北斗三号GEO卫星的RDSS定轨精度分析

邢楠^{1,2*}, 唐成盼³, 李晓杰⁴, 张天桥⁴, 任晖⁴, 郭睿⁴, 胡小工³

1. 北京师范大学天文系, 北京 100875;

2. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030;

3. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

4. 北京卫星导航中心, 北京 100094

*联系人, E-mail: xingnan@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-06-23; 接受日期: 2020-08-20; 网络出版日期: 2020-12-14

国家自然科学基金(编号: 41804030, 41874039)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

摘要 有源服务模式RDSS (Radio Determination Satellite Service)所具备的通信、导航一体化特性是我国北斗卫星导航系统的重要特色之一. 为进一步提高RDSS的通信服务能力, 并保障RDSS服务系统的健壮性, 北斗三号RDSS服务从系统架构到信号体制都进行了很大改进. 本文首先分析了新的信号体制下, RDSS测距在测量模型和观测噪声等方面的误差特性, 并比较了其与原有信号体制的不同. 为了避免在RNSS (Radio Navigation Satellite Service)载荷故障时RDSS不能正常提供导航服务的情况发生, RDSS系统需要能够仅利用RDSS测距完成GEO测轨, 以此作为原有RNSS测轨的备份保障. 文章进一步分析了这种情况下, 仅利用RDSS测距进行GEO定轨的精度. 通过实测数据分析, 我们发现其精度可优于10 m, 利用该轨道信息的定位、定时精度可以满足服务指标要求.

关键词 RDSS, GEO, 定轨

PACS: 95.10.Eg, 91.10.Fc, 91.10.Sp

1 引言

北斗三号卫星导航系统(Beidou System: BDS-3)已于2018年底开始逐步具备全球服务能力^[1,2]. 基于3颗GEO、3颗IGSO和24颗MEO卫星组成的混合星座的空间段架构, BDS既提供类似于GPS的无源服务模式RNSS (Radio Navigation Satellite Service), 同时兼容了北斗二号的有源服务模式RDSS (Radio Determination Satellite Service). 新一代RDSS服务在原有利用

GEO卫星的短报文、位置报告和有源导航服务的基础上, 不仅新增了多种短报文功能、搜救服务能力和兼容RNSS测量的广义RDSS定位功能^[3,4], 还在IGSO和MEO卫星新增了全球短报文载荷, 将RDSS服务区域拓展到全球范围. 目前, RDSS已广泛应用于通信、交通、电力、搜救等需要快速位置信息和高精度时间同步的系统之中. 随着物联网、智慧城市等新兴技术的发展, RDSS尤其是其全新的广义RDSS服务能力, 将有机会开展深度应用开发.

引用格式: 邢楠, 唐成盼, 李晓杰, 等. 北斗三号GEO卫星的RDSS定轨精度分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019510

Xing N, Tang C P, Li X J, et al. Precision analysis of BDS-3 GEO satellite orbit determination using RDSS (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019510, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0233](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0233)

RDSS的主要工作流程是用户接收由GEO卫星转发自主控站的信号, 根据需要发送导航服务请求或短报文信息, 经由GEO卫星回传至主控站, 再由主控站综合多颗卫星回传的数据进行集中式处理, 最后将导航计算结果或其他通信信息组帧发送给用户. 其中, 导航服务包括有源定位和有源定时服务. RDSS导航服务的实现不仅依赖于用户回传信号的距离测量, 同时还需要GEO星历、电离层改正模型等信息. 这些信息都要利用RNSS系统的测量数据计算得到. 虽然RDSS和RNSS使用相同的GEO卫星和地面跟踪系统, 但是具体的卫星载荷和信号处理设备并不相同. 如果出现RNSS设备故障, 例如某颗GEO卫星的RNSS载荷故障, RNSS系统服务可以通过将对应卫星标识为不健康而避免影响, 而RDSS仅依赖3颗GEO卫星提供服务, 一颗GEO轨道信息的缺失就会使得对应的服务区域导航服务瘫痪. 为了提高健壮性, 系统需要增加利用RDSS测量数据的GEO定轨能力, 使得系统可以仅依赖RDSS设备独立运行^[5].

