

doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2025.11.007

引用格式:吕志成,高沙沙,张悦.北斗系统平稳过渡对导航接收机服务性能影响分析[J].无线电工程,2025,55(11):2195-2205.

[LYU Zhicheng, GAO Shasha, ZHANG Yue. Analysis of Impact of BDS Smooth Transition on Navigation Receiver Service Performance [J]. Radio Engineering, 2025, 55(11): 2195-2205.]

北斗系统平稳过渡对导航接收机服务性能影响分析

吕志成¹,高沙沙²,张悦²

(1. 国防科技大学 电子科学学院,湖南长沙 410073;

2. 中国人民解放军 69016 部队,新疆乌鲁木齐 830102)

摘要:北斗卫星导航系统(Beidou Satellite Navigation System, BDS)接收机具备定位、导航、授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)和报文通信功能,在各行业中得到广泛应用。以北斗二号(BDS-2)区域系统向北斗三号(BDS-3)全球系统平稳过渡为背景,研究其对导航接收机服务性能影响及应对措施。通过对比 BDS-2 与 BDS-3 系统在信号类型、信号体制、星座规模和服务性能等方面的差异,阐述 BDS 平稳过渡的具体表现形式和状态变化趋势。重点分析 BDS 平稳过渡对导航接收机报文通信、导航定位、抗压制干扰等服务性能产生的影响。仿真结果表明,BDS-2 接收机(PRN01~37)在平稳过渡期间,RDSS 报文通信服务仍可正常使用;随着 BDS-2 卫星的陆续退役,空间可用卫星数将逐渐由 33 颗减少到 18 颗,全球范围内平均可见卫星数由 11.62 颗减少至 6.31 颗,平均几何精度因子(Geometric Dilution Precision, GDOP)值由 2.00 增加至 3.15,服务连续可用性由 93%降低到 46.46%,定位精度和服务范围均受到影响;BDS-3 卫星实施功率增强时,导航接收机可获得 7~15 dB 的抗压制干扰能力提升。针对导航接收机不同应用场景分别给出减弱或消除影响的应对措施,使导航接收机在 BDS 平稳过渡期间能够持续为用户提供可靠服务。研究成果可为北斗导航接收机的设计、研制和应用提供参考。

关键词:北斗卫星导航系统;平稳过渡;导航接收机;服务性能

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:1003-3106(2025)11-2195-11

Analysis of Impact of BDS Smooth Transition on Navigation Receiver Service Performance

LYU Zhicheng¹, GAO Shasha², ZHANG Yue²

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Unit 69016, PLA, Urumqi 830102, China)

Abstract: Beidou Satellite Navigation System (BDS) navigation receiver has the functions of Positioning, Navigation, and Timing (PNT) and message communication, and has been widely used in various industries. Under the background of the smooth transition from BDS-2 regional system to BDS-3 global system, its influence on the service performance of the navigation receiver and countermeasures are studied. The differences between BDS-2 and BDS-3 in signal type, signal system, constellation scale and service performance are compared, and the specific manifestations and state change trends of BDS smooth transition are expounded. The impact of the smooth transition of BDS on the service performance of navigation receiver is analyzed emphatically, including navigation and positioning, message communication and anti-suppression-jamming ability. The simulation results show that the RDSS message communication service can still be used normally during the smooth transition period of BDS-2 receiver (PRN01~37). With the progressive retirement of BDS-2 satellite, the number of satellites available in space will gradually decrease from 33 to 18, the average number of satellites visible worldwide will decrease from 11.62 to 6.31, the average Geometric Dilution Precision (GDOP) value will increase from 2.00 to 3.15, and the continuous availability of services will decrease from 93% to 46.46%, which will affect the positioning accuracy and service range. When the power of BDS-3 satellite is enhanced, the navigation receiver can obtain 7~15 dB

收稿日期:2025-07-15

基金项目:国家自然科学基金(U20A0193)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (U20A0193)

improvement in anti-suppression-jamming ability. According to the different application scenarios of the navigation receiver, the corresponding countermeasures are given to weaken or eliminate the impact, so that the navigation receiver can continuously provide reliable services for users during the smooth transition of the BDS. The research results can provide reference for the design, development and application of BDS navigation receivers.

Keywords: BDS smooth transition; navigation receiver; service performance

0 引言

BDS 是服务我国国家安全和经济社会发展的重要时空基础设施。2012 年 12 月, BDS-2 正式向我国及周边地区提供 PNT 以及短报文通信服务, 标志着我国成为继美国、俄罗斯之后第三个拥有自主卫星导航系统的国家。2020 年 7 月, BDS-3 全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 正式开通, 采用有源卫星无线电测定业务 (Radio Determination Satellite Service, RDSS) 和无源卫星无线电导航业务 (Radio Navigation Satellite Service, RNSS) 两种技术体制, 面向全球范围提供 PNT、全球短报文通信 (Global Short Message Communication, GSMC) 和国际搜救 (International Search and Rescue, SAR) 服务, 针对中国及周围地区, 提供星基增强 (Satellite-Based Augmentation System, SBAS)、地基增强 (Ground Augmentation System, GAS)、精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 和区域短报文通信 (Regional Short Message Communication, RSMC) 服务^[1]。与 BDS-2 相比, BDS-3 在星座规模、信号类型、系统性能和服务能力等方面均有较大的变化, 不可避免地会对各类导航接收机服务性能产生一定的影响。

