



北斗系统服务质量评估模型与指标体系

摘要

针对北斗三号全球卫星导航系统(BDS-3)多种类型服务综合评估的问题,将网络通信中的服务质量(QoS)概念引入到北斗系统服务评估,提出了一种北斗系统QoS分层模型,给出了初步的分类评估指标设计,涵盖北斗系统全球定位导航授时(RNSS)服务、星基增强服务(SBAS)、精密单点定位服务(PPP)、区域短报文通信服务(RSMC)、全球短报文通信服务(GSMC)、国际搜救服务(SAR)和地基增强服务(GAS)。通过分析服务的保障机制与指标映射关系,提供了在复杂情况下实现多QoS指标优化以及异常情况下快速定位故障源头的途径,确保了北斗系统服务的稳定性与可靠性。研究结果可为我国北斗卫星导航系统综合性能评估提供参考。

关键词

北斗三号;全球导航卫星系统;服务质量;性能评估

中图分类号 P228.4

文献标志码 A

收稿日期 2022-08-12

资助项目 浙江省引进培育领军型创新创业团队项目(2020R01012);上海市2020年度科技创新行动计划高新技术领域项目(20511103300,20511103400);上海市2021年度科技创新项目(2021-cyxt2-kj01)

作者简介

吴晓莉,女,高级工程师,主要从事卫星导航定位研究.xiaoli.wu@wz-inc.com

赵毅(通信作者),男,教授高级工程师,主要从事卫星导航定位研究.yi.zhao@wz-inc.com

1 千寻位置网络有限公司,上海,200438

2 千寻位置网络(浙江)有限公司,湖州,313299

0 引言

随着卫星导航应用场景的不断拓展和深化,用户对导航定位性能的要求不断提高,卫星导航系统性能已成为卫星导航领域竞争的重点。在全球导航卫星系统国际委员会(International Committee on Global Navigation Satellite Systems, ICG)、国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)和美国导航学会(The Institute of Navigation, ION)会议等重大会议上都会有服务性能指标体系的相关议题^[1-2]。美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、欧洲Galileo和我国北斗卫星导航系统管理机构先后发布了一系列服务性能规范^[3-5]。服务性能规范文件的更新体现了相应卫星导航系统发展与服务性能的提升,但不同系统的指标体系间存在差异。目前并没有形成导航卫星系统服务性能指标体系的国际标准,卫星导航系统的服务性能评估成为比较活跃的研究领域。

区别于GPS、Galileo和GLONASS,北斗三号全球卫星导航系统(简称北斗三号系统,BDS-3)采用独特的混合星座设计(24 MEO+3 GEO+3 IGSO),而且除了全球定位导航授时(Radio Navigation Satellite Service, RNSS)服务外,还提供星基增强(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)、精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)、区域短报文通信(Regional Short Message Communication, RSMC)、全球短报文通信(Global Short Message Communication, GSMC)、国际搜救(Search and Rescue, SAR)和地基增强(Ground Augmentation System, GAS)等6类服务^[6],这些服务有些是全球服务,有些是覆盖中国及周边以亚太地区为主的区域服务,服务面向不同类型的用户,具有不同的定位精度、可用性、完好性、通信性能等指标需求,因此需要研究适合北斗系统的综合评估体系。

本文将源自网络通信的服务质量(Quality of Service, QoS)概念引入北斗系统服务性能评估,首先提出一种QoS分级模型,随后根据北斗系统服务类型不同给出初步的评估指标设计,最后分析以RNSS服务为代表的QoS保障机制与指标映射关系。

1 北斗系统QoS分层模型

服务质量(QoS)最初是网络通信中的概念,是网络提供给应用/用户服务性能的一种测量,通常指网络在传输数据流时要满足的一

系列服务请求,具体可以量化为带宽、延迟、延迟抖动、丢失率、吞吐量等性能指标,强调端到端或网络边界到边界的整体性^[7].QoS 不仅体现了服务提供者提供服务质量本身的物理意义,还反映了用户的需要并将对用户的满意度产生影响^[8].

