对精度为20~30 cm, MEO卫星平均轨道互比对精度为10~15 cm。因CODE暂不提供北斗GEO卫星的精密轨道产品,且WHU和GFZ之间的GEO轨道互比对结果差异较大(平均3D RMS约为4 m),故图4中没有给出GEO卫星轨道产品的互比对结果。

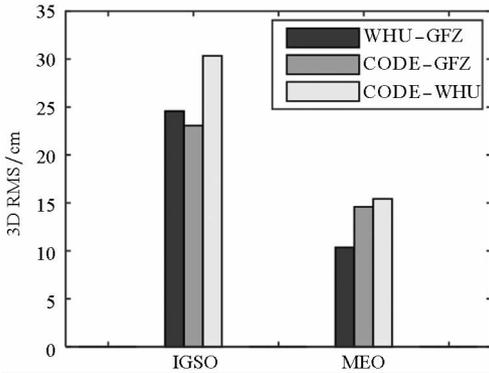
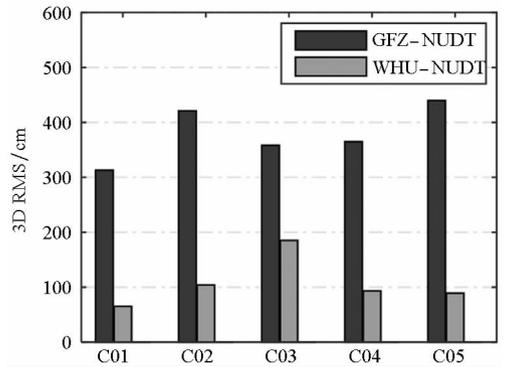


图4 GFZ,WHU和CODE非GEO卫星的轨道互比对
Fig. 4 Orbit comparisons among GFZ, WHU and CODE for BeiDou non-GEO satellites

图5给出了NUDT与GFZ,WHU和CODE之间的轨道互比对结果(3D RMS)。其中,GEO卫星的轨道精度为1~4 m,且与WHU轨道产品较为接近,平均轨道差异不超过2 m;IGSO卫星的轨道精度为20 cm~30 cm;MEO卫星的轨道精度为10 cm~20 cm。上述互比对结果说明NUDT与IGS三家数据分析中心之间的轨道精度量级是相当的。

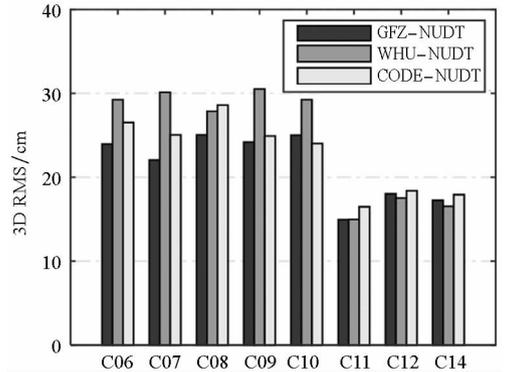
6 结论

根据北斗导航星座特点,分析了CODE经验光压模型ECOM-9,ECOM-5及EECOM对精密轨道确定的影响,给出了适用于北斗混合导航星座的CODE光压模型选择方案。SLR检核和DBDs检核结果表明:对北斗GEO卫星而言,采用CODE新经验光压模型EECOM能够显著提高定轨精度,相比于ECOM-5和ECOM-9模型,SLR检核精度分别提高35.1%和17.4%。而对北斗IGSO和MEO卫星而言,ECOM-5仍是最优的CODE经验光压模型选择方案,新光压模型EECOM并不能改善这两类卫星的定轨精度。特别地,无论采用哪种光压模型,IGSO和MEO卫星在地影期的定轨精度都要显著低于非地影期的定轨精度。后续研究中需要对这两类卫星在地影期



(a) GEO卫星轨道互比对结果

(a) Orbit comparisons for GEO satellites



(b) IGSO和MEO卫星轨道互比对结果

(b) Orbit comparisons for IGSO and MEO satellites

图5 NUDT与GFZ,WHU和CODE北斗轨道互比对
Fig. 5 External BeiDou orbit validation for NUDT with respect to GFZ, WHU and CODE

内的光压摄动建模进行更为深入的研究。最后,轨道互比对结果显示:目前NUDT的北斗精密轨道产品精度与IGS数据分析中心CODE,GFZ和WHU的精密轨道产品精度相当。

参考文献 (References)