中国卫星导航定位协会在其 2023 年 11 月发布的《中国北斗产业发展指数报告》中指出, 当前北斗已普遍融入智能手机、可穿戴设备等大众消费领域, 北斗终端应用规模达数千万量级, 每天有数千万用户数、亿次量级使用北斗定位导航^[2]。北斗导航接收机可为用户提供 PNT 和报文通信等服务, 常见形式有手持式、车载式、机载式和嵌入式等, 可满足单人、单车、单机和集成平台等不同应用环境要求。现阶段, BDS-2 卫星和 BDS-3 卫星同时提供服务, 随着 BDS-2 卫星逐渐失效, 最终将过渡到 BDS-3 卫星独立提供服务。本文通过对比 BDS-2 与 BDS-3 之间的差异性, 分析 BDS 平稳过渡对不同类型导航接收机服务性能产生的影响, 并给出应对措施使导航接收机能够持续为用户提供可靠服务。

1 BDS-2 与 BDS-3 系统差异性比较

1.1 信号类型

BDS-3 系统同时播发 BDS-3 新体制和 BDS-2 旧体制导航信号, 一方面全面提升系统的定位、测速、授时和短报文通信服务性能, 另一方面确保 BDS-2 系统失效后, 依托 BDS-3 系统为 BDS-2 用户继续提供服务, 实现由 BDS-2 系统向 BDS-3 系统的平稳过渡^[3]。BDS-2 和 BDS-3 卫星播发信号情况如图 1 所示。

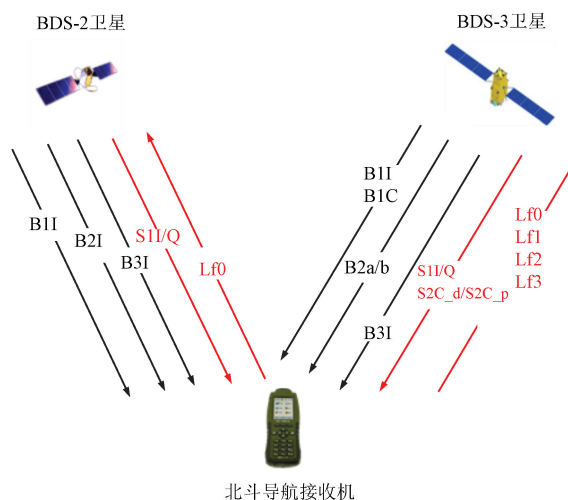


图 1 BDS 卫星播发信号情况

Fig. 1 Signal broadcast situation of BDS

可以看到, RNSS 信号方面, BDS-3 系统在保留 BDS-2 系统 B1I 和 B3I 两个旧体制导航信号的基础上, 新增了性能更优的 GNSS 兼容互操作信号 B1C, 并将 B2I 信号升级为性能更优的 B2a 和 B2b 信号, 通过信号体制优化设计进一步提高信号整体跟踪性能, 支持双频、三频信号组合使用等方式提高服务精度, 将极大地提升用户体验和选择方案。目前, RNSS 服务由 BDS-2 和 BDS-3 星座联合提供。

RDSS 入站信号方面, BDS-3 系统在保留 BDS-2 Lf0 旧体制入站信号的基础上, 新增 Lf1、Lf2、Lf3 三个新体制入站信号, 通过采取可变信息速率、优化信

道编码、提升接收灵敏度等技术将接收机 RDSS 入站信号发射功率由 BDS-2 的 10 W 降低至 BDS-3 的 1~3 W,在降低用户发射功率的同时提升系统用户容量。RDSS 出站信号方面,BDS-3 系统除了继续播发 BDS-2S1I/Q 旧体制出站信号外,还新增了 S2C_d、S2C_p 两个新体制信号,波束数量由 5 颗卫星共 10 个波束(每颗卫星播发 2 个波束信号)变为 3 颗卫星共 21 个波束(每颗卫星播发 6 个固定波束信号和 1 个可变波束信号),有效扩大了 RDSS 出站信号的覆盖范围和服务可靠性^[4]。

1.2 信号体制

BDS 导航信号特征参数如表 1 所示^[5-6]。可以看到,BDS-2 在 B1、B2、B3 三个频段提供 B1I、B2I、B3I 三个公开服务信号,中心频率分别为 1 561.098、1 207.14、1 268.52 MHz,调制方式均为二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying,BPSK)。BDS-3 在 B1、B2、B3 三个频段提供 B1I、B1C、B2a、B2b、B3I 五个公开服务信号,其中 B1 频段的中心频率为 1 575.42 MHz,采用正交复用二进制偏移载波(Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier,QM-BOC)将二进制偏移载波(Binary Offset Carrier,BOC)信号 BOC(1,1)和 BOC(6,1)分量分布调制在