RDSS测量是经过两颗卫星和监测接收机的转发完成的四程测量, 这与RNSS的测量模型有很大不同. 一方面, 其测量模型相对于RNSS测量更加复杂, 尤其是转发过程中涉及的设备时延数目众多, 其标校精度严重影响定轨精度. 但另一方面, RDSS四程测距本身不包含卫星钟差和测站钟差, 在定轨时避免了如RNSS伪距定轨时出现的由GEO卫星静地特性导致的轨道和钟差的强相关性. 因此, 恰当地选择定轨策略仍能保证定轨精度.

同时, 新一代RDSS全面升级了信号体制, RDSS测量模型从信号噪声到硬件延迟等多方面都较原北斗二号系统有不同程度的优化. 因此本文针对三号的RDSS测距特征提出了仅利用RDSS测距进行GEO定轨, 同时解算设备时延的定轨方法, 并分析了轨道预报误差对于有源定位、有源定时精度的影响.

2 RDSS测距数据误差分析

2.1 RDSS测量模型

RDSS有源定位和有源定时的测量基础是RDSS测距数据. 它是由主控站(MCC)的信号收发设备测量得到的四程测距值 ρ , 具体测量模型为

$$\begin{cases} \rho = D_{Co} + D_S + D_L + D_{Ci} + T \cdot c + \varepsilon, \\ T = \tau_{Mo} + \tau_{So} + \tau_{usr} + \tau_{Si} + \tau_{Mi}, \\ D = |\mathbf{r}_S - \mathbf{r}| + d_{ion} + d_{trop}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, D_{Co} 表示主控站发射设备定时发送C波段多波束出站信号到达GEO的传播距离, D_S 为从出站GEO转发S波段信号到用户的距离, D_L 为用户发出L波段服务申请信号到入站GEO卫星的距离, D_{Ci} 为GEO转发C波段信号回到主控站的距离. 计算传播距离 D 主要需要考虑卫星(位置由 $\mathbf{r}_S$ 表示, 对应的 D_{Co} 和 D_S 表示出站卫星位置, 对应的 D_L 和 D_{Ci} 表示入站卫星位置)到地面设备(位置由 $\mathbf{r}$ 表示, 对应的 D_{Co} 和 D_{Ci} 表示主控站位置, 对应的 D_S 和 D_L 表示用户位置)几何距离以及传播过程中的对流层 d_{trop} 和电离层时延 d_{ion} .

ρ 的测量是由主控站的收发设备在同一时频系统的驱动下实现的, 因此测量中不存在钟差. 但是在信号经过地面和卫星各设备传输过程中都存在设备时延 T (c 为光速), 其中包括地面发射时延 τ_{Mo} 、地面接收时延 τ_{Mi} 、卫星出站转发时延 τ_{So} 、卫星入站转发时延 τ_{Si} 和用户设备时延 τ_{usr} . ε 为测量噪声.

RDSS测距修正的系统误差主要包括电离层、对流层延迟模型误差和硬件延迟标校误差. 北斗三号基本延续了北斗二号的处理方法, 使用RNSS导航信息建立理论测量模型. 在此基础上, 三号还增加了利用RDSS测量数据计算相关信息的能力, 以此作为备份手段.

对于电离层延迟的改正, 北斗二号主要采用系统播发的Klobuchar14参数模型, 而北斗三号的电离层延迟主要采用BDSSH 9参数模型, 两者精度相仿, 修正精度优于5TECU. 对于RDSS测量来讲, 其四程信号先后为C波段上行信号、S波段下行信号、L波段上行信号和C波段下行信号. 电离层误差与信号频率的平方呈反比, 因此C波段的模型修正误差大约为5–10 cm, S波段模型修正误差大约为30 cm, L波段模型修正误差与RNSS相仿, 大约为80 cm.

