

## 2013—2015年 BDS 空间信号测距误差的精度评估\*

刘万科<sup>1,2</sup>, 任杰<sup>1</sup>, 曾琪<sup>1</sup>, 吴云<sup>1</sup>, 楼益栋<sup>3</sup>

(1. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北武汉 430079;

3. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北武汉 430079)

**摘要:**基于武汉大学发布的精密星历,计算2013年1月至2015年9月北斗广播星历的轨道、钟差和空间信号测距误差,并对其进行统计分析评估。结果表明:北斗卫星的径向精度总体上优于0.7 m,法向精度总体上优于1.4 m,且无明显的长期变化趋势;在切向精度上,倾斜地球同步轨道和中轨道优于2.1 m,高轨道的切向精度已从14 m左右提升至8 m左右;北斗高轨道、倾斜地球同步轨道、中轨道的钟差精度分别为6.3 ns, 4.7 ns, 4.3 ns;所有卫星的钟差精度总体上优于6 ns;所有卫星的空间信号误差精度总体上优于2 m,从长期来看,中轨道卫星的空间信号误差精度较为稳定;倾斜地球同步轨道和高轨道卫星的空间信号误差精度存在一定的波动。

**关键词:**北斗;广播星历;空间信号测距误差;精度评估

**中图分类号:**P228.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1001-2486(2016)03-001-06

## Accuracy assessment of BDS signal-in-space range errors in 2013—2015

LIU Wanke<sup>1,2</sup>, REN Jie<sup>1</sup>, ZENG Qi<sup>1</sup>, WU Yun<sup>1</sup>, LOU Yidong<sup>3</sup>

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China;

3. GNSS Research Centre, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Based on precise ephemeris provided by Wuhan University, BDS(BeiDou navigation satellite system) broadcast ephemeris errors were computed over the past three years from January 2013 to September 2015. The orbit errors, clock errors, and SISREs (signal-in-space user range errors) are presented and analyzed in different time periods for assessment. Results show that the radial accuracy of overall BDS satellites is less than 0.7 m and the normal accuracy of that is less than 1.4 m. Additionally, no obviously long term trends are found in both radial and normal errors. In term of along-track errors, the accuracies of IGSO (inclined geo synchronous orbit) and MEO (medium earth orbit) satellites are all less than 2.1 m and the along-track accuracy of GEO (geosynchronous earth orbit) is improved from 14 m to 8 m. The clock accuracies of GEO, IGSO and MEO are 6.3 ns, 4.7 ns and 4.3 ns respectively, and the clock accuracies of all satellites are more than 6 ns. The SISREs of all satellites are generally less than 2 m, and the SISREs of MEO satellites are relatively stable over the past 3 years. However, IGSO SISREs and GEO SISREs have some fluctuations in certain level.

**Key words:** BeiDou; broadcast ephemeris; signal-in-space user range errors; accuracy assessment

空间信号测距误差 (Signal-In-Space user Range Errors, SISRE) 主要包括卫星轨道误差和钟差两部分,其精度直接影响卫星导航定位精度<sup>[1-2]</sup>。因此,对导航卫星所播发的轨道和钟差开展评估分析对于评估卫星导航系统的基本服务性能具有重要意义,其精度信息也将用于全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 接收机自主完备性监测中的观测值名义误差的计算<sup>[1,3]</sup>。

2012年底北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite System, BDS) 正式运行,开始向亚太大部分地区提供定位、导航、授时等服务<sup>[4]</sup>。目前国内外在 GPS 广播星历的空间信号误差评估分析方面成果丰富<sup>[5-6]</sup>,而对 BDS 空间信号误差的评估分析成果较少。部分文献<sup>[7-11]</sup>主要对 BDS 试运行期间的广播轨道、钟差开展了短期的初步评估,但不能代表 BDS 正式运行后的情况;也有部分文献<sup>[1,12-14]</sup>对 BDS 正式运行初期的广播星历

\* 收稿日期:2015-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41304005,41374034);湖北省自然科学杰出青年基金资助项目(2015CFA039)

作者简介:刘万科(1978—),男,陕西扶风人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:wkliu@sgg.whu.edu.cn