载波的 2 个彼此正交的相位上,不仅避免了 2 个分量之间互相关分量的影响,而且可以采用类似 BOC(1,1)的低复杂度接收模式以及高性能匹配接收模式,与 GPS L1 和 Galileo E1 信号有很好的兼容性和互操作性,是主要的民用导航定位业务承载信号;B2 频段的中心频率为 1 176.45 MHz,将数据和导频分量正交调制组成信号分类支持任意的功率配比,具有较高的设计灵活性,且支持与 GPS L5 和 Galileo E5 之间的兼容互操作;B3 频段的中心频率为 1 268.52 MHz,采用双正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying,QPSK)星上复用技术,实现 2 个类 QPSK 信号的任意功率比恒包络调制输出,且能得到优化的解析实现和最大化的功率效率,解决 B3 频点平稳过渡的需求。

表 1 给出了当卫星仰角大于 5°,卫星发射的导航信号到达地球表面附近接收机天线输入端的最小功率。可以看到,BDS-3 信号较 BDS-2 信号落地电平提高约 3~10 dB,具有更好的抗压制干扰性能。表 1 中 GEO(Geosynchronous Orbit)为地球静止轨道,IGSO(Inclined Geosynchronous Orbit)为倾斜地球同步轨道,MEO(Medium Earth Orbit)为中距离轨道。

表 1 BDS 导航信号特征参数

Tab. 1 Signal characteristic parameters of BDS

系统	信号	载波频率/ MHz	调制方式	符号速率/ (sym/s)	最小功率/dBW
BDS-2	B1I	1 561.098	BPSK(2)	50	-163
	B2I	1 207.140	BPSK(2)	50	-163
	B3I	1 268.520	BPSK(10)	50	-163
BDS-3	GEO		BPSK(1)	500	-161~-153
	B1C	1 575.420	数据分量:BOC(1,1) 导频分量:QMBOC(6,1,4/33)	数据分量:100 导频分量:0	-159/-161
	GEO		BPSK(1)	500	-156
	B2a	1 176.450	数据分量:BPSK(10) 导频分量:BPSK(10)	数据分量:200 导频分量:0	-158
BDS-3	B2b	1 207.140	BPSK(10)	1 000	-160
	IGSO/MEO		BPSK(10)	1 000	-162/-160

为从系统层面提高卫星导航系统导航服务抗干扰能力,GPS 现代化计划提出了功率增强技术,包括调整卫星信号发射功率和播发点波束功率增强信号 2 种技术途径。调整卫星信号发射功率,就是在已播发信号的基础上,利用星上电源控制

系统提高信号发射功率,具有无需增加有效载荷、技术实现难度小等特点,但因星上能源有限制约了信号增强幅度,如美国 GPS-IIF 卫星可实现军用导航信号功率 7~10 dB 的幅度调整。播发点波束功率增强信号,则是利用星上专用有效载荷将信

号能量集中在一个较窄的波束向外辐射,实现增强信号的区域覆盖,具有信号功率增强幅度大、信号覆盖范围有限的特点,该技术需要点波束天线、功率放大器、波束指向控制机构等专用有效载荷的支持,不但增加了卫星的质量、体积、成本和功耗,还对卫星控制系统和供电系统等提出了更高要求,实现技术难度较大,如美国 GPS-III C 卫星利用点波束功率增强技术实现军用 M 码信号在点波束覆盖区域内功率增强 20 dB,这将大大增强系统的抗干扰能力^[7-8]。

1.3 星座规模

BDS-2 系统 2012 年完成 14 颗卫星组网(5GEO+5IGSO+4MEO),主要为亚太地区用户提供定位、测

速、授时和短报文通信服务。在 2016 年系统对外发布的接口控制文件(Interface Control Document, ICD)中,定义卫星伪随机噪声(Pseudo Random Noise, PRN)码序号为 01~37^[9]。

BDS-3 系统 2020 年完成 30 颗卫星组网(3GEO+3IGSO+24MEO),将服务范围由区域扩展至全球,同时为中国及周边地区用户新增 SBAS、GAS、PPP 等服务。在 2019 年系统对外发布的 ICD 中,定义卫星 PRN 序号为 01~63^[10]。

截止 2024 年 3 月 23 日,BDS 在轨工作卫星共计 44 颗,其中 BDS-2 卫星 15 颗、BDS-3 卫星 29 颗,如表 2 所示。另外还有 8 颗 BDS-3 卫星处于在轨测试或试验状态^[11]。

表 2 BDS 在轨工作卫星

Tab. 2 Working satellites of BDS in orbit

PRN	SVN	卫星类型	PRN	SVN	卫星类型	PRN	SVN	卫星类型
01	GEO-8	BDS-2	19	MEO-1	BDS-3	35	MEO-16	BDS-3
02	GEO-6	BDS-2	20	MEO-2	BDS-3	36	MEO-17	BDS-3
03	GEO-7	BDS-2	21	MEO-3	BDS-3	37	MEO-18	BDS-3
04	GEO-4	BDS-2	22	MEO-4	BDS-3	38	IGSO-1	BDS-3
05	GEO-5	BDS-2	23	MEO-5	BDS-3	39	IGSO-2	BDS-3
06	IGSO-1	BDS-2	24	MEO-6	BDS-3	40	IGSO-3	BDS-3
07	IGSO-2	BDS-2	25	MEO-11	BDS-3	41	MEO-19	BDS-3
08	IGSO-3	BDS-2	26	MEO-12	BDS-3	42	MEO-20	BDS-3
09	IGSO-4	BDS-2	27	MEO-7	BDS-3	43	MEO-21	BDS-3
10	IGSO-5	BDS-2	28	MEO-8	BDS-3	44	MEO-22	BDS-3
11	MEO-3	BDS-2	29	MEO-9	BDS-3	45	MEO-23	BDS-3
12	MEO-4	BDS-2	30	MEO-10	BDS-3	46	MEO-24	BDS-3
13	IGSO-6	BDS-2	32	MEO-13	BDS-3	59	GEO-1	BDS-3
14	MEO-6	BDS-2	33	MEO-14	BDS-3	60	GEO-2	BDS-3
16	IGSO-7	BDS-2	34	MEO-15	BDS-3			