对于对流层延迟的改正, 在定位处理时与北斗二号采用相同的Hopfield模型处理, 对流层模型与频率无关, 因此四程测距中修正精度一般为20 cm左右. 在定轨处理时采用Saasmoinen模型, 修正精度为15 cm左右^[6].

硬件延迟是影响有源定位和有源定时服务精度的最重要参数. 硬件设备的时延值在出厂时是经过严格

标定的,但由于设备安装,线缆受温度、老化等因素的影响,利用出厂值修正该延迟量,精度可能达到几十 ns. 这个量级是不能接受的. 而安装后再进行离线标定会影响系统正常工作,且在卫星段的设备时延在卫星发射后也不可能再标定. 因此,在定轨处理时硬件延迟需要作为待估参数和其他参数一同估计.

2.2 RDSS测量噪声

为了增强通信服务能力,新一代RDSS采用了不同的信号调制方式,更集中的波束也使落地功率更强. 因此测量噪声与北斗二号相比有了明显提高. 图1给出了测距O-C在扣除系统误差后的噪声分布情况,其中标出了布设在北京、海南和新疆的三个站的测量噪声分别为2.02、1.99和1.73 m. 与北斗二号4 m的信号噪声水平^[5]相比,北斗三号的信号噪声水平在2 m左右,较北斗二号有了大幅度提高.

3 基于RDSS测距的GEO定轨精度

3.1 RDSS动力学定轨算法

RDSS测量涉及的出站和入站两颗GEO卫星可能是不同卫星,如果仅对于单颗卫星进行定轨处理,则另一颗卫星的轨道需要预先确定,而其轨道误差会污染目标卫星的轨道. 因此定轨策略宜选择多颗GEO卫星联合求解的方式. 本文试验数据选取的时段,只涉及北斗三号系统的PRN59和PRN60两颗GEO卫星.

与RNSS测量数据相比,RDSS测量中没有卫星钟差和测站钟差. 而在常规的利用RNSS测量进行动力学定轨时,在3 d的定轨弧段里,单历元的卫星钟差和接收机钟差参数个数可达到10万多个. 为了将这些钟差参数与方程中其他参数解耦,从而降低方程维度,也需要进行大量的矩阵运算. 相比之下,RDSS测量的优势明显,在进行定轨处理时,运算时间也会显著提高.

如前文所述,设备时延误差是RDSS测量中最重要误差,由于地面发射设备的硬件时延与卫星出站转发时延是强相关的,因此作为一个参数进行求解. 类似地,地面接收设备的硬件时延与卫星入站转发时延作为同一个参数. 由于GEO卫星与地球相对静止,利用RDSS或RNSS数据进行精密定轨卫星轨道与设备零值或卫星钟差相关性高. 这两类参数需要作为全局参

数与GEO卫星轨道一同求解. 在北斗二号系统中,一颗卫星转发两个波束的信号. 为了同时处理多用户数据,一个波束同时利用24个解调单元处理,而不同解调单元的硬件时延并不相同,因此,再加上出站的硬件时延,一个卫星就存在50个硬件时延参数,而且对于同一个用户,每次入站时经过的解调单元是随机的. 这些都对硬件时延的标校带来很大的困难,影响了标校精度. 在北斗三号系统中,一颗卫星转发6个固定小波束,代替了以前的两个,以保障全服务区的覆盖. 虽增加了波束总数,但无论出站还是入站地面设备,处理一个波束的多通道硬件时延一致性有了很大提高,可以作为一个时延参数处理. 由此单个卫星的硬件时延参数减少至12个,从而大大降低了数据处理的复杂度.

