

引文格式:蔡洪亮,孟轶男,耿长江,等.北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J].测绘学报,2021,50(4):427-435. DOI:10.11947/j.AGCS.2021.20200549.
CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Changjiang, et al. BDS-3 performance assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 427-435. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200549.

北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救

蔡洪亮¹, 孟轶男¹, 耿长江², 高为广¹, 张天桥³, 李 罡¹, 邵 搏⁴, 辛 洁³, 卢红洋⁵, 毛悦⁶, 袁海波⁷, 刘 成¹, 胡小工⁸, 楼益栋⁹

1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心, 北京 100094; 3. 北京卫星导航中心, 北京 100094; 4. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西 西安 710068; 5. 中国交通通信信息中心, 北京 100011; 6. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054; 7. 中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600; 8. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 9. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079

BDS-3 performance assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR

CAI Hongliang¹, MENG Yinan¹, GENG Changjiang², GAO Weiguang¹, ZHANG Tianqiao³, LI Gang¹, SHAO Bo⁴, XIN Jie³, LU Hongyang⁵, MAO Yue⁶, YUAN Haibo⁷, LIU Cheng¹, HU Xiaogong⁸, LOU Yidong⁹

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China; 2. Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office, Beijing 100094, China; 3. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China; 4. The 20th Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China; 5. China Transport Telecommunications and Information Center, Beijing 100011, China; 6. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China; 7. National Timing Service Center, China Academy of Science, Xi'an 710600, China; 8. Shanghai Astronomical Observatory, China Academy of Science, Shanghai 200030, China; 9. GNSS Research Center of Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: With algorithm and methods provided, performance of BDS-3 services including PNT (positioning, navigation and timing), SBAS (satellite-based augmentation system), PPP (precise point positioning), SMC (short message communication) and SAR (search and rescue) is evaluated using different measurement data. Results show that signal in space (SIS) accuracy is 0.23 m (RMS), SIS availability is 99.44%, SIS continuity is 99.99%, PDOP availability is 100%, positioning accuracy is 1.3 m in horizontal and 2.09 m in vertical direction, positioning availability is 99.93% and timing accuracy is 14.7 ns(95%) for PNT service. For SBAS, positioning accuracy in horizontal direction is 1.03 m and in vertical direction is 2.60 m (95%), APV-I availability is 100%. For PPP service, positioning accuracy is 0.17 m(95%) in horizontal direction and 0.22 m(95%) in vertical direction, the average convergence time is 9 min. For regional short message communication, the communication success rate is 99.6%, the communication capacity is 15.3 million times per hour(uplink), 9.35 million times per hour(downlink); while for global short message communication, communication success rate is 96.46%, communication capacity is 0.4 million times per hour (uplink), 0.21 million times per hour (downlink). For search and rescue service, the receiving success rate is 98.3% (with sending power 37 dBm).

Key words: BDS-3; PNT; SBAS; PPP, SMC; SAR; performance

摘 要: 本文给出了北斗三号全球导航卫星系统定位导航授时、星基增强、精密单点定位、区域短报文通信、全球短报文通信和国际搜救共 6 类服务的测试评估方法, 并利用实测数据对各类服务的核心指标进

行了评估。结果表明,定位导航授时服务方面,空间信号测距误差 0.23 m(RMS),空间信号可用性 99.44%,空间信号连续性 99.99%,PDOP 可用性 100%,B1C 信号全球定位精度水平方向 1.31 m、垂直方向 2.13 m(95%),B1C 信号全球定位可用性 99.93%,B1C 信号授时精度 14.7 ns(95%);星基增强服务方面,定位精度水平方向 1.03 m、垂直方向 2.60 m(95%)、具有垂直引导能力的一类进近(APV-I)可用性 100%;精密单点定位服务方面,定位精度水平方向 0.17 m(95%)、垂直方向 0.22 m(95%)、平均收敛时间 9 min;区域短报文通信服务成功率 99.6%,服务容量 1530 万次/h(上行)、935 万次/h(下行);全球短报文通信服务成功率 96.46%,服务容量 40 万次/h(上行)、21 万次/h(下行);国际搜救服务方面,搜救信号接收成功率 98.3%(发射功率37 dBm)。

关键词:北斗三号全球导航卫星系统;定位导航授时;星基增强;精密单点定位;短报文通信;搜救;服务性能
中图分类号:P228 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1595(2021)04-0427-09

北斗三号系统是我国独立自主建设的全球导航卫星系统,于 2020 年 7 月 31 日建成并向全球提供服务。北斗三号系统在提供定位导航授时服务外,还集成了星基增强和精密单点定位功能,实现高精度、高完好性,并融合了通信数传功能,实现全球、区域短报文通信及国际搜救服务^[1]。文献[2—5]对北斗三号定位导航授时服务性能及相关指标进行了评估,但尚未有对系统各类服务全