1.4 服务性能

BDS 创新融合了导航与通信能力,提供多种服务,如表 3 所示^[12-13]。从服务类型看,一方面 BDS-3 系统在全面兼容 BDS-2 系统 PNT 和 RSMC 服务的基础上,通过扩展服务范围、增加信号分量、分离信号频谱、优化调制方案等方式进一步提升了系统服务性能,扩展了服务范围;另一方面,BDS-3 系统还能够为全球用户提供 GSMC、SAR 服务,为中国及周边区域提供 SBAS、GAS 和 PPP 等服务。

北斗系统提供 PNT 和短报文通信 2 类服务的性能如表 4 所示^[14-17]。通过对比可以看到,BDS-3 系统将 PNT 和短报文通信服务由区域扩展至全球,并显著提升了服务精度。在 PNT 服务方面,BDS-3 采用高精度星载原子钟、星上完好性监测和星间链路传输等技术,将中国及周边地区基本的定位、测速和授时精度分别提升至 5 m、0.1 m/s 和 10 ns,同时显著提升了系统服务可用性。在 RSMC 服务方面,BDS-3 在全面兼容 BDS-2 短报文服务的基础上,将服务容量提升 10 倍,用户发射功率降低 1/10,最大

单次报文长度增加至 14 000 bit(1 000 个汉字),短报文服务能力大幅提升,既能传输文字,也可传输语音和图片,为北斗短报文大规模应用推广以及器件小型化、低功耗设计提供了条件。在 GSMC 服务方

面,BDS-3 系统可以为用户提供最大单次报文长度为 560 bit(40 个汉字)的全球随遇接入报文通信服务。

表 3 BDS 提供的服务类型
Tab. 3 Service types provided by BDS

服务类型	BDS-2		BDS-3		
	信号/频段	播发手段	信号/频段	播发手段	
全球范围	PNT	B1I、B3I	5GEO+5IGSO+4MEO	B1I、B3I B1C、B2a、B2b	3GEO+3IGSO+24MEO 3IGSO+24MEO
	全球短报文通信	—	—	上行:L 下行:GSMC-B2b	上行:14MEO 下行:3IGSO+24MEO
	SAR	—	—	上行:UHF 下行:SAR-B2b	上行:6MEO 下行:3IGSO+24MEO
中国及周边	SBAS	—	—	BDSBAS-B1C、BDSBAS-B2a	3GEO
	地基增强	—	—	2G、3G、4G、5G	移动通信网络 互联网络
	PPP	—	—	PPP-B2b	3GEO
区域短报文通信	上行:Lf0 下行:S1I、S1Q	5GEO	上行:Lf0、Lf1、Lf2、Lf3 下行:S1I、S1Q/S2Cd、S2Cp	3GEO	

表 4 BDS 提供的服务性能
Tab. 4 Service performance provided by BDS

服务类型	性能指标	BDS-2		BDS-3
		中国及周边	中国及周边	全球
PNT	定位精度	水平:10 m	水平:5 m	水平:10 m
		垂直:10 m	垂直:5 m	垂直:10 m
	测速精度	0.2 m/s	0.1 m/s	0.2 m/s
	授时精度	50 ns	10 ns	20 ns
	服务可用性	优于 95%	优于 99%	优于 95%
短报文通信	服务容量	上行:210 万次/小时 下行:138 万次/小时	上行:1 200 万次/小时 下行:600 万次/小时	上行:30 万次/小时 下行:20 万次/小时
	终端发射功率	10 W	1~3 W	10 W
	单次报文最大长度	120 个汉字 (1 680 bit)	1 000 个汉字 (14 000 bit)	40 个汉字 (560 bit)
	响应时间	≤1 s	≤1 s	≤1 min
	服务成功率	优于 95%	优于 95%	优于 95%

2 BDS 平稳过渡对接收机的影响

2.1 对导航定位服务的影响

从信号类型来看,BDS-3 系统完全保留了 BDS-2 系统 B1I、B3I 两个旧体制公开服务信号,同时增加

B1C、B2a/b 两个新体制公开服务信号,因此民用 BDS-2 导航接收机在 BDS 升级期间可以不受影响地继续提供 RNSS 服务。

从卫星数量来看,2016 年发布的 ICD 定义卫星 PRN 号为 01~37,2019 年发布的 ICD 定义卫星 PRN

号为 01~63。因此,按照 2016 年 ICD 研制的 BDS-2 导航接收机仅能支持 PRN 号为 01~37 的卫星信号,无法支持 PRN 号为 38~63 的卫星信号。假设在表 2 北斗卫星星座基础上,停用全部 15 颗 BDS-2 卫星信号,则北斗二号导航接收机仅支持接收 PRN 号小于 38 的 18 颗 BDS-3 卫星信号,无法使用全部 BDS-3 卫星信号资源,进而影响定位、测速和授时等服务精度。