本文将 QoS 概念引入北斗系统综合服务评估,提出了一种分层模型,如图 1 所示.图的左侧对应系统服务 QoS 和用户感知 QoS,不同行业领域不同使用环境的用户对卫星导航定位服务质量需求不同,而卫星导航系统通过提供不同的产品和服务来满足各种用户多样化的需求.图的右侧对应卫星导航系统的组成架构,分为物理层、服务层、通信层和应用层.物理层包括卫星、基站(包括注入站)、接收机和通信设备等.服务层包括空间段的星座设计、信号设计、服务模式和星载原子钟,也包括地面段的精密定轨、时间同步、差分增强、电文编辑注入等关键技术.导航系统的服务质量与服务层的关键技术密切相关,在后面保障机制和指标映射中将进一步分析.应用层是指卫星导航的各种应用,包括地理信息、农林渔业、航空航海、民众减灾、交通、大众消费、IoT 和金融电力等行业和领域^[9-10].通信层包括卫星通信、光纤通信和移动通信,代表着观测数据和导航产品的通信传输方式.

2 北斗系统 QoS 评估指标设计

北斗三号系统的星座设计、信号设计和服务模式设计与其他 GNSS 系统明显不同,体现了北斗特色:一是在全球覆盖基础上更加重视亚太地区性能;

二是兼容北斗二号各类服务,确保平稳过渡;三是实现星基增强、卫星通信等功能与导航定位服务的融合^[6].北斗三号系统 QoS 的评估侧重于系统播发产品的性能,包括精度、可用性、连续性、完好性、通信容量等维度,不考虑用户使用环境和终端设备差异造成的影响.

2.1 北斗系统 QoS 分类标准

根据北斗三号系统提供的 7 类服务设计了 QoS 分类标准,如表 1 所示.其中 QCI 为 QoS 类别标识(QoS Class Identifier),每个类别定义了对应于不同服务指标参数的系统服务类型.根据服务区域范围和指标要求的不同,分为区域 RNSS、全球 RNSS、

表 1 北斗系统 QoS 分类标准
Table 1 BDS QoS classification criteria

QCI	指标参数	服务类型	二级服务类型
1	参见表 2	RNSS	区域 RNSS
2			全球 RNSS
3	参见表 3	SBAS	SBAS(APV-I)
4			SBAS(CAT-I)
5	参见表 4	GAS	地基广域增强服务
6			地基区域增强服务
7			地基增强后处理服务
8	参见表 5	PPP*	PPP 服务
9			PPP-AR 服务
10			PPP-RTK 服务
11	参见表 6	RSMC	RSMC
12	参见表 7	GSMC	GSMC
13	参见表 8	SAR	SAR