面的评估工作。本文详细描述了 6 类服务的测试评估方法,并利用实测数据对各类公共服务进行了评估,旨在为北斗三号不同类型的用户提供参考。

1 服务类型

北斗三号系统服务类型及其基本参数见表 1^[1]。

表 1 北斗三号系统服务类型
Tab.1 Services of BDS-3

服务		信号/频段	卫星类型	覆盖范围
定位导航授时	公开	B1C、B2a、B1I、B3I、B2b	GEO	全球
	授权	B1A、B3A、B3Q	IGSO MEO	
星基增强	公开	SBAS-B1C、SBAS-B2a	GEO	中国及周边
	授权	SBAS-B1A		
精密单点定位	公开	B2b	GEO	中国及周边
区域短报文通信	公开	L(上行)、S(下行)	GEO	中国及周边
	授权			
全球短报文通信	公开	L(上行)、B2b(下行)	上行:MEO(14 个) 下行:IGSO、MEO	全球
国际搜救	公开	UHF(上行)、B2b(下行)	上行:MEO(6 个) 下行:IGSO、MEO	全球

系统通过 B1C、B2a、B1I、B3I 和 B2b 共 5 个频点提供公开的定位导航授时服务,其中 B1C、B2a 信号与 GPS L1/L5、Galileo E1/E5a 中心频率相同,可以与 GPS、Galileo 系统实现较好的兼容互操作,简化多系统兼容终端的设计。B1I 和 B3I 信号则与北斗二号完全一致,从而确保北斗二号用户能够平稳过渡到北斗三号系统,B2b 信号则为信号跟踪测量提供了更多选择。

星基增强公开服务由 SBAS-B1C 与 SBAS-B2a 两个频点提供,其中 SBAS-B1C 提供的是符合国际民航标准^[6-7]的单频 SBAS 服务(现有标准仅支持 GPS、GLONASS 两系统的增强,系统目

前只播发了 GPS 增强信息),SBAS-B2a 按照国际民航标准草案^[8-9]提供的是双频多星座 SBAS 服务。SBAS-B1C 电文涵盖了快变、慢变、电离层等误差改正信息并提供用于保证用户完好性的相关信息,用户通过计算保护等级确认自己使用的导航服务精度在要求的范围以内。SBAS-B2a 探索性地提供了国际民航尚未形成正式标准的双频多星座 SBAS 服务,代表了未来全球 SBAS 发展的方向。

精密单点定位服务旨在提供更高精度的定位、测速、授时服务,当前通过 GEO 卫星播发北斗三号和 GPS 卫星轨道、钟差等改正数,使空间

信号精度进一步提升,用户使用精密单点定位技术可以获得分米至厘米级精度(收敛后),进一步拓展了北斗系统应用的范围。

短报文通信服务包括区域短报文通信和全球短报文通信两种。区域短报文通信利用3颗GEO卫星实现,具备报文通信及位置报告、应急救援功能报文长度最长1000汉字,终端发射功率可以降到3W以下。全球短报文通信利用14颗MEO卫星实现覆盖全球的报文通信服务,报文长度最长40汉字。

国际搜救服务是按照全球卫星搜救系统(COSPAS-SARSAT)标准提供中轨卫星搜救功能,在6颗MEO卫星上安装了搜救载荷,遇险用户通过信标发射406 MHz信号并由卫星搜救载荷进行转发。除标准的搜救功能外,北斗三号搜救服务还具备返向链路功能,能够向遇险用户发送确认信息,增强遇险用户获救信心。

2 评估方法

2.1 定位导航授时服务

定位导航授时服务的关键指标在各卫星导航系统的服务性能规范中均有定义^[10-12],本文按照北斗卫星导航系统公开服务性能规范^[10]的指标体系,评估了空间信号测距误差、空间信号测距误差变化率误差、空间信号测距二阶变化率误差、空间信号可用性、空间信号连续性、PDOP可用性、定位精度、定位可用性及授时精度共9个指标。

空间信号测距误差(SISRE)反映导航电文中轨道、钟差及Tgd误差对用户测距精度的影响,其计算公式为

$$\text{SISRE} = \sqrt{(\kappa \times R - c \times T)^2 + \frac{1}{\omega} (A^2 + C^2)} \quad (1)$$

式中, c 为光速; T 为钟差偏差; R 为径向轨道偏差; A 为切向轨道偏差; C 为法向轨道偏差; κ 对于GEO/IGSO卫星取0.99、MEO卫星取0.98; ω 与轨道高度有关^[13],对于GEO/IGSO卫星取127,MEO卫星取54。空间信号测距变化率误差(SISRRE)与空间信号测距二阶变化率(SISRRE)误差利用卫星钟差的Hadamard方差计算^[11]。

空间信号可用性为预定轨位上的卫星播发可用信号(按照系统空间信号接口文件和服务性能规范的定义)的时间比例,本文评估的是单星空间

信号可用性,计算方法为

$$A = \frac{H}{\text{SUM}} \quad (2)$$

式中, A 为空间信号可用性; H 为空间信号可用的总时间,单位为s;SUM为评估时段的总时间,单位为s。

空间信号连续性指可用的信号在指定时间段(本文采用1h)内不发生非计划中断的概率。本文评估的对象是单星空间信号连续性,其近似计算方法为

$$P = 1 - \frac{T}{\text{MTBF}} \quad (3)$$

式中, P 为空间信号连续性;MTBF为平均故障间隔时间(单位为h); T 取1h。

PDOP可用性是统计一个星座回归周期内全球格网点上PDOP值小于等于6的比例,格网分辨率 $5^\circ \times 5^\circ$,计算时间间隔5min。