多星动力学定轨处理中的其他动力学模型参考了基于RNSS测量数据的卫星定轨策略^[7]. 除地球中心引力外,还同时考虑了包括地球非球形引力、日月引力和行星摄动、固体潮、海潮和太阳光压等摄动力,其中地球引力场采用 10×10 阶JGM-3模型,行星历表采用JPL DE403参数,章动模型采用IAU80模型,太阳光压模型采用BERN伯尔尼模型5参数(D, Y, B方向常数加速度及B方向正、余弦加速度)模型^[8],定轨弧长为3 d,定轨输入观测量包括RNSS伪距、载波相位和RDSS测距. 前文提到每组出站和入站设备时延均作为全弧段的待估参数,与每组卫星和测站的无周跳弧段的载波相位模糊度、卫星初轨信息和动力学参数一同求解.

3.2 定轨残差和时延稳定度分析

本节给出2020年5月2–6日基于RDSS测距数据的GEO卫星定轨实验结果,监测站布设在北京、海南、广东以及新疆,共5个站,其中北京站时延值已离线精确标定,其余各站的设备时延作为参数与卫星初轨和太阳光压参数同时估计. 在定轨预处理中,除了分别对各RDSS监测站的天线相位中心进行改正,GEO卫星RDSS转发器天线相位中心也归算到了卫星的质量中心. 图2给出了5个站的定轨残差. 从图中看出,RDSS测距残差基本接近于常数,一方面由于GEO的静地特性,另一方面也说明各站设备时延都很稳定. 图例中标出了残差的均方根误差值,所有测站均优于5 ns,比北斗二号RDSS设备时延10 ns的标校精度明显提高^[9]. 因此该残差既可以作为我们评估设备时延的解算精度的依据,也可以作为监测手段.

图 1 (网络版彩图) 北斗三号RDSS设备噪声分布
Figure 1 (Color online) The RDSS receiver noise distribution of BDS-3.

图 2 (网络版彩图) 2020年5月2–4日仅利用RDSS测距进行 GEO定轨的测距残差

Figure 2 (Color online) Ranging residuals of GEO satellite orbit determination only with RDSS in May 2nd–4th, 2020.

3.3 定轨精度分析

以RNSS定轨结果作为基准, 我们比较了仅以RDSS测距数据定轨的轨道精度和预报误差. 图3给出了2020年5月2–4日PRN59和PRN60两颗卫星的定轨结果, 其中实线、虚线和点划线分别表示径向、切向和法向的轨道误差. 由此看出, 径向误差可以优于0.5 m, 法向的轨道误差也优于1 m, 但是切向误差较大, 达到3 m左右. 另外3 d的定轨弧段在图中以竖实线表示, 紧随其后的竖虚线给出的是预报1 h的位置. 可以看出, 预报1 h后轨道精度的衰减并不大, 量级与定轨弧段相仿.

轨道误差主要来自于两个方面. 首先, RNSS定轨时使用了双频伪距和载波相位数据, 伪距测量噪声为

图 3 (网络版彩图) 2020年5月2–4日RDSS定轨及预报精度. (a) PRN59; (b) PRN60

Figure 3 (Color online) Precision of orbit determination and prediction only with RDSS in May 2nd–4th, 2020. (a) PRN59; (b) PRN60.

30 cm左右, 载波相位的测量噪声为2 mm左右, 均远高于RDSS的2 m测量噪声水平. 而且双频组合可以很好地消除电离层延迟, 而RDSS的电离层延迟修正仅能依赖模型. 同时对流层模型的改正精度是RNSS的四倍, 因此在介质延迟的改正精度上也差于RNSS.

另外, 由于GEO卫星的静地特性, 仅利用境内测站进行定轨, 其几何构型有局限性. 其中, RDSS测量与轨道的径向方向的相关性达到0.98左右, 而依法向方向和切向方向的相关性很小, 尤其是切向方向最小. 这导致测量数据的误差在切向方向上放大最严重.