针对北斗导航接收机可能面临的 5 种典型应用场景,采用格网分析法分析不同可用卫星信号条件下的系统服务性能,如表 5 所示。仿真过程中,将全球区域按照经度 5°、纬度 5°划分成若干网格,设置卫星信号接收截止角为 5°,可用性门限 GDOP 值为 20,仿真时长为 24 h,仿真分析 5 种典型应用场景可用卫星信号条件下全球范围可见卫星数和 GDOP 值等服务性能。

表 5 北斗导航接收机典型应用场景
Tab. 5 Typical application scenarios of BeiDou navigation receiver

场景	描述	卫星数	可用卫星 PRN 号
一	全部 BDS-2 卫星可用	15	PRN 01~14,16
二	全部 BDS-2 和部分 BDS-3 卫星可用	33	PRN 01~14,16,19~30,32~37
三	全部 BDS-2 和全部 BDS-3 卫星可用	44	PRN 01~14,16,19~30,32~46,59~60
四	部分 BDS-3 卫星可用	18	PRN 19~30,32~37
五	全部 BDS-3 卫星可用	29	PRN 19~30,32~46,59~60

全球范围北斗导航接收机系统服务性能仿真结果如图 2~图 6 所示,数值分析结果见表 6。仿真结果表明,场景三具有最优的服务性能,原因是接收机可以使用全部的 BDS-2 和 BDS-3 系统卫星信号资源,具有最多的可见卫星数和最小的平均 GDOP 值,能够为全球区域提供 100%的连续性服务,特别是我国及周边地区由于被 7 颗 GEO 和 10 颗 IGSO 卫星增强覆盖,比其他地区可见卫星数多一倍、GDOP 值减小 1/2,可以获得更高的定位精度。场景五的服务性能次之,且同样能够为全球区域提供 100%的连续性服务,原因是 BDS-3 星座采用混合星座构型设计,兼具区域增强和全球覆盖能力,具有较多的可见卫星数量和较小的 GDOP 值,满足全球用户的应用需求。场景二可为全球 93%的区域提供连续性服务,原因在于接收机无法接收 PRN37 号以后的 BDS-3 卫星信号,因此在部分区域因可见卫星空间几何分布不佳使得 GDOP 值超过可用性门限要求。场景四可见卫星数较少,仅能为全球 46.46%的区域提供连续性服务,原因是接收机仅能使用 PRN19~37 的 18 颗 MEO 卫星信号,全球超过一半的区域 GDOP 超过可用性门限要求。场景一全球服务性能最差,仅能为全球 33.58%的区域提供连续性服务,原因是 BDS-2 是区域导航系统,主要以服务亚太地区为主,无法覆盖全球区域(图 2 平均 GDOP 值分布图中白色区域表示可见卫星数少于 4 颗,无法进行定位解算和 GDOP 值计算);与场景四相比,虽然全球范围连续可用性略差,但对于亚太地区来说,由于 GEO 和 IGSO 卫星的存在,使得场景二具有更多的可见卫星数和更小的 GDOP 值,因此可以提供更高精度的导航定位服务。