定位精度和可用性的评估,首先需严格按照ICD^[14-17]的定义方法和参数计算卫星轨道、钟差、相对论及电离层延迟,并用单频伪距进行最小二乘单历元解算,获得定位结果,然后与准确坐标做差得到定位偏差,将定位偏差与可用性判断门限比较(本文取水平10m,垂直10m)得到定位可用性。

授时精度评估利用基于中科院国家授时中心获得的UTC时间为参考,通过授时型接收机进行北斗授时(进行UTC偏差改正,归算到UTC时间),最后计算北斗导航系统授时结果与授时中心获得的UTC间的差值。

2.2 星基增强服务

星基增强服务主要评估指标包括定位精度、定位服务可用性、定位服务连续性和定位服务完好性等^[18-23],由于BDSBAS B2a信号提供的双频多星座SBAS服务尚未形成国际标准,这里只评估了SBAS-B1C信号提供的单频SBAS服务。

对SBAS定位精度的评估需严格按照国际民航标准^[6-7]开展定位解算。具体方法为:首先对原始伪距用载波相位进行平滑,然后利用SBAS信息进行快变、慢变及电离层延迟改正,其他误差项改正方法与标准单点定位相同(对流层延迟模型按照民航标准),最后用加权最小二乘求解每历元的位置解和相应的保护等级。定位解算结束后,对保护等级满足指定服务类

型精度告警阈值(取 APV-I 类进近标准,水平告警阈值 40 m,垂直告警阈值 50 m)内时段的定位精度进行统计。

定位服务可用性评估是统计用户保护等级在指定阈值(采用 APV-I 指标)内的时间比例。

定位服务连续性是指时段内(采用 15 s)用户保护等级满足一定阈值(本文采用 APV-I 指标)要求的概率(起始时刻为满足阈值要求状态),采用 15 s 滑动窗口的方式统计。

定位服务完好性主要统计了漏警概率,即真实定位误差超过保护等级的概率,反映的是保护等级对真实定位误差的包络能力。

2.3 精密单点定位服务

精密单点定位服务指标包括定位精度和收敛时间。

定位精度评估按照精密单点定位的解算方式^[24],用北斗三号播发的改正信息进行轨道、钟差及 Tgd 改正,然后开展事后数据仿实时动态精密单点定位(解算中认为前后历元的位置参数不相关),最后将解算结果与接收机的真实位置作差,统计水平、高程精度。

收敛的判定按照定位精度达到水平 30 cm,垂直 60 cm 的精度,并持续超过 2 min(统计收敛时间时含这 2 min)。

2.4 区域短报文通信服务

区域短报文通信服务主要测试了报文通信成功率、服务容量。

通信成功率评估方法为配置两台北斗短报文通信终端,一台向卫星发送短报文,另一台接收,统计发送和接收的次数计算成功率。

服务容量的方法为测试单颗北斗三号 GEO 卫星单个波束的容量,进而推算全系统容量。

2.5 全球短报文通信服务

全球短报文通信服务的评估方法与区域短报文通信服务相同,测试指标包括了通信成功率、服务容量。

2.6 国际搜救服务

国际搜救服务主要是测试前向报警的成功率。通过国际搜救卫星组织已入网运行的中轨地面站测试北斗搜救载荷业务,利用模拟信标发送上行测试信号,经过搜救载荷转发至 L 频段后,利用境外中轨搜救地面站进行接收,对输出结果进行解码,评估前向报警信息的成功率。

3 评估结果

3.1 定位导航授时服务

利用 2020 年 6 月 19—25 日国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)21 个站、国际 GNSS 服务组织(IGS)30 个站及北斗星间测距数据进行精密定轨,获得精密轨道,经激光测距数据检验优于 5.0 cm,并以此作为基准,对北斗三号 B1I/B3I 频点的空间信号精度进行评估,结果显示,所有卫星空间信号精度均优于 0.5 m(RMS),均值为 0.23 m,如图 1 所示。