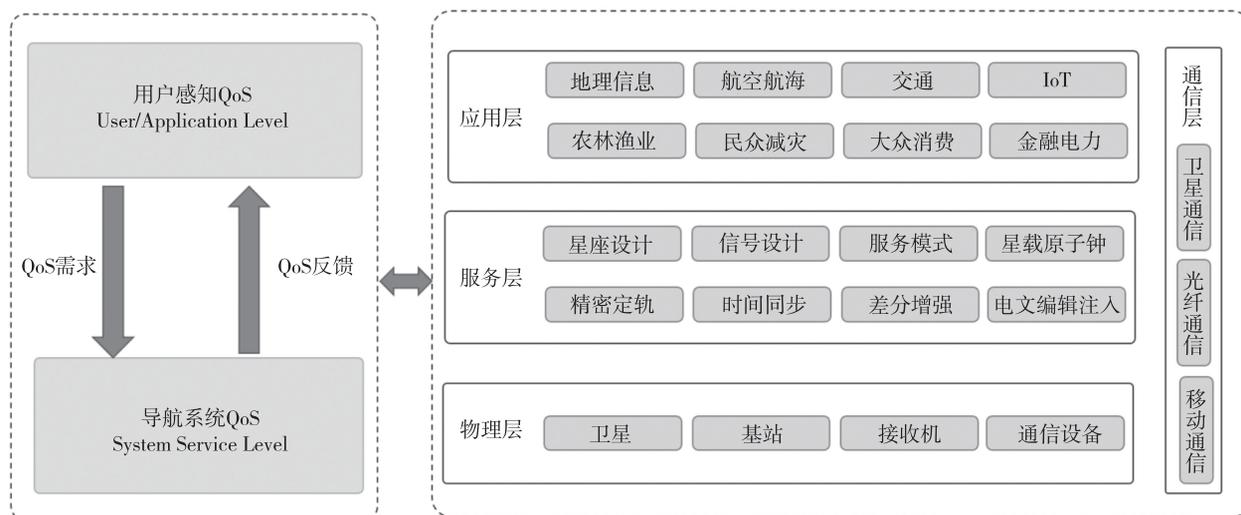


图 1 北斗系统 QoS 分层模型

Fig. 1 BDS QoS hierarchical model

SBAS(APV-I)、SBAS(CAT-I)、地基广域增强服务、地基区域增强服务、地基增强后处理服务、精密单点定位(PPP)服务、精密单点定位模糊度固定(Precise Point Positioning Ambiguity Resolution, PPP-AR)服务、精密单点实时动态定位(PPP-RTK)服务、区域短报文通信(RSMC)、全球短报文通信(GSMC)和搜索与救援(SAR)共计13项服务.其中精密单点定位PPP服务既包括北斗三号系统提供的PPP服务,也包括千寻位置提供的星基高精度精密定位服务^[11].

2.2 北斗系统服务质量的评估指标

参考《北斗卫星导航系统应用服务体系(1.0版)》^[12]以及国内外学者对北斗系统性能评估的文献^[13-16],得到北斗系统不同类别QoS的指标参数如表2—8所示.

表2中RNSS为定位导航授时(Positioning Navigation Timing, PNT)服务,即北斗系统的公开服务,用户通过接收北斗系统卫星的伪距、载波、多普勒等测距信号和导航电文信息,进行实时PNT计算.其QoS

指标参数主要包括空间信号测距误差(Signal in Space Range Error, SISRE)、空间信号可用性、空间信号连续性、PDOP可用性、定位精度、授时精度和测速精度.

表3的SBAS是指主要为民航和海事用户提供的星基增强服务,用户除了接收公开服务,还可以通过GEO卫星接收包括卫星轨道、卫星钟差和电离层误差在内的差分改正信息和完好性信息,提升用户定位的精度和可靠性^[17].根据国际民航组织在《标准和建议措施:附件10》(Standards and Recommended Practices, SARPS Annex 10)中空间信号性能要求^[18],得到北斗系统SBAS QoS指标参数,其中QCI值为3代表垂直引导进近(APV-I)阶段的服务质量指标,QCI值为4代表I类精密进近(CAT-I)阶段的服务质量指标.UHNE(User Horizontal Navigation Error)为用户水平定位误差,UVNE(User Vertical Navigation Error)为用户垂直定位误差,VAL(Vertical Alarm Level)为垂直告警水平,ToA(Time to Alarm)为告警时间.

表2 北斗系统RNSS服务质量指标参数

Table 2 BDS RNSS service quality index parameters

QCI	SISRE/ m	PDOP 可用性/%	空间信号 可用性/%	空间信号 连续性/%	定位可用性/ %	定位精度/ m	授时精度/ ns	测速精度/ (m/s)
1	0.6	99	98	99.5	99	5	10	0.2
2	0.6	95	95	99.5	95	10	20	0.2

表3 北斗系统SBAS服务质量指标参数

Table 3 BDS SBAS service quality index parameters

QCI	UHNE/m	UVNE/m	HAL/m	VAL/m	ToA/s	完好性/ 10^{-7}	连续性/s	可用性
3	16	20	40	50	10	1~2	$(1\sim 8)\times 10^{-6}/15$	0.99~0.999 99
4	16	4~6.56	40	10~15	6	1~2	$(1\sim 8)\times 10^{-6}/15$	0.99~0.999 99

表4 北斗系统GAS服务质量指标参数

Table 4 BDS GAS service quality index parameters

QCI	支持系统	水平定位精度	高程定位精度	收敛时间
5	BDS	0.5~2 m	1~3 m	40 min
6	BDS/GPS/GLONASS	5 cm	10 cm	60 s
7	BDS/GPS/GLONASS	$5\text{ mm}+1\times 10^{-6}\times D$	$10\text{ mm}+2\times 10^{-6}\times D$	

注:D为基线长度,单位km.