精度等进行了简要的统计分析,得到了一些有益的结论。总体来看,目前对 BDS 空间信号误差的评估研究还不够系统、全面,而且有些文献并没有区分 BDS 与 GPS 的 *SISRE* 计算公式之间的差异;同时,也鲜有相关文献对 BDS 正式运行以来广播轨道和钟差的长期性能及随时间的演变规律等开展较为深入的研究,这些在一定程度上影响了 BDS 相关技术研究及其推广应用。

## 1 广播星历空间信号误差的评估方案

以精密星历作为参考值来评估广播星历的不同空间信号误差精度,评估期为 2013 年 1 月至 2015 年 9 月,统一以 15 min 为间隔进行轨道和钟差评估。

### 1.1 星历数据

BDS 广播星历主要基于国内布设的地面监测站进行轨道计算和预报,并按照 1 h 间隔发布。分析时,由于无法从国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)的多 GNSS 实验网(Multi-GNSS EXperiment, MGEX)获取评估期 A 内的所有 BDS 广播星历数据,所以 2013 年 3 月至 2015 年 9 月(记为评估期 B,下文相同)的广播星历由 MGEX 提供,而 2013 年 1—2 月的 BDS 广播星历数据则采用武汉大学北斗实验跟踪站网(BeiDou Experimental Tracking Stations, BETS)所记录的广播星历数据。需要说明的是,从 BETS 下载的星历数据中只含有星上设备时延差参数  $tg d_1$ ,而从 MGEX 获取的星历数据则含有  $tg d_1, tg d_2$  两个参数<sup>[15]</sup>。同时,从 2014 年 3 月中旬开始北斗 C13 卫星一直处于暂停服务状态,所以对其分析只限于前期的正式运行阶段。

参考星历选用的是由武汉大学发布的武汉大学多系统产品(Wuhan University Multi-GNSS, WUM)精密星历,其基于分布在亚太地区的 BETS 监测站和部分 MGEX 测站的观测数据采用 PANDA 软件计算而来<sup>[12, 14, 16]</sup>。根据 48 h 的重叠弧段分析以及卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)的检核结果来看,WUM 精密星历的径向精度优于 10 cm<sup>[16]</sup>,比目前 BDS 广播星历的精度高出 1~2 个数量级,因此可以将此精密星历作为参考值来评估 BDS 广播星历。

### 1.2 数据龄期统计

为了实现北斗卫星全弧段广播产品的评估,采用来自 MGEX 网站的广播星历产品,其北斗广播星历是综合国内外地面站所接收的导航电

文形成的。由于北斗只有区域注入能力,所以其部分电文的龄期可能会高于境内站,这会在一定程度上影响到本文的评估分析结果。为了使评估结果更具参考价值,表 1、表 2 给出评估所用的广播星历参数的龄期 *AODE* (Age Of Date Ephemeris)和 *AODC* (Age Of Data Clock) 统计分布情况。

表 1 BDS 导航电文 *AODE* 统计分布

Tab. 1 Statistical distribution of *AODE* for BDS

卫星	<i>AODE</i> 分布		
	<i>AODE</i> = 1 h	1 h < <i>AODE</i> ≤ 6 h	6 h < <i>AODE</i> ≤ 24 h
GEO	99.20	0.77	0.03
IGSO	76.66	22.96	0.38
MEO	14.35	23.79	61.86

表 2 BDS 导航电文 *AODC* 统计分布

Tab. 2 Statistical distribution of *AODC* for BDS

卫星	<i>AODC</i> 分布		
	<i>AODC</i> ≤ 1 h	1 h < <i>AODC</i> ≤ 6 h	6 h < <i>AODC</i> ≤ 24 h
GEO	99.97	0.03	0.00
IGSO	84.97	14.82	0.21
MEO	44.65	27.56	27.79

从统计结果来看, *AODE* 和 *AODC* 几乎不会超过 24 h。

### 1.3 数据质量控制

#### 1.3.1 广播星历参数的预处理

在广播星历二进制数据流的接收、解码过程中可能出现误码等现象,导致提供的与接收机无关的交换格式(Receiver INdependent EXchange format, RINEX)的广播星历参数出现相应的错误,并最终影响评估结果。因此,在评估前,应用文献[17]的处理方法,对整个评估期的 330 917 组广播星历参数进行了预处理,发现出现上述错误的广播星历组数为 6842,约占总星历组数的 2.1%。

#### 1.3.2 粗差标定

虽然进行了上述预处理,但还是会有部分星历出现明显的粗差进而影响评估结果,因此对轨道分量误差  $dR, dT, dN$  和钟差分量误差  $\Delta t$  均设置 10 m 的阈值进行粗差剔除。由于高轨道(Geosynchronous