根据5 d定轨精度的统计结果(见表1), 部分时段切向误差会出现接近10 m. 同时表1给出了预报1 h的轨道精度, 数值与定轨弧段变化不大. 随着预报时间增加, 精度衰减也主要在切向方向比较明显.

综合上述分析还可以看出, 轨位在东经84°的60号星的定轨结果显然好于轨位在东经140°的59号星的定轨结果. 这主要是由于境内测站大约分布在东经75°–125°, 因此, 相对于59号星, 60号星的测站几何构型更优. 据此, 轨位在东经110°的61号星发射后, 仅用RDSS测距对于其定轨的精度预计与60号星相当.

本文用于定轨的RDSS监测站只有5个, 而RNSS

表 1 定轨和预报精度统计

Table 1 Precision of orbit determination and prediction

星号		径向 R (m)	切向 T (m)	法向 N (m)
PRN59	定轨	0.48	7.16	0.55
	预报	0.25	7.50	0.46
PRN60	定轨	0.35	1.08	0.75
	预报	0.39	1.59	0.44

监测站为7个,除了与RDSS相同站址的5个外,还增加了成都和哈尔滨两个站,因此作为轨道基准的RNSS定轨使用的监测站在几何构型上略好于RDSS.不过随着系统的不断完善,RDSS最终将与RNSS采用完全相同的测站,因此从几何构型角度讲,两类测量将没有差别.

4 轨道误差对于RDSS导航服务的影响

在RDSS导航处理时,轨道预报误差是影响服务精度的主要误差之一.RDSS系统中轨道的计算在正常情况下是利用RNSS测量计算的卫星星历参数进行预报.北斗三号新增的星间链路大幅提高了轨道确定和轨道预报精度,预报精度从20 cm提高到10 cm左右^[10,11].根据第3节的计算,仅利用RDSS数据定轨时,精度会下降到10 m量级,因此有必要分析该差异对于导航服务的影响.

RDSS导航服务主要包括有源定位、有源定时和广播授时.下面将分别分析轨道误差对这三类服务的影响.

4.1 轨道误差对于RDSS有源定时的影响

有源定时的原理与双向时频比对原理类似,是利用同一颗卫星出入站的RDSS测距,通过计算双向O-C的一半作为单向测距的系统误差改正值,得到用户设备的实际钟差并播发给用户,从而使用户能够根据该参数进行本机的时间校正.有源定时的精度优于10 ns^[12].由于出站和入站有卫星转发信号的时间间隔仅为0.25 s左右,期间轨道误差的变化很小,对于出站和入站两者的影响基本一致,因此可以很好地被吸收到上述的系统误差改正值中,对于有源定时基本没有影响.

4.2 轨道误差对于RDSS广播授时的影响

广播授时是指在RDSS电文中发播了包括卫星位置、速度、出站上行时延以及介质改正模型参数,因此用户可以根据这些参数计算出设备与主控站的时间差.由于不能像有源定时一样修正系统误差,广播授时的精度在50 ns以内.轨道误差对于广播授时的影响大约为2倍轨道径向误差值.因此根据前文对于轨道误差的分析,按照0.5 m径向误差估算,该影响大约为3 ns.

4.3 轨道误差对于RDSS有源定位的影响

有源定位的原理是利用多颗卫星的RDSS测距,建立有关用户位置的方程,然后进行定位解算.影响有源定位的基本因素与无源定位相似,主要受测量数据的误差修正精度以及与卫星星座几何构型有关的位置几何因子(Position Dilution of Precision, PDOP)影响.

关于测距数据的误差修正精度,我们已经在第2节讨论过.在仅使用RDSS测距数据定轨时,轨道误差对于有源定时的影响主要体现在误差修正精度中,具体量级与轨道对广播授时的影响一致,大约为2倍的轨道径向误差,即1 m左右.