表5 北斗系统PPP服务质量指标参数

Table 5 BDS PPP service quality index parameters

QCI	精密轨道/cm	精密钟差/ns	水平定位精度/cm	高程定位精度/cm	收敛时间/min
8	10	0.3	30	60	30
9	10	0.3	3	5	15
10	10	0.3	3	5	2

表6 北斗系统 RSMC 服务质量指标参数

Table 6 BDS RSMC service quality index parameters

QCI	服务成功率/%	服务频度/(次/min)	终端发射功率/W	响应时延/s	服务容量/(万次/h)	单次报文最大长度/bit	定位精度/m	双向授时精度/ns
11	95	2	3	1	上行:1 200 下行:600	14 000	水平:20 高程:10	10

表7 北斗系统 GSMC 服务质量指标参数

Table 7 BDS GSMC service quality index parameters

QCI	服务成功率/%	终端发射功率/W	响应时延/s	服务容量/(万次/h)	单次报文最大长度/bit
12	95	10	1	上行:30 下行:20	560

表8 北斗系统 SAR 服务质量指标参数

Table 8 BDS SAR service quality index parameters

QCI	检测概率/%	独立定位概率/%	独立定位精度/km	地面接收误码率	可用性/%
13	99	98	5	5×10^{-5}	99.5

表4的GAS为地基增强系统服务,通过规划建设地基增强站网,利用卫星、移动通信、数字广播等播发手段,在服务区域内提供1~3 m、分米级和厘米级实时高精度导航定位服务.QCI值为5代表广域增强服务,包括单频伪距增强服务、单频载波相位增强服务和双频载波相位增强服务.QCI值为6代表区域增强服务,提供厘米级网络RTK服务.QCI值为7代表毫米级后处理相对基线测量服务.

表5的PPP为精密单点定位服务,用户除了接收公开服务外,还可以通过GEO卫星接收高频更新的高精度精密轨道和精密钟差改正信息,通道时延偏差以及大气延迟改正信息等,实现分米级甚至厘米级的定位导航.其中QCI值为8代表常规的精密单点定位(PPP)服务,系统播发精密轨道和精密钟差产品,通常要在30 min收敛到厘米级.QCI值为9代表PPP-AR,系统除了提供精密轨道和精密钟差产品外,还提供UPD产品缩短初始化收敛时间.QCI值为10代表PPP-RTK,通过密集基准站网设施,对大气延迟信息进行精密空域和时域建模,并将这些增强的改正信息播发给用户使用,大大缩短了模糊度收敛时间^[19].

表6的RSMC为区域短报文通信服务,通过GEO卫星为中国及周边地区特许用户提供短报文通信、RDSS定位和授时服务.短报文通信是北斗系统的特色服务,利用双向链路解决了特定情况(无通信网络)用户位置与状态的信息获取问题,广泛应用于灾害救援、应急指挥和通信安全等领域.其QoS指标参数包括服务成功率、服务频度、终端发射功率、响

应时延、服务容量、单次报文最大长度、定位精度和双向授时精度.

表7的GSMC为全球短报文通信服务,利用14颗MEO卫星,向位于地表及其以上1 000 km空间的特许用户提供服务,可覆盖包括南北极的全球区域,支持GNSS定位,双向通信提升了SAR的精度和协作能力,在生命安全领域作用巨大.其QoS指标参数包括服务成功率、终端发射功率、响应时延、服务容量和单次报文最大长度.

表8的SAR是北斗系统利用MEO卫星,按照国际搜救卫星组织标准,与其他搜救卫星系统联合向全球航海、航空和陆地用户提供免费遇险报警服务,并具备返回链路确认服务能力.其QoS指标参数包括检测概率、独立定位概率、独立定位精度、地面接收误码率和可用性.