Earth Orbit, GEO)的法向精度较差,其分量粗差剔除阈值设为 $50 \text{ m}^{[1]}$ 。从结果来看,整个分析期间的粗差别除率为4.8%,如果不考虑2013年1月和2月的数据,则剔除率仅为2.7%。

#### 1.4 时空基准统一

北斗广播星历和精密星历使用的坐标参考框架和时间系统均不一样,因此在进行轨道和钟差比较分析之前必须统一坐标参考框架和时间系统。

北斗导航系统采用了中国2000大地坐标系(CGCS2000)。但由于CGCS2000暂不能提供高精度的点位速度信息,也暂不能对用于北斗广播星历更新的地面监测站坐标进行动态(或准动态)更新<sup>[18]</sup>,而只能数年更新一次,板块运动及其他系统误差将不可避免地影响地面监测站的坐标精度<sup>[19]</sup>,使得其与ITRF2008在2012—2015年期间的坐标差异可能达到数厘米甚至更大,进而影响卫星轨道的测定精度和卫星星历的精度。在本文的评估中并没有考虑此项偏差带来的影响,因此在后续给定的评定结果中,实际上包括了上述坐标框架偏差所带来的误差。

BDS广播星历钟差是基于北斗军用时频B3I频点观测数据进行估算并以北斗时(BeiDou Time, BDT)提供的,而WUM北斗精密星历是基于独立于军用时频的BETS监测站接收机所采集的B1I,B2I双频无电离层组合观测值计算并以GPS时(GPS Time, GPST)提供的<sup>[1, 10]</sup>。因此,为了方便两种钟差的比较,首先将比较的时间系统统一为GPST;其次对BDS广播星历发布的钟差经两个频率的设备群时延差(Timing Group Delay, TGD)组合改正归算至与精密星历相同的频率上<sup>[15]</sup>;再次求二次差,以消除钟差计算时选择的基准站(钟)不同所带来的时间基准差异,实际上利用该方法评估的是星座内的时间同步能力。具体见式(1):

$$\begin{cases} \Delta t^i = dt^i - \mu \\ dt^i = T^i - t^i - \text{tgd}_{\text{brdc},p}^i \\ \text{tgd}_{\text{brdc},p}^i = \frac{f_{\text{B1}}^2}{f_{\text{B1}}^2 - f_{\text{B2}}^2} \cdot \text{tgd}_1 - \frac{f_{\text{B2}}^2}{f_{\text{B1}}^2 - f_{\text{B2}}^2} \cdot \text{tgd}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\Delta t^i$ 表示第*i*颗卫星的钟差误差, $dt^i$ 表示经过双频群延迟tgd改正后的精密星历钟差 $T^i$ 和广播星历钟差 $t^i$ 一次差, $\mu = \sum_{i=1}^n dt^i$ 表示对所有卫星的 $dt^i$ 取均值。

#### 1.5 卫星天线相位中心偏移改正

由于广播星历计算得到的卫星位置一般是相

对于卫星的天线相位中心,而精密星历一般是相对于卫星质心的,因此二者进行比较之前需要进行天线相位中心偏差改正。到目前为止,官方还没有公布北斗卫星的天线相位中心偏差改正参数,但从Oliver Montenbruck前期的分析来看,质心与相心较为接近<sup>[1]</sup>,因此本文取偏差为(0,0,0)。

#### 1.6 广播星历精度评价指标

空间信号测距误差SISRE是一个评估广播星历精度的综合指标,它反映的是计算的卫星位置和钟差与真值之差在视线方向上的综合影响。对于GPS系统来说,由于轨道和钟差是一起计算的,所以其轨道的径向误差和钟差是负相关的<sup>[1,10,14]</sup>,但BDS广播钟差是采用星地双向时间比对方法得到的,其径向和钟差的相关性是很弱的,所以北斗的SISRE计算公式与GPS略有不同<sup>[10,14]</sup>。北斗的SISRE计算公式如式(2)所示。

$$SISRE = \sqrt{(S_1 \cdot dR)^2 + \Delta t^2 + S_2 \cdot (dT^2 + dN^2)} \quad (2)$$