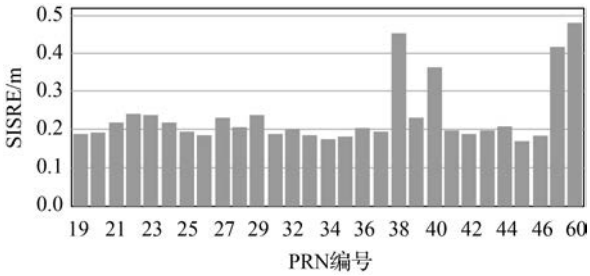


图 1 北斗三号卫星 SISRE
Fig.1 SISRE of BDS-3 satellites

统计相同时段所有卫星的 SISRE 均值为 0.000 35 m/s, SISRAE 均值为 0.000 12 m/s²,分别如图 2、图 3 所示。

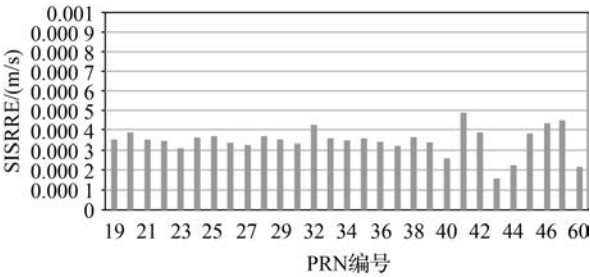


图 2 北斗三号卫星 SISRE
Fig.2 SISRE of BDS-3

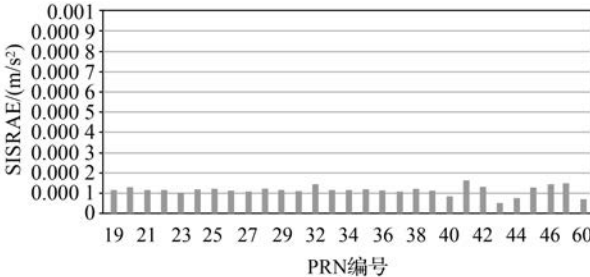


图 3 北斗三号卫星 SISRAE
Fig.3 SISRAE of BDS-3

利用 2020 年 1 月 1 日至 6 月 30 日期间的导航电文数据,统计了北斗三号卫星 B1I/B3I 信号的空间信号可用性,结果如图 4 所示。所有卫星空间信号可用性整体统计结果为 99.44%。可以看到 PRN59 卫星的空间信号可用性较低,这是由于该星在统计期间开展了较长时间的在轨试验。

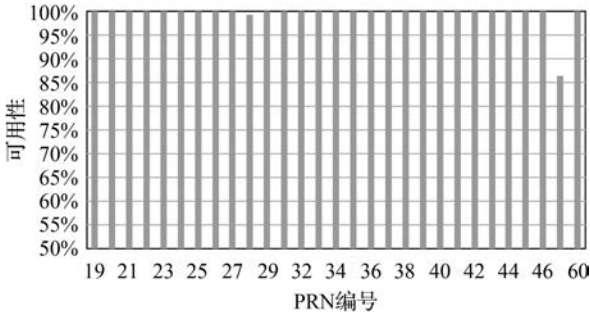


图 4 空间信号可用性
Fig.4 Signal-in-space availability

相同时段的数据分析了空间信号连续性,结果如图 5 所示。结果显示北斗三号系统所有卫星空间信号连续性整体统计优于 99.99%/h。

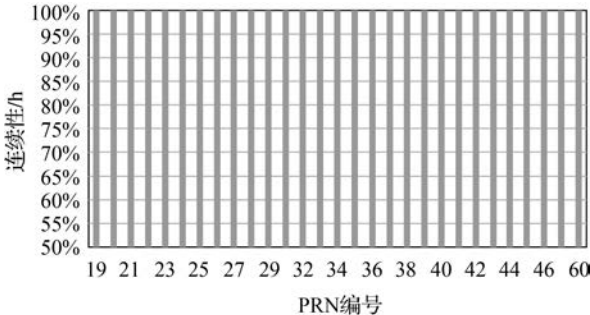


图 5 空间信号连续性
Fig.5 Signal-in-space continuity

利用同时段的广播星历计算了北斗三号一个回归周期(7 d)全球格网点上的 PDOP 变化情况,统计可用性如图 6 所示。可以看到北斗三号星座已经对全球实现了很好的覆盖,在全球范围的 PDOP 可用性为 100%。

利用 iGMAS 全球站(跟踪站信息见 www.igmas.org)2020 年 6 月 19 日至 25 日的观测数据,对 B1I、B3I、B1C 和 B2a 4 个频点的单频伪距单点定位精度进行了评估,结果见表 2。可以看到 B1C 频点全球定位精度均值水平方向 1.31 m,垂直方向 2.13 m。4 个导航信号定位精度的差异主要由电离层改正精度引起,使用相同电离层模型的情况下(B1I 和 B3I 使用相同的 Klobuchar