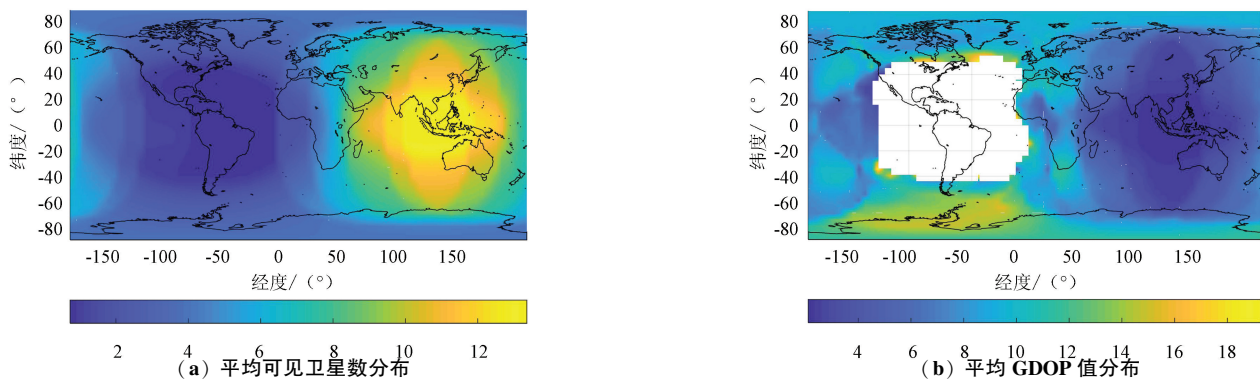


图 2 场景一全球范围系统服务性能分析

Fig. 2 Global system service performance analysis of Senario 1

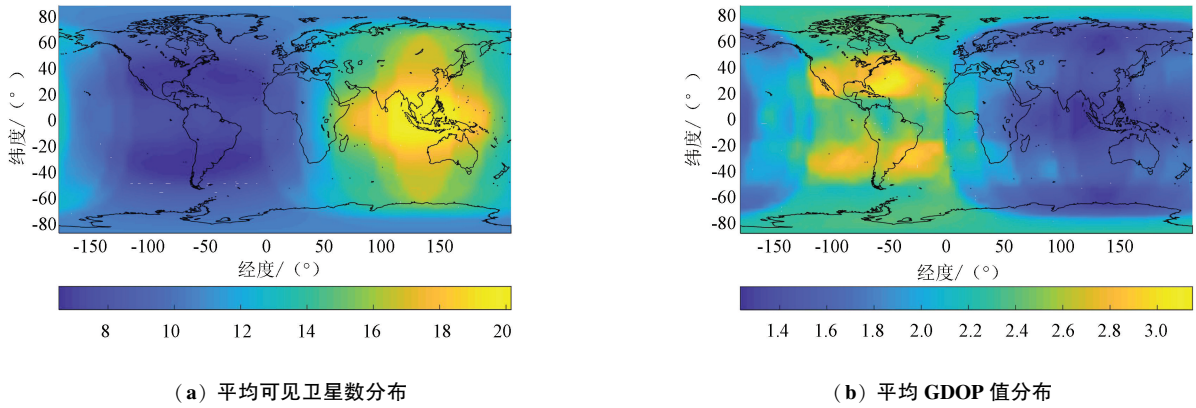


图 3 场景二全球范围系统服务性能分析

Fig. 3 Global system service performance analysis of Scenario 2

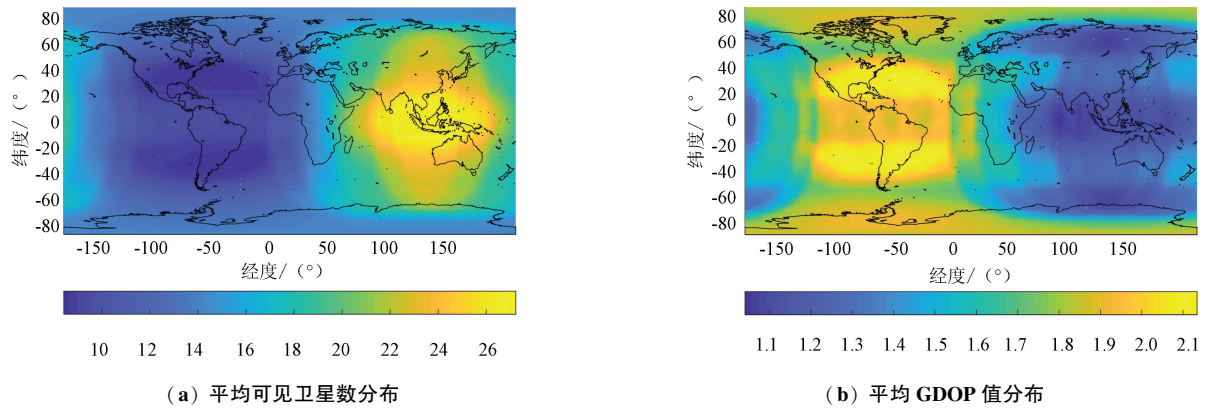


图 4 场景三全球范围系统服务性能分析

Fig. 4 Global system service performance analysis of Scenario 3

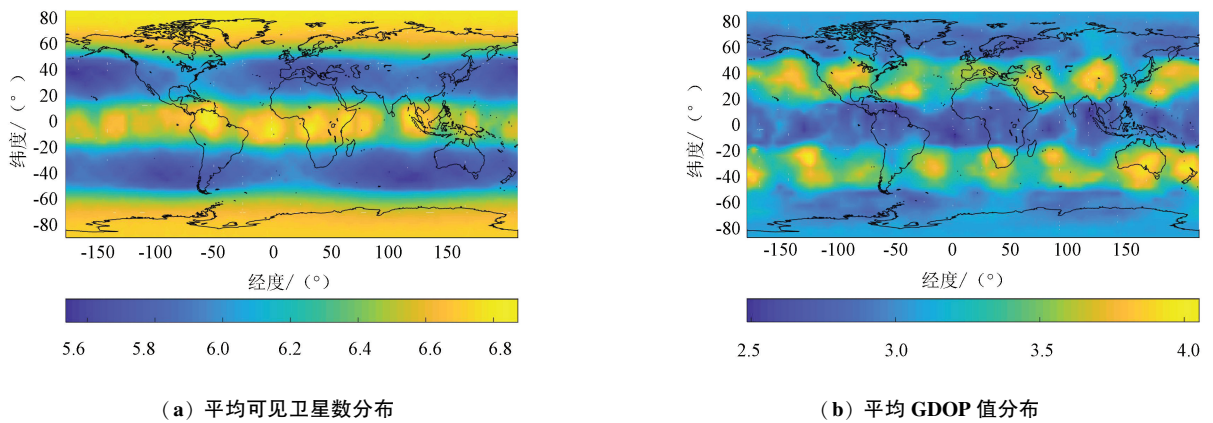


图 5 场景四全球范围系统服务性能分析

Fig. 5 Global system service performance analysis of Scenario 4

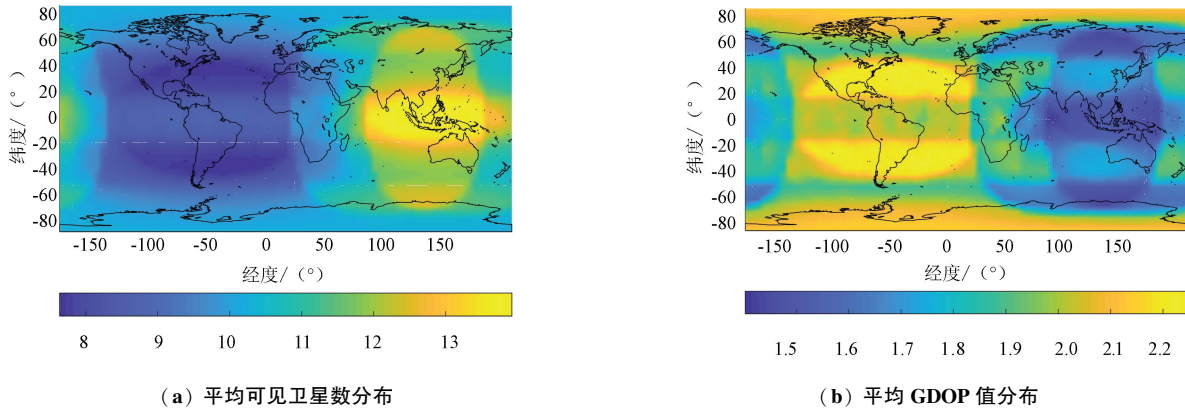


图 6 场景五全球范围系统服务性能分析

Fig. 6 Global system service performance analysis of Scenario 5

表 6 北斗导航接收机全球范围系统服务性能统计

Tab. 6 Statistical results of service performance of BeiDou navigation receiver in global regions

场景	平均可见卫星数			GDOP 值			连续可用性/%
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	
一	0.73	13.36	5.31	2.10	19.29	6.82	33.58
二	6.52	20.15	11.62	1.23	3.15	2.00	93.00
三	8.42	27.23	15.52	1.04	2.13	1.61	100
四	5.54	6.87	6.31	2.49	4.05	3.15	46.46
五	7.64	13.92	10.20	1.40	2.25	1.90	100