其中, $\Delta t$ 的单位为m。 $S_1$ 表示dR对SISRE沿视线方向的影响因子, $S_2$ 表示dT与dN对SISRE沿视线方向的影响因子,其值大小由轨道高度与高度截止角决定<sup>[10]</sup>;对于地球同步轨道的GEO和IGSO卫星, $S_1 = 0.99$ , $S_2 = 1/127$ ;对于中高轨道的MEO卫星, $S_1 = 0.98$ , $S_2 = 1/54$ 。计算SISRE(orb),以评估轨道各分量的综合影响,公式如式(3)所示<sup>[1]</sup>。

$$SISRE(\text{orb}) = \sqrt{(S_1 \cdot dR)^2 + S_2 \cdot (dT^2 + dN^2)} \quad (3)$$

## 2 广播轨道精度分析

### 2.1 短期趋势分析

自正式运行以来,BDS局域星座主要由5个GEO(C01~C05)、5个倾斜地球同步轨道(Inclined Geo Synchronous Orbit, IGSO)(C06~C10)和4个中轨道(Medium Earth Orbit, MEO)(C11~C14)卫星构成。为分析正式运行期间BDS空间信号误差的短期精度和变化特征,此处选取了2015年4月11日(年积日101)至17日(年积日108)共一周的数据进行分析。限于篇幅,图1仅给出C01,C04,C10,C11四颗卫星的dR,dT,dN变化。其中 $R = -0.05 \pm 0.38 \text{ m}$ ,表示径向误差dR的平均值为-0.05m,标准差为0.38m(下同)。

从图1可以看出:C01(GEO),C04(GEO)和C10(IGSO)的轨道误差呈现出与其轨道运行周期

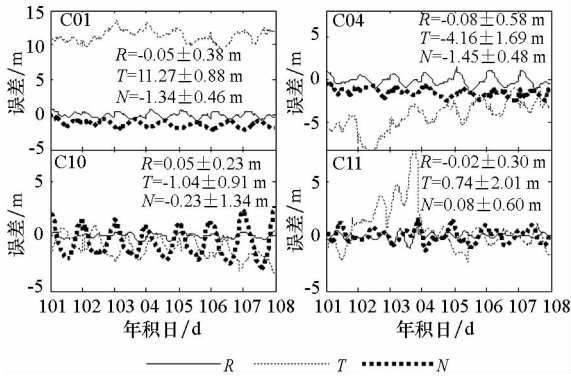


图 1 一周内 C01, C04, C10, C11 广播轨道误差  
Fig. 1 Broadcast ephemeris orbital error of C01, C04, C10, C11 in one week

一致的 24 h 周期特征。径向轨道精度最高,四颗卫星均优于 0.6 m;法向次之,四颗卫星均优于 2 m,切向最差,且波动较大。IGSO 和 MEO 卫星的轨道精度明显高于 GEO 卫星,主要原因是 GEO 卫星相对地面几乎静止,几何构型差,不利于定轨解算。同时,三类卫星径向误差几乎不存在系统偏差,这说明前文将卫星天线相位偏差参数设为 (0,0,0) 是合理的。

对于 C11 卫星切向方向在 103 ~ 104 d 出现的快速增大现象,经大量数据分析发现,所有 MEO 卫星均存在类似的现象,且呈现出约为 7 d 的周期特征,基本与 BDS 的 MEO 卫星的回归周期一致。为了进一步展现该现象,图 2 给出了连续两周 C11 和 C14 的轨道误差。

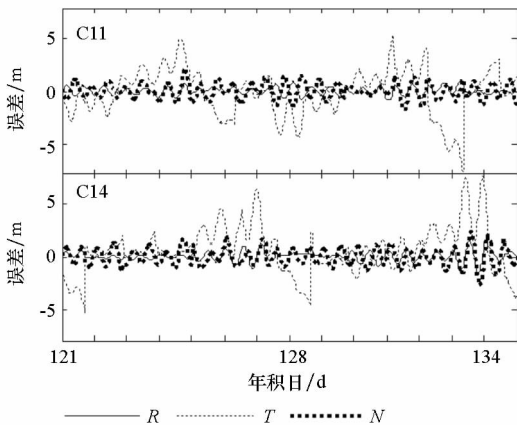


图 2 2015 年 5 月 1 日至 5 月 14 日 C11, C14 广播轨道误差

Fig. 2 Broadcast ephemeris orbit error of C11, C14 from May 1<sup>st</sup>, 2015 to May 14<sup>th</sup>, 2015