模型,B1C 和 B2a 使用相同的 BDGIM 模型)信号频率越高,电离层模型改正残差越小,定位精度也就越高。

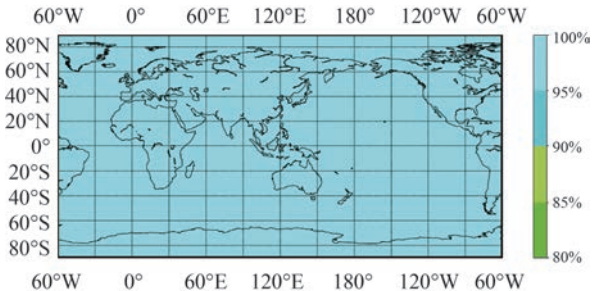


图 6 北斗三号 PDOP 可用性
Fig.6 BDS-3 PDOP availability

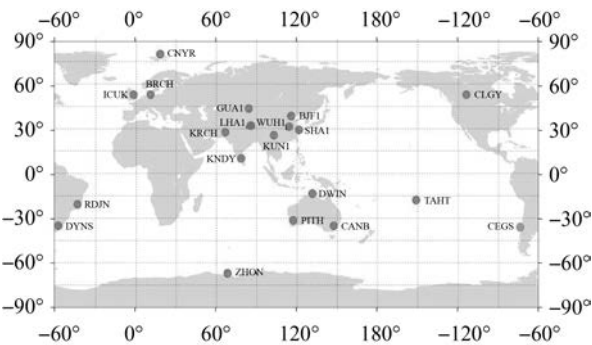


图 7 跟踪站分布
Fig.7 Location of stations

表 2 全球跟踪站定位精度
Tab.2 Positioning accuracy of global tracking stations

序 号	站 名	m							
		B1I		B3I		B1C		B2a	
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
1	B1F1	1.14	2.69	1.26	3.59	0.90	1.85	1.51	3.07
2	GUAI	0.85	1.87	0.98	2.46	0.78	1.38	1.34	1.85
3	KUN1	2.20	2.86	2.99	3.76	1.83	1.98	3.00	2.55
4	LHA1	2.00	3.86	2.56	4.60	1.67	2.22	2.80	3.27
5	SHAI	1.22	2.83	1.49	3.87	1.17	2.07	1.81	3.38
6	WUHI	1.73	2.89	2.19	3.84	1.43	2.10	2.26	3.02
7	DWIN	0.89	4.15	1.09	5.92	0.80	2.26	1.03	3.71
8	PETH	1.49	4.43	1.85	6.28	1.09	1.42	1.68	1.97
9	CANB	0.97	3.11	1.32	4.66	1.20	2.13	1.74	2.73
10	BRCH	1.24	2.03	1.44	2.65	1.34	2.09	1.22	1.96
11	BYNS	1.04	4.25	1.27	6.15	1.48	2.88	1.45	2.53
12	CEGS	1.67	4.57	1.52	5.69	1.55	2.28	1.70	2.27
13	CLGY	1.28	1.60	1.75	2.19	1.16	2.34	1.40	2.65
14	CNYR	1.01	2.40	1.39	3.04	0.79	2.63	0.96	3.93
15	ICUK	1.18	2.14	1.32	2.92	1.31	2.04	1.24	1.90
16	KNDY	1.32	4.47	1.46	5.26	0.95	1.65	1.16	2.31
17	KRCH	2.80	4.14	3.40	5.71	2.88	2.41	3.91	3.67
18	RDJN	1.10	5.00	1.29	7.18	1.22	2.55	1.16	2.99
19	TAHT	2.10	4.35	3.17	6.29	1.74	2.55	2.71	2.33
20	ZHON	1.06	3.22	1.29	4.91	0.88	1.74	1.19	1.82
	均值	1.41	3.34	1.75	4.55	1.31	2.13	1.76	2.70

相应的定位可用性见表 3,可以看到 B1C 频点单频伪距定位全球范围的可用性为 99.93%。

表 3 全球跟踪站定位可用性

Tab.3 Positioning availability of global tracking stations (%)

序号	站名	B1I	B3I	B1C	B2a
1	BJF1	99.56	99.56	100.00	100.00
2	GUA1	100.00	99.99	99.98	99.99
3	KUN1	99.46	99.46	99.96	100.00
4	LHA1	99.27	99.28	99.91	100.00
5	SHA1	99.54	99.54	99.99	100.00
6	WUH1	99.51	99.51	99.99	99.99
7	DWIN	99.77	99.78	100.00	100.00
8	PETH	99.33	99.23	100.00	99.99
9	CANB	100.00	100.00	100.00	100.00
10	BRCH	99.99	99.98	99.99	99.99
11	BYNS	99.86	99.95	99.42	99.37
12	CEGS	99.55	99.56	99.60	99.60
13	CLGY	100.00	100.00	99.99	100.00
14	CNYR	100.00	100.00	99.98	100.00
15	ICUK	99.99	99.99	99.99	99.99
16	KNDY	99.14	99.16	100.00	100.00
17	KRCH	99.61	99.60	99.99	100.00
18	RDJN	100.00	99.98	100.00	100.00
19	TAHT	100.00	100.00	99.81	100.00
20	ZHON	100.00	100.00	100.00	100.00
全球均值		99.73	99.73	99.93	99.95

以中科院国家授时中心 UTC (NTSC) 的 10 MHz 频率信号和 1PPS 信号为参考,接收机和各类电缆时延经过测量和校准,利用 2020 年 7 月 1 日至 8 月 31 日数据评估得到北斗授时精度为 14.7 ns(95%),结果如图 8 所示。

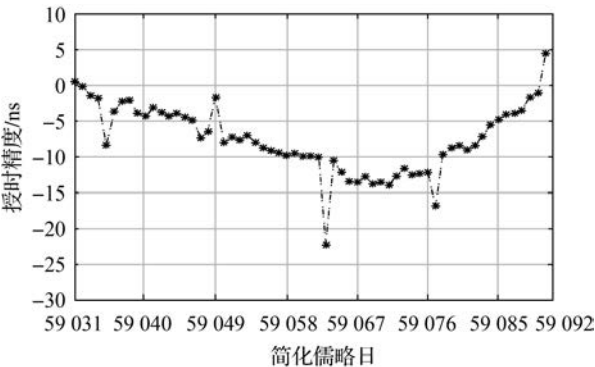


图 8 授时精度

Fig.8 Timing accuracy

3.2 星基增强服务

利用 2020 年 6 月 15 日至 21 日的 BDSBAS B1C 电文,结合国内的北京、长春和武汉站数据

对定位精度进行评估,结果见表 4。可以看到 3 个站点定位精度水平方向均优于 1.5 m,垂直方向优于 3.0 m(95%)。

表 4 定位精度评估结果(95%)