表 7 北斗导航接收机固定点位服务性能统计

Tab. 7 Statistical results of service performance of BeiDou navigation receiver at fixed points

场景	平均可见卫星数			GDOP 值			定位精度/m		连续可用性/%
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	水平	垂直	
一	10.00	14.00	11.25	1.63	3.44	2.68	0.69	5.63	100
二	14.00	20.00	17.10	1.70	2.23	1.49	0.47	4.59	100
三	20.00	28.00	23.19	0.93	1.92	1.30	0.32	3.28	100
四	3.00	9.00	5.84	1.66	16.86	3.36	1.07	8.59	89.97
五	10.00	15.00	11.94	1.20	2.63	1.75	0.79	5.17	100

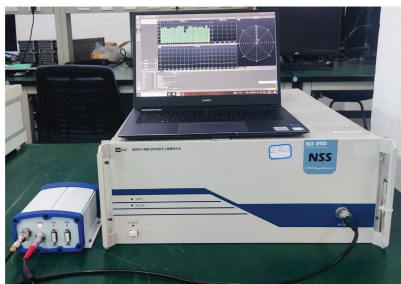


图 7 室内有线测试平台

Fig. 7 Indoor wired testing platform

BDS 采用 GEO+IGSO+MEO 混合星座构型实现对我国及周边地区的增强覆盖。为分析增强覆盖区域内导航服务性能,利用北斗卫星导航信号源和接收机搭建室内有线测试平台如图 7 所示。导航信号源可以模拟产生任意位置、任意动态的卫星导航信号,常用于卫星导航接收机的测试评估^[17]。利用导航信号源模拟产生固定坐标点位(40°N,116°E)的北斗卫星导航信号,接收机以 1 Hz 为频度输出定位结果,分别统计不同场景条件下接收机可见卫星数、GDOP 值以及定位精度,统计结果如表 7 所示。

实验结果表明,场景三接收机能够接收全部 BDS-2 和 BDS-3 卫星系统信号,可见卫星数量最多、GDOP 值最小,定位精度最优。场景一为 BDS-2 系统独立提供服务,与场景五 BDS-3 系统独立提供服务相比,可见卫星数相当,因空间几何分布原因导致 GDOP 值和定位精度略差。场景四有 10.03% 的时间因可见卫星数不足 4 颗或 GDOP 值超过可用性门限要求而无法提供导航定位服务,并且因可用卫星数较少且空间几何分布较差,导致仿真时段内接收机定位精度变化较大,无法提供连续、可靠的导航定位服务。