3 QoS保障机制与指标映射

3.1 QoS保障机制

系统服务质量的保障依赖于各种关键技术和运维措施,QoS保障研究的挑战是在有限资源条件下如何满足用户需求.以北斗RNSS服务为例,其QoS保障机制如图2所示,受限于区域布站的有限条件,为了提高系统播发的卫星轨道和钟差的精度,基于北斗区域地面跟踪站和星间链路观测数据实现了全球卫星高精度定轨和时间同步^[20],其关键技术包括星地星间联合定轨、钟差约束定轨、星地星间时间同步和卫星钟差预报技术.而QoS指标参数中PDOP可用性和空间信号可用性主要取决于星座设计和卫

星健康状态;SISRE 由广播轨道精度和广播钟差精度决定;空间信号连续性与卫星健康状态和卫星计划中断信息密切相关;PNT 性能与 PDOP、SISRE 和定位模式相关.关键技术还包括光纤/卫通双路传输、数据处理与质量保障、电文设计与播发策略、故障快速恢复等.

3.2 QoS 指标映射

北斗系统服务有多个 QoS 指标,以 RNSS 为例,包括空间信号测距误差(SISRE)、定位/授时/测速精度、PDOP 可用性、空间信号可用性、定位可用性和空间信号连续性等.其中,SISRE、定位/授时/测速精度指标属于北斗服务的性能范畴,其他可用性和连续性指标属于服务可靠性范畴.上述系统服务指

标在平台服务层又对应更多的参数指标,QoS 映射就是将导航系统服务的 QoS 指标映射为平台服务层的指标,如图 3 所示.图中用三种不同的箭头标识 QoS 指标间不同的映射关系:正相关说明一个 QoS 指标的变化引起另外一个 QoS 指标相同趋势的变化(比如轨道精度或者钟差精度的提升,则带来 SISRE 精度的提升);负相关说明一个 QoS 指标的变化引起另外一个 QoS 指标相反趋势的变化(比如随着数据龄期的增加,SISRE 和定位精度都会降低);影响不确定是指一个 QoS 指标的变化对另外指标影响不确定(比如卫星健康信息影响单星的可用性和连续性,但对以星座为主的 PDOP 可用性和定位可用性影响不确定).