Tab.4 Positioning accuracy (95%) m

测站名称	定位精度	
	水平	垂直
北京	0.91	2.33
长春	1.27	2.59
武汉	0.91	2.89
均值	1.03	2.60

北京站的水平和垂直斯坦福图分别如图 9 (a)(b)所示。

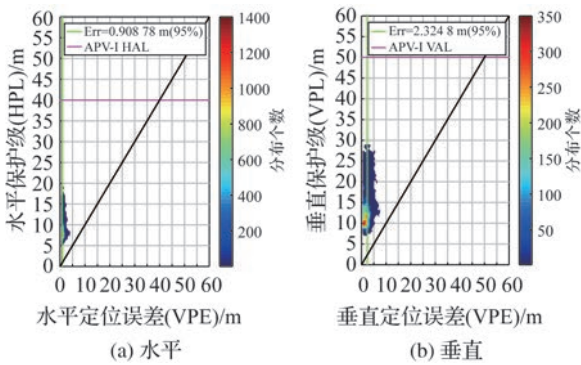


图 9 BJFS 站水平、垂直定位误差保护级斯坦福图

Fig.9 Standord diagram of BJFS positioning error

利用相同时段的数据进行可用性、连续性和完好性分析,统计结果见表 5。

表 5 BDSBAS APV-I 可用性

Tab.5 BDSBAS APV-I availability (%)

站点	APV-I 可用性	APV-I 连续性	漏警概率
北京	100.00	100.00	0.00
长春	100.00	100.00	0.00
武汉	100.00	100.00	0.00
均值	100.00	100.00	0.00

3.3 精密单点定位服务

利用 2020 年 7 月 1 日至 7 日期间北斗三号 PPP 信息,结合 iGMAS 国内站北斗三号 B1C 与 B2a 双频数据,仿动态进行 PPP 解算,结果见表 6。可以看到,北斗 PPP 定位精度水平、垂直方向均在 0.25 m 以内,收敛时间优于 20 min。

2019 年 7 月 4 日 BJF1 站北斗系统 PPP 定位偏差时间序列如图 10 所示。

表 6 PPP 定位统计结果

Tab.6 BDS PPP results			
测站名称	水平/m	垂直/m	收敛时间/min
BJF1(北京站)	0.10	0.18	5
GUA1(乌鲁木齐站)	0.18	0.23	5
SHA1(上海站)	0.20	0.24	5
KUN1(昆明站)	0.23	0.23	15
WUH1(武汉站)	0.14	0.17	15
LHA1(拉萨站)	0.19	0.24	7
均值	0.17	0.22	9

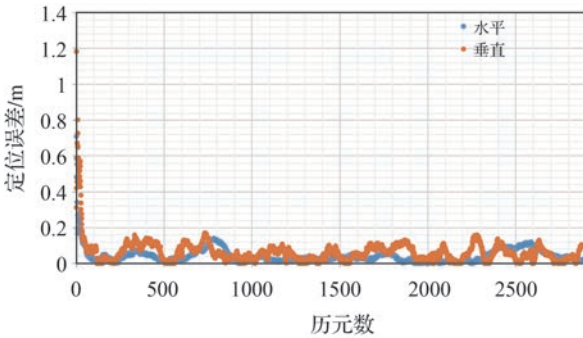


图 10 BJJF1 站北斗 PPP 位置偏差序列

Fig.10 Time series of BJJF1 PPP error

3.4 区域短报文通信服务

2020 年 5 月 11—13 日,利用设置于北京的短报文终端开展了区域短报文通信性能测试,结果见表 7,通信成功率优于 99.6%。

通信容量方面,测试结果显示,单波束工作的上行容量达到 255 万次/h,下行容量达到 53 万次/h,等效系统服务容量上行为 1530 万次/h,下

行为 935 万次/h。

表 7 区域短报文通信成功率测试结果

Tab.7 Communication success rate testing result						
序号	报文通信类型	速率 /Kb	支路	长度	成功次数/测试次数	成功率/(%)
1	报文通信(无确认/代码)	16	S2C	140 bit	996/1000	99.6
2	报文通信(有确认/代码)	4	S2C	400 bit	996/1000	99.6
3	报文通信(有确认/汉字)	16	S2C	1000 汉字	998/1000	99.8
7	离线报文	8	S2C	140 bit	20/20	100
8	通播	4	S2C	400	1000/1000	100
9	组播通信	8	S2C	840	1000/1000	100

3.5 全球短报文通信服务

2020 年 5 月 11—13 日开展了全球短报文通信性能测试,通信成功率方面,共进行了 1440 次报文通信测试,成功次数为 1389,成功率为 96.46%。

通信容量方面,在平均有效电文 200 bit 场景下针对境内单星工作容量进行测试,单星上行容量优于 2.86 万次/h,下行容量优于 8000 次/h,等效系统服务容量为上行 40 万次/h,下行 21 万次/h。

3.6 国际搜救服务

按照国际搜救卫星组织入网测试标准,开展了 MEO-13/14、MEO-21/22、MEO-23/24 共 6 颗卫星搜救载荷入网测试工作,测试项目共 11 项,指标见表 8。