### 2.2 长期趋势分析

为了评估正式运行期间 BDS 广播轨道的长期精度及其变化趋势,此处统计分析了评估期 A 内共 34 个月所有可视卫星的轨道误差精度情

况。表 3 给出了径向、切向、法向在评估期 A 内的统计精度均方根(Root Mean Square, RMS)。

在三个方向中,径向精度最好、法向次之,切向最差。相比于 IGSO, MEO 卫星的切向误差保持基本稳定而言, GEO 卫星的切向精度有了一定的变化,其主要是由于 C01, C02, C04 三颗卫星的切向误差变化引起的: C01, C04 的切向系统偏差随时间逐渐减小,但同时 C02 呈现出随时间逐渐增大的趋势,2015 年相比 2013 年的平均偏差增幅约 7 m,具体见表 4。

表 3 评估期 A 内的广播轨道误差的精度 RMS 统计  
Tab. 3 RMS statistics of broadcast ephemeris orbit in evaluation period A

卫星	径向/m	切向/m	法向/m
GEO	0.74	11.81	1.55
IGSO	0.55	1.76	1.44
MEO	0.46	2.06	0.84
ALL	0.62	7.46	1.37

表 4 部分 GEO 卫星不同年份的切向误差统计

Tab. 4 Tangential errors statistics of broadcast ephemeris orbit for partial GEO in different years

卫星	2013 年	2014 年	2015 年
C01	25.4 ± 13.2	22.5 ± 9.9	6.0 ± 4.0
C02	-5.1 ± 2.8	-10.8 ± 2.8	-12.1 ± 2.9
C04	10.0 ± 4.4	3.1 ± 7.8	-1.9 ± 5.7
GEO	4.7 ± 12.5	1.5 ± 12.8	-2.9 ± 6.9

### 3 广播钟差精度分析

图 3 右侧的子图为左图局部时段的放大。由图 3 可以看出,三颗卫星的钟差误差绝大部分情况下在 10 ns 以内波动,且在部分时候有一定的跳跃现象<sup>[10]</sup>,这主要是因为精密钟差和广播钟差

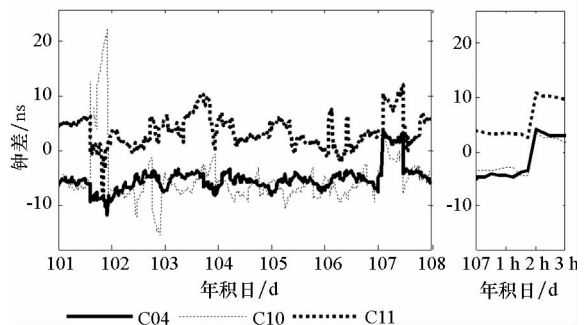


图 3 一周内广播钟差的误差变化

Fig. 3 Broadcast ephemeris clock bias error in one week

的不同解算方法、策略以及广播钟差龄期的变化等引起的;另外 GEO 卫星和 IGSO 卫星均存在较为明显的日周期性现象,与其 24 h 轨道周期有关。

2013 年 1 月、2 月因为北斗广播星历只有 *tgdl1*,没有 *tgdl2*,无法进行完全的硬件群延迟改正,致使三类卫星的钟差均明显大于其他时间,出现系统性偏差,其钟差 *RMS* 超过 20 ns,因此,表 5 的钟差误差统计从 2013 年 3 月开始。

表 5 不同年份北斗广播钟差的精度 *RMS* 统计

Tab.5 *RMS* statistics of BDS broadcast ephemeris clock bias in different years ns

卫星	2013 年	2014 年	2015 年	三年
GEO	6.2	5.9	6.9	6.3
IGSO	3.7	5.0	5.4	4.7
MEO	4.5	4.1	4.5	4.3
ALL	4.9	5.2	5.8	5.3

由表 5 可以看出,所有卫星的总体统计精度约为 5.3 ns;GEO,IGSO,MEO 钟差精度分别为 6.3 ns,4.7 ns,4.3 ns;GEO 钟差精度低于 IGSO 与 MEO。此外,MEO 的钟差精度在三年的比较期内一直较为稳定;GEO 和 IGSO 卫星的钟差精度有一定程度的波动。