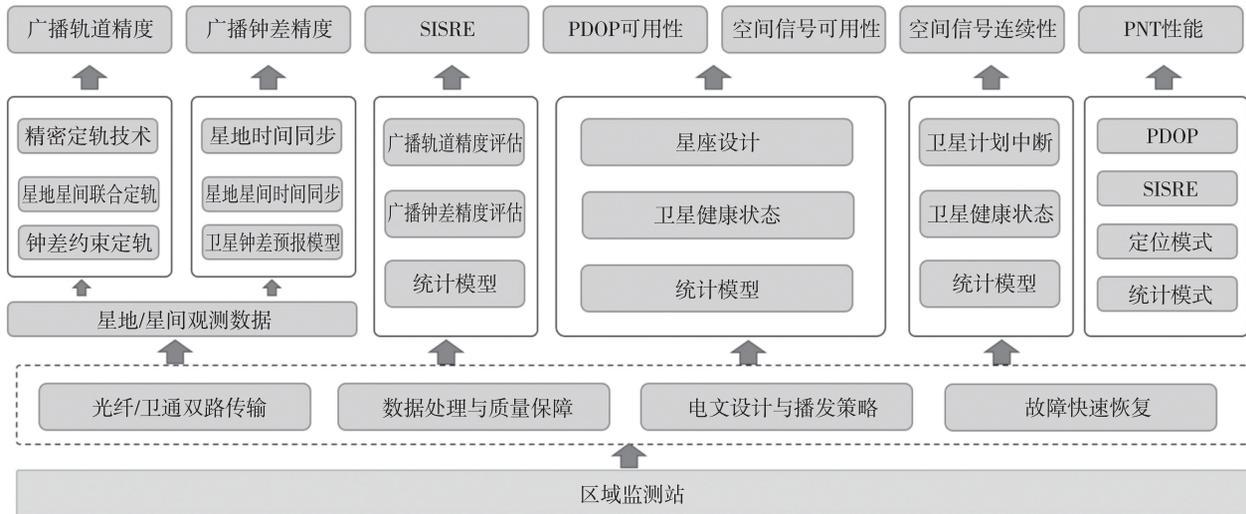


图 2 北斗 RNSS 服务质量保障机制
Fig. 2 BDS RNSS QoS guarantee mechanism

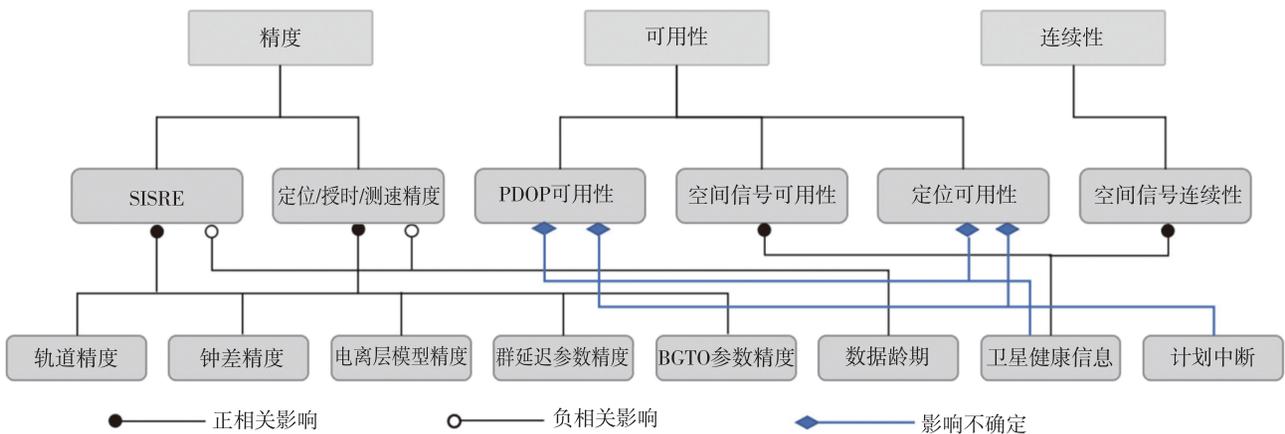


图 3 北斗 RNSS 服务质量指标映射
Fig. 3 Index mapping in RNSS QoS

4 结论

2020年6月,北斗三号导航卫星系统完成建设,正式提供全球服务.BDS-3在设计建设过程中,采用了基本系统与增强系统一体化的建设思路,融合定位、导航、授时、通信和搜救服务,形成了北斗系统的特色和优势.对提供多类服务的卫星导航系统服务质量进行评估具有科学和工程意义.

将通信领域内的QoS概念引入导航系统服务性能评估,探讨了一种涵盖RNSS、SBAS、GAS、PPP、RSMC、GSMC、SAR服务在内的综合评估指标体系,通过分析保障机制与指标映射,提供了在复杂情况下实现多QoS指标优化的途径,以及异常情况下快速定位故障源头,确保服务的稳定性与可靠性,给相关学者提供了一种思路.