- [1] Fliegel H F, Gallini T E. Solar force modeling of block IIR global positioning system satellites [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1996, 33(6): 863-866.
- [2] Lou Y D, Liu Y, Shi C, et al. Precise orbit determination of BeiDou constellation based on BETS and MGEX network [J]. Scientific Reports, 2014, 4(8): 1255-1264.
- [3] Liu J H, Gu D F, Ju B, et al. A new empirical solar radiation pressure model for BeiDou GEO satellites [J]. Advances in Space Research, 2016, 57(1): 234-244.
- [4] Guo J, Xu X L, Zhao Q L, et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison [J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(2): 143-159.
- [5] 郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
GUO Jing. The impacts of attitude, solar radiation and function model on precise orbit determination for GNSS satellites [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in

- Chinese)
- [6] Arnold D, Meindl M, Beutler G, et al. CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(8): 775–791.
- [7] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 211–222.
- [8] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The multi-GNSS experiment (MGEX) of the international GNSS service (IGS)—achievements, prospects and challenges [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7): 1671–1697.
- [9] Zhou S S, Hu X G, Zhou J H, et al. Accuracy analyses of precise orbit determination and timing for COMPASS/Beidou-2 4GEO/5IGSO/4MEO constellation [C]//*Proceedings of China Satellite Navigation Conference*, 2013: 89–102.
- [10] Wang W, Chen G C, Guo S R, et al. A study on the BeiDou IGSO/MEO satellite orbit determination and prediction of the different yaw control mode [C]//*Proceedings of China Satellite Navigation Conference*, 2013: 31–40.
- [11] Dai X L, Ge M R, Lou Y D, et al. Estimating the yaw-attitude of BDS IGSO and MEO satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(10): 1005–1018.
- [12] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. GNSS satellite geometry and attitude models [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1015–1029.
- [13] Montenbruck O, Steigenberger P, Hugentobler U. Enhanced solar radiation pressure modeling for Galileo satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 283–297.
- [14] Rodríguez-Solano C J. Impact of non-conservative force modeling on GNSS satellite orbits and global solutions [D]. Munich, Germany: Technical University of Munich, 2014.
- [15] Fliegel H F, Gallini T E, Swift E R. Global positioning system radiation force model for geodetic applications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B1): 559–568.
- [16] Ziebart M. Generalized analytical solar radiation pressure modeling algorithm for spacecraft of complex shape [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2004, 41(5): 840–848.
- [17] Feng W D, Guo X Y, Qiu H X, et al. A study of analytical solar radiation pressure modeling for BeiDou navigation satellites based on raytracing method [C]//*Proceedings of China Satellite Navigation Conference*, 2014: 425–435.
- [18] Tan B F, Yuan Y B, Zhang B C, et al. A new analytical solar radiation pressure model for current BeiDou satellites; IGGBSPM [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32967.
- [19] Colombo O L. The dynamics of global positioning system orbits and the determination of precise ephemerides [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B7): 9167–9182.
- [20] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, et al. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results [J]. *European Respiratory Journal*, 1994, 7(7): 1350–1364.
- [21] Springer T A, Beutler G, Rothacher M. A new solar radiation pressure model for GPS satellites [J]. *GPS Solutions*, 1999, 2(3): 50–62.
- [22] Bar-Sever Y E, Russ K M. New and improved solar radiation models for GPS satellites based on flight data [R]. California INST of Technology Pasadena JET Propulsion Laboratory, 1997.
- [23] Bar-Sever Y, Kuang D. New empirically derived solar radiation pressure model for global positioning system satellites during eclipse seasons [J]. *The Interplanetary Network Progress Report*, 2004, 42–160: 159.
- [24] Rodríguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P. Adjustable box-wing model for solar radiation pressure impacting GPS satellites [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(7): 1113–1128.
- [25] Meindl M. Combined analysis of observations from different global navigation satellite systems [M]. Switzerland: Technische Hochschule Zürich, 2011.
- [26] Meindl M, Beutler G, Thaller D, et al. Geocenter coordinates estimated from GNSS data as viewed by perturbation theory [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(7): 1047–1064.
- [27] Guo F, Li X X, Zhang X H, et al. Assessment of precise orbit and clock products for Galileo, BeiDou, and QZSS from IGS multi-GNSS experiment (MGEX) [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 279–290.
- [28] Pearlman M R, Degnan J J, Bosworth J M. The international laser ranging service [J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(2): 135–143.
- [29] Griffiths J, Ray J R. On the precision and accuracy of IGS orbits [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 83(3/4): 277–287.
- [30] Uhlemann M, Gendt G, Ramatschi M, et al. GFZ global multi-GNSS network and data processing results [M]//*Proceedings of the IAG Scientific Assembly*, 2013.