RDSS服务虽然仅依赖GEO卫星提供服务,但是在建立方程时,会增加高程信息.通过高程方向的约束,有源定位的PDOP值和RNSS服务的情况接近.根据北斗三号目前的星座,对于三号用户是利用3颗GEO卫星提供服务,而对于既有北斗二号用户仍然是利用5颗GEO卫星提供服务.因此对于北斗三号用户PDOP为2.6左右,对于既有二号用户为2.2左右.目前仅两颗GEO卫星可用的情况下PDOP大约为2.7.

建立方程时增加的高程信息,可以由具备自测高程的用户接收机将其高程信息直接告知主控站.这类高程信息可认为精度较高,但对于用户接收机不具备自测高功能时,建模需要查询高程库,因此这类用户的定位误差还包含高程库误差的影响^[13].

我们将利用前文RDSS测距数据得到的定轨结果,与利用RNSS数据得到的定轨结果分别应用于有源定位,并将定位结果进行比较(详见表2).我们发现利用RDSS轨道的定位结果比利用RNSS轨道的精度略有下降.由于轨道误差主要集中在切向上,因此引起了较大的东西方向的误差.但综合来看,定位结果仍能满足水平20 m的定位指标要求.

表 2 基于RDSS轨道和RNSS轨道的定位误差比较

Table 2 Comparison between positioning error with RDSS orbit and RNSS orbit

用户机位置	基于RDSS轨道的定位误差		基于RNSS轨道的定位误差	
	东向 (m)	北向 (m)	东向 (m)	北向 (m)
北京	8.13	2.07	5.66	1.85
海南	9.67	6.28	4.47	6.22
新疆	7.73	2.92	5.23	2.59

5 结论

相比于RNSS伪距和载波相位测量量, RDSS测距虽然测量噪声较大、涉及的模型复杂,但是具有没有卫星钟差和测站钟差的独特优势. 在将出站和入站设备时延分别合并处理作为全局变量估计后,仍能够作为有效的测轨手段独立使用进行定轨.

随着信号调制方法、波束播发方式等方面的全面升级,全新的RDSS信号体制使RDSS测距噪声大幅降低. 同时,硬件时延更好的一致性和更简单的组合模型也让建模估计更加准确,可以达到优于5 ns的确定精度. 因此,本文为在线实时标定RDSS硬件时延提供了一种思路.

基于RDSS测距的这些条件,本文尝试了仅利用

RDSS测距数据进行GEO卫星定轨. 实验结果显示,三维定轨精度优于10 m,预报1 h误差不超过10 m.

定轨误差以及预报误差在切向方向较大,这主要源于RDSS测量与GEO卫星轨道的径向方向是强相关的,而对于其他两个方向尤其是切向的约束略差. 另外由于59号星的轨位相对测站分布偏东,其定轨精度明显差于60号星.

最后分析了10 m的定轨精度对于导航服务的影响. 该影响主要体现在有源定位和广播授时中,而对于有源定时影响不大. 根据实测数据计算,对于定位的影响仅为6 m左右,仍能保证水平20 m、高程20 m的定位指标要求. 因此, RDSS测距定轨可以作为RNSS提供的轨道信息的备份,从而提高系统的独立性和健壮性.

参考文献

- 1 Yang Y X, Xu Y Y, Li J L, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61: 614–624 [杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 584–594]
- 2 Chen J P, Hu X G, Tang C P, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 269511
- 3 Tan S S. Theory and application of comprehensive RDSS position and report (in Chinese). *Acta Geodaet Cartograph Sin*, 2009, 1: 5–9 [谭述森. 广义卫星无线电定位报告原理及其应用价值. 测绘学报, 2009, 1: 5–9]
- 4 Tan S S. The Comprehensive RDSS Global Position and Report System (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2011 [谭述森. 广义RDSS全球定位报告系统. 北京: 国防工业出版社, 2011]
- 5 Qu W J, Zhu W Y, Song S L, et al. The evaluation of precision about Hopfield, Saastamoinen and EGNOS tropospheric delay correction model (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2008, 49: 115–124 [曲伟菁, 朱文耀, 宋淑丽, 等. 三种对流层延迟改正模型精度评估. 天文学报, 2008, 49: 115–124]
- 6 Xing N, Su R R, Zhou J H, et al. Analysis of RDSS positioning accuracy based on RNSS wide area differential technique. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2013, 56: 1995–2001
- 7 Tang C, Hu X, Zhou S, et al. Initial results of centralized autonomous orbit determination of the new-generation BDS satellites with inter-satellite link measurements. *J Geod*, 2018, 92: 1155–1169
- 8 Li R, Hu X G, Tang C P, et al. Modeling and precision analysis of solar radiation pressure for BDS hybrid constellation (in Chinese). *Geomat*