#### 4 广播星历空间信号误差的精度分析

仍采用上述实验数据对 BDS 广播星历的空间信号测距误差 *SISRE* 及 *SISRE*(orb) 进行长期评估分析。

图 4 给出了评估期 A 内所有北斗卫星的 *SISRE* 及 *SISRE*(orb) 日精度 *RMS* 的长期变化趋势。表 6、表 7 分别统计了所有北斗卫星的 *SISRE* 及 *SISRE*(orb) 的统计精度 *RMS*。

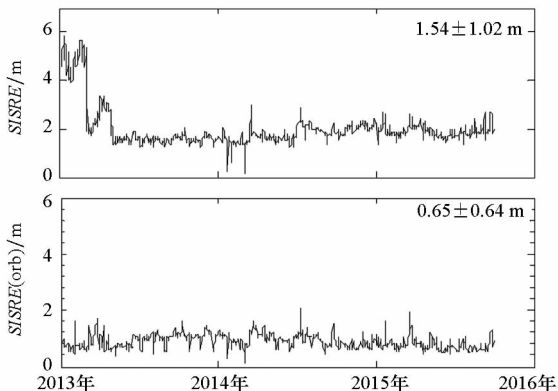


图 4 北斗所有卫星的 *SISRE*,*SISRE*(orb) 的日 *RMS*

Fig.4 Daily *RMS* of overall BDS

表 6 评估期 B 内北斗广播星历 *SISRE* 的 *RMS* 统计

Tab.6 *RMS* statistics of BDS broadcast ephemeris *SISRE* in evaluation period B m

卫星	2013 年	2014 年	2015 年	三年
GEO	2.35	2.25	2.29	2.31
IGSO	1.20	1.61	1.75	1.55
MEO	1.44	1.34	1.47	1.41
ALL	1.78	1.84	1.92	1.85

由于卫星的 *SISRE* 主要受钟差和径向误差影响,因此图 4 中 *SISRE* 的日 *RMS* 呈现出与钟差日 *RMS* 基本一致的变化趋势<sup>[3]</sup>;表 6 所有卫星在评估期 B 内的 *SISRE* 精度为 1.85 m;其中 MEO 的 *SISRE* 精度最高,IGSO 稍差,GEO 最低,分别为 1.41 m,1.55 m,2.31 m。

表 7 评估期 A 内北斗广播轨道 *SISRE*(orb) 的 *RMS* 统计

Tab.7 *RMS* statistics of BDS broadcast ephemeris *SISRE*(orb) in evaluation period A m

卫星	2013 年	2014 年	2015 年	三年
GEO	1.38	1.40	0.98	1.29
IGSO	0.50	0.60	0.65	0.58
MEO	0.52	0.54	0.57	0.54
ALL	0.96	0.97	0.78	0.91

不考虑钟差影响时,所有卫星在评估期 A 内的 *SISRE*(orb) 的精度为 0.91 m,且存在一定的波动,其中 MEO 的 *SISRE* 精度最高,IGSO 稍差,GEO 最低,所对应的 *RMS* 分别为 0.54 m,0.58 m,1.29 m。从长期来看,MEO 卫星和 IGSO 卫星的 *SISRE*(orb) 精度较为稳定;GEO 卫星的 *SISRE*(orb) 精度有较为明显的波动,2015 年较 2013 年总体上提升 0.4 m。

另外,所有北斗卫星在评估期 B 内 *SISRE* 值和评估期 A 内 *SISRE*(orb) 的误差分布情况的统计结果显示,65% 的 *SISRE* 值优于 2 m,80% 的 *SISRE* 值优于 3 m;超过 80% 的北斗卫星轨道精度 *SISRE*(orb) 优于 1.0 m,95% 的 *SISRE*(orb) 精度优于 2 m。

#### 5 结论

基于精密星历和设定的评估方案,对 2013 年 1 月至 2015 年 9 月的广播轨道、钟差和空间信号

测距误差进行了长期、全面和细致的分析评估。从结果来看,所有卫星的轨道空间信号误差 *SISRE* (orb)、轨道和钟差综合的空间信号误差 *SISRE* 以及钟差的精度总体上优于 1 m, 2 m, 6 ns,且 MEO 精度最高,IGSO 稍差,GEO 最低;从长期趋势来看,MEO 卫星的 *SISRE* 精度较为稳定;GEO 和 IGSO 卫星有一定的波动,特别是 GEO 卫星的 *SISRE* (orb) 精度在 2015 年有接近 28% 的提升。