表 8 搜救载荷主要指标

Tab.8 Core parameters of SAR						
指标	MEO-13	MEO-14	MEO-21	MEO-22	MEO-23	MEO-24
增益/dB	177.55	178.72	178.0	178.0	178.9	180.1
转换	1 138.160 000 0	1 138.160 000 0	1 138.160 000 0	1 138.160 000 0	1 138.160 000 0	1 138.160 000 0
频率值/MHz	0862	0649	0444	0649	0602	00244
频率	1.07×10 ⁻¹¹	1.47×10 ⁻¹¹	-1.67×10 ⁻¹¹	-1.92×10 ⁻¹¹	8.59×10 ⁻¹²	-1.96×10 ⁻¹¹
率	9.25×10 ⁻¹⁵	8.36×10 ⁻¹⁵	5.45×10 ⁻¹⁵	5.11×10 ⁻¹⁵	4.88×10 ⁻¹⁵	4.66×10 ⁻¹⁵
G/T 值/(dB/K)	-14.07	-14.24	-14.55	-14.65	-14.74	-13.77
轴比/dB	0.56	0.82	0.76	0.83	0.87	0.73
ALC 传递函数	正常	正常	正常	正常	正常	正常
1 dB 带宽/kHz	94.8	93.4	95.3	96.5	100.2	89.1
带 3 dB 带宽/kHz	103.2	98	101.7	102.1	104.4	97.2
宽 10 dB 带宽/kHz	109.4	106.8	117.3	109.1	109.4	109.4
带内波动/dB	0.85	0.97	0.63	0.63	0.71	0.84
三阶交调失真/dBc	32.9	33.2	30.3	30.5	31.1	30.9
EIRP/dBW	16.7	17.9	17.0	17.4	19.0	18.3
群时延频率变化率/(μs/4 kHz)	3.7	3.9	7.60	7.10	8.88	9.41
杂散	无	无	无	无	无	无
信标信号处理	正常	正常	正常	正常	正常	正常

表 8 中“信标信号处理”依托美国马里兰中轨地面站(MEOLUT)完成,使用了信标模拟器和信号处理装置。搜救终端发射的 406.05 MHz 的报警信号能正确地被北斗搜救载荷转发至 1 544.21 MHz,境外地面站能够接收北斗搜救载荷的下行信号,MEO-13 卫星的测试结果见表 9。

表 9 MEO-13 卫星搜救性能测试结果
Tab.9 SAR performance of MEO-13

发射功率/(dBm)	有效信号接收比例/(%)	有效信号平均 C/N0/(dB)	发射开始时间(UTC)	发射开始卫星俯仰角/(°)	发射期间卫星最大俯仰角/(°)
37	98.3	51.46	2019-08-02 16:35:00	6.3	39.9
32	75.7	38.10	2019-08-01 16:29:00	36.2	53.7
27	39.3	34.76	2019-08-01 17:57:00	53.5	53.5
22	39.3	34.67	2019-08-14 04:00:00	35.6	58.2
Satellite ID:632			MEOLUT ID:3677		

因载荷属于透明转发,信道中除了测试信号也存在其他业务信号,当测试信号发射功率较低时,强信号可能会覆盖弱信号,导致接收到的测试信号数量下降。从表 9 结果可以看出北斗三号 MEO-13 卫星转发到地面的有效信号接收比例优于 98%(发射功率 37 dBm)。

4 结束语

本文介绍了北斗三号系统定位导航授时、星基增强、精密单点定位、区域短报文通信、全球短报文通信和国际搜救服务,并给出了 6 类服务的性能评估方法,利用实测数据对系统各类服务的核心指标进行了评估,对照北斗系统服务性能规范,指标的实现情况见表 10。

表 10 指标汇总
Tab.10 Assessment results summary

序号	服务类型	指标名称	评估结果	指标要求
1	定位导航授时	空间信号测距误差	0.23 m	≤0.6 m(RMS)
2		空间信号测距变化率误差	0.000 35 m/s	≤0.006 m/s(RMS)
3		空间信号测距二阶变化率误差	0.000 12 m/s ²	≤0.002 m/s ² (RMS)
4		空间信号可用性	99.44%	≥98%
5		空间信号连续性	99.99%/h	≥99.5%/h(GEO,IGSO)
6		PDOP 可用性	100%	≥99.8%/h(MEO)
7		定位精度	水平 1.31 m	≥95%
8			垂直 2.13 m	水平≤10 m(95%)
9		授时精度	14.7 ns	垂直≤10 m(95%)
10	星基增强	定位精度	水平 1.03	≥95%
11		可用性	100.00%	≤20 ns(95%)
12		连续性*	100.00%	水平≤2.0 m(95%)
13	精密单点定位	完好性(漏警概率)*	0.00%	垂直≤3.0 m(95%)
14		定位精度	水平 0.17 m	≥99%
15		收敛时间	垂直 0.22 m	≤1~8×10 ⁻⁶ /15 s
16	区域短报文通信	通信成功率	9 min	≤2×10 ⁻⁷ /150 s
17		服务容量	99.96%	水平≤0.3 m(95%)
18			1530 万次/h(上行)	垂直≤0.6 m(95%)
19	全球短报文通信	通信成功率	935 万次/h(下行)	≥30 min
20		服务容量	96.46%	≤30 min
			40 万次/h(上行)	≥95%
	国际搜救	通信成功率	21 万次/h(下行)	≥1200 万次/h(上行)
			98.3%	≥600 万次/h(下行)