- Infor Sci Wuhan Univ: Infor Sci, 2018, 43: 1063–1070 [李冉, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗卫星导航系统混合星座的光压摄动建模和精度分析. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, 43: 1063–1070]
- 9 Liu J, Li H F, Zhu X H, et al. Research on two-way zero test method of RDSS receiver (in Chinese). *Sci Survey Mapp*, 2014, 39: 135–138 [刘婧, 李海峰, 朱新慧, 等. RDSS接收机双向零值测试方法的探讨. 测绘科学, 2014, 39: 135–138]
 - 10 Guo R, Hu X G, Tang B, et al. Precise orbit determination for geostationary satellites with multiple tracking techniques. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 687–692 [郭睿, 胡小工, 唐波, 等. 多种测量技术条件下的GEO卫星定轨研究. 科学通报, 2010, 55: 428–434]
 - 11 Tang C P, Hu X G, Zhou S S, et al. Centralized autonomous orbit determination of Beidou navigation satellites with inter-satellite link measurements: Preliminary results (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 029501 [唐成盼, 胡小工, 周善石, 等. 利用星间双向测距数据进行北斗卫星集中式自主定轨的初步结果分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 029501]
 - 12 Wang D X, Guo R, Xin J, et al. Performance evaluation of RDSS timing service for Beidou system (in Chinese). *Sci Survey Mapp*, 2019, 44: 132–141, 148 [王冬霞, 郭睿, 辛洁, 等. 北斗RDSS授时服务性能评估. 测绘科学, 2019, 44: 132–141, 148]
 - 13 Yuan Y L, Huang J, Tao J. A Beidou RDSS positioning model and its error analysis without elevation (in Chinese). *Computer Appl Software*, 2017, 34: 114–118 [原玉磊, 黄杰, 陶静. 一种北斗无高程RDSS定位模型及其误差分析. 计算机应用与软件, 2017, 34: 114–118]

Precision analysis of BDS-3 GEO satellite orbit determination using RDSS

XING Nan^{1,2*}, TANG ChengPan³, LI XiaoJie⁴, ZHANG TianQiao⁴, REN Hui⁴,
GUO Rui⁴ & HU XiaoGong³

¹ Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China;

³ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

⁴ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

Providing communication and navigation services simultaneously using the radio determination service system (RDSS) is one of the significant and unique features of the Beidou navigation satellite system (BDS). In order to further enhance the service capabilities and ensure the service robustness, the RDSS system of BDS-3 has been significantly improved from system architecture to signal system. In this study, error characteristics of the RDSS with a new signal system are analyzed considering both measurement model and observation noise. Then, the results are compared with those of the BDS-2 system. It is found that in order to avoid the failure of the RDSS navigation service during the radio navigation satellite service load breakdown, the RDSS system needs to have independent orbit determination ability. Furthermore, precision of the GEO orbit determination is analyzed when only the RDSS is employed. Analyzing the measured data reveals that the orbit determination accuracy would be better than 10 m, where positioning and timing accuracy can meet the service requirements.

RDSS, GEO, orbit determination

PACS: 95.10.Eg, 91.10.Fc, 91.10.Sp

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0233](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0233)