## 参考文献 (References)

- [1] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321–333.
- [2] Gao G X, Tang H, Blanch J, et al. Methodology and case studies of signal-in-space error calculation top-down meets bottom-up [C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Washington D. C.: Institute of Navigation, 2009: 2824–2831.
- [3] Heng L, Gao G X, Walter T, et al. Statistical characterization of GPS signal-in-space errors [C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Washington D. C.: Institute of Navigation, 2011: 312–319.
- [4] China Satellite Navigation System Management Office. BeiDou navigation satellite system open service performance standard (1.0 edition) [S/OL]. [2016–04–13]. <http://www.beidou.gov.cn/2013/12/27/201312275afd3e058bd2416bad282fb8b776b578.html>.
- [5] Warren D L M, Raquet J F. Broadcast vs. precise GPS ephemerides: a historical perspective [J]. *GPS Solutions*, 2003, 7(3): 151–156.
- [6] 郭斐, 张小红, 李星星, 等. GPS 系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2009, 34(5): 589–592.  
GUO Fei, ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, et al. Precision analysis on orbit and clock of GPS satellites broadcast ephemeris[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(5): 589–592. (in Chinese)
- [7] Zhao G, Zhou S S, Zhou X H, et al. Precise orbit determination of BeiDou satellites using satellite laser ranging[C]//Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), Berlin: Springer, 2013: 221–229.
- [8] 朱永兴, 李斌, 于亮, 等. 基于精密星历的北斗卫星广播星历精度分析[J]. *全球定位系统*, 2014, 39(1): 1–4.  
ZHU Yongxing, LI Bin, YU Liang, et al. Analysis of BeiDou satellite broadcast ephemeris accuracy based on precise ephemeris[J]. *GNSS World of China*, 2014, 39(1): 1–4. (in Chinese)
- [9] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 北斗卫星导航系统空间信号误差统计分析[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2014, 39(3): 271–274.  
ZHANG Qinghua, SUI Lifan, JIA Xiaolin, et al. SIS error statistical analysis of BeiDou satellite navigation system[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3): 271–274. (in Chinese)
- [10] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.  
HU Zhigang. BeiDou navigation satellite system performance assessment theory and experimental verification[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)
- [11] Chen L, Jiao W H, Huang X R, et al. Study on signal-in-space errors calculation method and statistical characterization of BeiDou navigation satellite system [C] // Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), Berlin: Springer, 2013: 423–434.
- [12] Zhou S S, Hu X G, Wu B, et al. Orbit determination and time synchronization for a GEO/IGSO satellite navigation constellation with regional tracking network [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(6): 1089–1097.
- [13] 罗璠, 李健文, 黄海, 等. BDS 广播星历的轨道误差分析[J]. *测绘通报*, 2015(2): 70–72, 91.  
LUO Fan, LI Jianwen, HUANG Hai, et al. Error analysis of orbit determined by BDS broadcast ephemeris[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(2): 70–72, 91. (in Chinese)
- [14] Chen G C, Hu Z G, Wang G X, et al. Assessment of BDS signal-in-space accuracy and standard positioning performance during 2013 and 2014 [C]// Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), Berlin: Springer, 2015, 340: 437–453.
- [15] 刘利, 时鑫, 栗靖, 等. 北斗基本导航电文定义与使用方法 [J]. *中国科学:物理学力学天文学*, 2015, 45(7): 079509.  
LIU Li, SHI Xin, LI Jing, et al. The definition and using method of the COMPASS basic navigation message [J]. *Scientia Sinica Physica; Mechanica & Astronomica*, 2015, 45(7): 079509. (in Chinese)
- [16] Lou Y D, Liu Y, Yao X G, et al. Precise orbit determination of BeiDou constellation based on BETS and MGEX network[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4692.
- [17] Heng L, Gao G X, Walter T, et al. GPS ephemeris error screening and results for 2006–2009 [C]// Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Washington D. C.: Institute of Navigation, 2010: 1014–1022.
- [18] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. *测绘学报*, 2010, 39(1): 1–6.  
YANG Yuanxi. Progress, contribution and challenges of COMPASS/BeiDou satellite navigation system [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1–6. (in Chinese)
- [19] 杨元喜, 陆明泉, 韩春好. GNSS 互操作若干问题[J]. *测绘学报*, 2016, 45(3): 253–259.  
YANG Yuanxi, LU Mingquan, HAN Chunhao. Some notes on interoperability of GNSS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 253–259. (in Chinese)