* 受时间限制,表中给出的星基增强服务可用性、连续性、完好性评估结果为短期数据,长时间数据正在积累。

总体看来,北斗三号系统定位导航授时、星基增强、精密单点定位、区域短报文通信、全球短报文通信及国际搜救服务各项指标均满足北斗系统服务性能要求。星基增强定位精度等还有提升空间,后续系统需重点关注星基增强服务性能,从改进格网电离层延迟精度,拓展地面跟踪站覆盖范

围等方面入手,进一步提升星基增强服务的性能。

参考文献:

[1] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Navigation, 2019, 66(1): 7-18.
[2] YANG Yuanxi, MAO Yue, SUN Bijiao. Basic performance

- and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1-8.
- [3] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. *测绘学报*, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
- GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yi'nan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
- [4] YUAN Yunbin, WANG Ningbo, LI Zishen, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 55-69.
- [5] 阮仁桂, 魏子卿, 贾小林. 星间单程伪距联合监测站数据确定北斗三号卫星轨道和钟差[J]. *测绘学报*, 2019, 48(3): 269-275. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180483.
- RUAN Rengui, WEI Ziqing, JIA Xiaolin. BDS-3 satellite orbit and clock determination with one-way inter-satellite pseudorange and monitoring station data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 269-275. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180483.
- [6] ICAO SARPS. Annex 10: international standards and recommended practices, aeronautical telecommunications[C]// *Radio Navigation Aids*. Montreal: International Civil Aviation Organization: I. 2018.
- [7] SC-159. Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area-based augmentation system airborne equipment. change 1, appendix V, integrated and highlighted/prepared by: SC-159[M]. Washington, DC: RTCA Inc., 2013.
- [8] SBAS Interoperability Working Group (IWG). Satellite-based augmentation system dual-frequency multi-constellation definition document[C]// SBAS IWG 31. Senegal: [s.n.], 2016.
- [9] IWG. SBAS L5 DFMC interface control[C]// SBAS IWG 31. Senegal: [s.n.], 2016.
- [10] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范 2.0 版[EB/OL]. (2018-12-28). <http://www.beidou.gov.cn>.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system open service performance standard[EB/OL]. (2018-12-28). <http://en.beidou.gov.cn>.
- [11] Department of Defense of United States of America. Global positioning system standard positioning service performance standard[EB/OL]. 2020. <http://www.gps.gov>.
- [12] European Union. European GNSS (Galileo) open service definition document[EB/OL]. (2020-10-20). <https://www.gsc-europa.eu>.
- [13] CHEN Liang, JIAO Wenhai, HUANG Xiaorui, et al. Study on signal-in-space errors calculation method and statistical characterization of BeiDou navigation satellite system[C]// SUN Jiadong, JIAO Wenhai, WU Haitao, et al. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings, Lecture Notes in Electrical Engineering*. Berlin: Springer, 2013: 243.
- [14] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号 B1I(3.0 版)[EB/OL]. (2019-02-27). <http://www.beidou.gov.cn>.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1I (Version 3.0)[EB/OL]. (2019-02-27). <http://www.beidou.gov.cn>.
- [15] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号 B3I(1.0 版)[EB/OL]. (2018-02-29). <http://www.beidou.gov.cn>.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B3I (Version 1.0)[EB/OL]. (2018-02-29). <http://www.beidou.gov.cn>.
- [16] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号 B1C(1.0 版)[EB/OL]. (2017-12-27). <http://www.beidou.gov.cn>.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1C (Version 1.0)[EB/OL]. (2017-12-27). <http://www.beidou.gov.cn>.
- [17] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——公开服务信号 B2a(1.0 版)[EB/OL]. (2017-12-27). <http://www.beidou.gov.cn>.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B2a (Version 1.0)[EB/OL]. (2017-12-27). <http://www.beidou.gov.cn>.
- [18] Federal Aviation Administration of America. Global positioning system wide area augmentation system (WAAS) performance standard[EB/OL]. (2008-10-31). <http://www.gps.gov>.
- [19] NSTB/WAAS T & E Team. Wide area augmentation system performance analysis report(#72)[EB/OL]. (2020-04-29). <http://www.nstb.tc.faa.gov/>.
- [20] WALTER Todd. WAAS MOPS: practical examples[C]// *Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*. San Diego, CA: [s.n.], 1999: 283-293.
- [21] European GNSS Agency. EGNOS open service (OS) service definition document[EB/OL]. (2017-10-03). <https://egnos-user-support.essp-sas.eu>.
- [22] European GNSS Agency. EGNOS safety of life (SOL) service definition document[EB/OL]. (2019-03-26). <https://egnos-user-support.essp-sas.eu>.
- [23] The EGNOS Service Provider. Service provision yearly report[EB/OL]. (2019-07-02). <https://egnos-user-support.essp-sas.eu>.
- [24] GE Maorong, GENDT G, ROTHACHER M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2020-11-12

修回日期: 2021-02-19

第一作者简介: 蔡洪亮(1982—),男,助理研究员,研究方向为卫星导航系统总体设计与试验评估。

First author: CAI Hongliang (1982—), male, assistant researcher, majors in design and test evaluation of GNSS.

E-mail: caibanyu@126.com

通信作者: 耿长江

Corresponding author: GENG Changjiang

E-mail: gengchj@beidou.gov.cn