参考文献

References

- [1] 宋晓丽,耿长江.卫星导航系统性能规范及其评估结果研究[J].导航定位学报,2019,7(2):10-17,35
SONG Xiaoli, GENG Changjiang. Research on standards and evaluation results of GNSS service performance[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(2): 10-17, 35
- [2] 焦文海,丁群,李建文,等.GNSS开放服务的监测评估[J].中国科学(物理学 力学 天文学),2011,41(5):521-527
JIAO Wenhai, DING Qun, LI Jianwen, et al. Monitoring and assessment of GNSS open services [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2011, 41(5):521-527
- [3] Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard[S].2008
- [4] 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:3.0版[S].2021
China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system open service performance standard: version 3.0[S].2021
- [5] European Global Navigation Satellite Systems Agency. European GNSS (Galileo) open service definition document: version 1.1[S].2019
- [6] 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
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7):810-821
- [7] 文浩,林闯,任丰原,等.无线传感器网络的QoS体系结构[J].计算机学报,2009,32(3):432-440
WEN Hao, LIN Chuang, REN Fengyuan, et al. QoS architecture in wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(3):432-440
- [8] 王尚广,孙其博,张光卫,等.基于云模型的不确定性QoS感知的Skyline服务选择[J].软件学报,2012,23(6):1397-1412
WANG Shangguang, SUN Qibo, ZHANG Guangwei, et al. Uncertain QoS-aware skyline service selection based on cloud model [J]. Journal of Software, 2012, 23(6): 1397-1412
- [9] 吴海玲,高丽峰,汪陶胜,等.北斗卫星导航系统发展与应用[J].导航定位学报,2015,3(2):1-6.
WU Hailing, GAO Lifeng, WANG Taosheng, et al. Development and application of BeiDou navigation satellite system [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015, 3(2):1-6
- [10] 张全德,范京生.我国卫星导航定位技术应用及发展[J].导航定位学报,2016,4(3):82-88
ZHANG Quande, FAN Jingsheng. Application and development of satellite navigation and positioning technology in China [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(3):82-88
- [11] Wang D H, Feng S J, Cui H Z. Low-cost vehicle GNSS positioning algorithm using SSR2OSR method [C]//32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. September 16-20, 2019, Miami, Florida. Institute of Navigation, 2019:3653-3665
- [12] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统应用服务体系:1.0版[S].2019
China Satellite Navigation Office. The application service architecture of BeiDou navigation satellite system: version 1.0[S].2019
- [13] 杨元喜,李金龙,王爱兵,等.北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):72-81
YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, et al. Preliminary evaluation of basic navigation and positioning performance of BeiDou regional satellite navigation system [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2014, 44(1):72-81
- [14] 于超,陈俊平,陈倩,等.北斗系统长期空间信号测距精度评估及精度提升分析[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(6):1064-1071
YU Chao, CHEN Junping, CHEN Qian, et al. Assessment of long-term BDS signal-in-space range error and its improvement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(6):1064-1071
- [15] Zhang Y Z, Kubo N, Chen J P, et al. Apparent clock and TGD biases between BDS-2 and BDS-3 [J]. GPS Solutions, 2020, 24(1):27
- [16] 贾小林,陶清瑞,王利军,等.GNSS基本服务性能评估[J].测绘科学,2021,46(1):62-75
JIA Xiaolin, TAO Qingrui, WANG Lijun, et al. The performance assessment of GNSS basic service [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(1):62-75
- [17] 郭树人,刘成,高为广,等.卫星导航增强系统建设与发展[J].全球定位系统,2019,44(2):1-12
GUO Shuren, LIU Cheng, GAO Weiguang, et al. Construction and development of satellite navigation augmentation systems [J]. GNSS World of China, 2019, 44(2):1-12
- [18] ICAO SARPs. Aeronautical telecommunications volume I: radio navigation aids [R]. International Civil Aviation

- Organization, 2006
- [19] 张小红, 胡家欢, 任晓东. PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9):1084-1100
ZHANG Xiaohong, HU Jiahuan, REN Xiaodong. New progress of PPP/PPP-RTK and positioning performance comparison of BDS/GNSS PPP [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9):1084-1100
- [20] 周善石, 胡小工, 刘利, 等. 导航卫星精密定轨与时间同步技术进展[J]. 天文学报, 2019, 60(4):59-68
ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, LIU Li, et al. Status of satellite orbit determination and time synchronization technology for global navigation satellites system [J]. Acta Astronomica Sinica, 2019, 60(4):59-68

Evaluation model and index system of quality of service of BDS-3

WU Xiaoli¹ ZHAO Yi^{1,2}

1 Qianxun Spatial Intelligence Inc., Shanghai 200438

2 Qianxun Spatial Intelligence(Zhejiang) Inc., Huzhou 313299

Abstract To comprehensively evaluate the services provided by the BeiDou Navigation Satellite System(BDS-3), a concept of Quality of Service(QoS) in network communication is introduced and then a QoS hierarchical model is proposed. A preliminary classified evaluation index design is given, covering BDS-3 services of Radio Navigation Satellite Service(RNSS), Satellite-Based Augmentation System(SBAS), Precise Point Positioning(PPP), Regional Short Message Communication(RSMC), Global Short Message Communication(GSMC), Search and Rescue(SAR) and Ground Augmentation System(GAS). Then the service guarantee mechanism and parameters mapping relationship are analyzed, thus to provide a way to optimize multiple QoS indicators in complex conditions and quickly locate the source of the fault in abnormal conditions. The research results are expected to provide references for the comprehensive evaluation of BDS performance.

Key words BDS-3; global navigation satellite system(GNSS); quality of service(QoS); performance evaluation