2.2 对报文通信服务的影响

BDS 短报文服务是 BDS 特有功能, BDS-2 系统 5 颗 GEO 卫星实现对我国及周边地区的信号覆盖, 支持单次最多传输报文 120 个汉字。BDS-3 对区域短报文服务进行了全面继承, 在保持平稳接替的基础上, 通过增加波束数量拓展服务区域、扩大用户容量并降低发射功率。针对 BDS-2 短报文资源有限等问题, BDS-3 系统通过优化信号体制、扩容硬件资源、增加星间链路等技术手段对系统服务能力进行优化升级, 一方面将区域短报文服务单次报文通信长度增大至 1 000 个汉字, 并支持图片、语音传输; 另一方面新增全球短报文服务, 可实现单次传输报文 40 个汉字^[18]。因此, 在 BDS 升级过程中, BDS-2 导航接收机虽然无法获得 BDS-3 带来的性能提升, 但正常使用不会受到任何影响。在 BDS 接收机实际使用过程中, 还需要注意北斗系统升级带来的以下几方面的影响:

- ① 由于报文长度不同, BDS-3 导航接收机与 BDS-2 导航接收机进行 RSMC 时, 应限制单次报文传输长度不超过 120 个汉字。
- ② 由于信号体制不同, BDS-2 指挥型接收机不具备 BDS-3 新体制出站信号接收处理能力, 因此不能兼收 BDS-3 下属用户接收机, 共用时应合理编配指挥关系。
- ③ BDS-3 RDSS 区域短报文信号仍以服务中国及周边地区为主, 如果北斗导航接收机需要在全区域使用短报文通信服务, 则需要进行软硬件升级以支持全球短报文服务。

2.3 对抗压制干扰能力的影响

提高卫星导航信号发射功率是提升导航接收机抗干扰能力的有效途径之一, BDS-3 新体制信号功率较 BDS-2 提升约 3~10 dB, 利用点波束功率增强技术可实现 20 dB 增强信号的区域覆盖, 进一步提升接收机抗压制干扰能力。以 BDS B1 频点为例, 假设其抗宽带干扰品质因数 Q 取值 4.3, 图 8 给出了不同载噪比条件下, 接收机功率增强幅度与抗干扰容限值对应关系的仿真分析结果。可以看出, 提高导航接收机灵敏度和增大导航信号功率均可有效提升接收机抗干扰容限, 进而增强接收机复杂电磁环境下的生存能力。

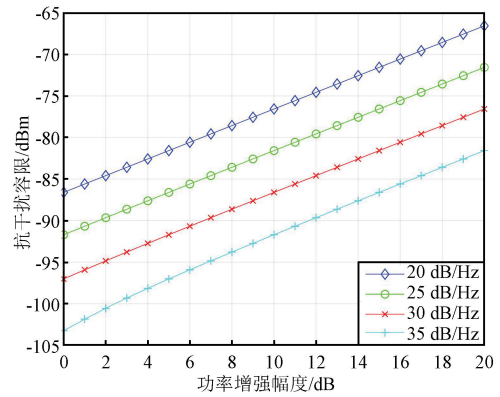


图 8 不同载噪比门限条件下抗干扰容限随功率增强幅度变化曲线

Fig. 8 Curve of anti-jamming tolerance variation with power enhancement amplitude under different carrier to noise ratio threshold conditions

假设使用一个 1 W 干扰源对导航接收机实施宽带压制干扰, 图 9 给出了不同干信比条件下, 接收机功率增强幅度与有效干扰距离对应关系的仿真分析结果。可以看到, 提高接收机抗干扰门限和增大导航信号功率均可以压缩干扰信号的有效干扰距离。以抗干扰门限 90 dB 为例, 导航信号功率增加了 20 dB, 可将有效干扰距离由 67 m 压缩至 6.7 m, 显著提升了导航接收机的抗干扰能力。

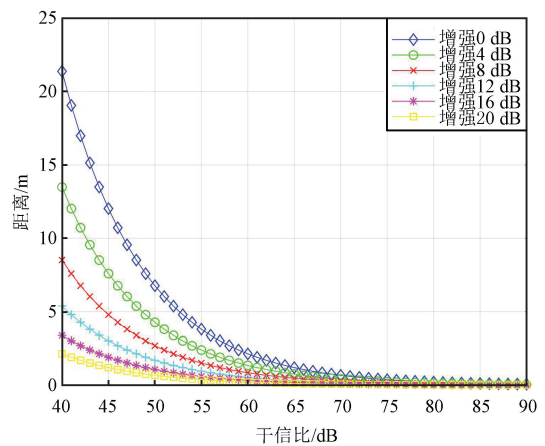


图 9 不同功率增强幅度条件下有效干扰距离随干信比门限变化曲线

Fig. 9 Curve of effective jamming distance with jamming - to - signal ratio threshold under different power enhancement amplitudes

3 接收机应对 BDS 平稳过渡的措施

根据中国市场调研在线网发布的 2023—2029 年中国北斗接收机行业市场深度监测及发展趋势预测报告分析,随着 BDS 服务不断完善、信号处理技术持续进步以及北斗行业应用日益广泛,北斗接收机产业正进入快速发展期。自 2012 年 BDS-2 系统开通运行以来,具备 PNT 和短报文通信的 BDS-2 导航接收机在各行业得到成功应用,表现出产品型号多、数量规模大、覆盖行业广、技术状态好等特点,是 BDS 服务的主要对象。目前,BDS-2 系统正逐步向 BDS-3 系统过渡,各型 BDS-3 导航接收机正在紧锣密鼓地开展研制和试验,最终将形成 BDS-3 系统同时向 BDS-2 和 BDS-3 导航接收机提供服务的应用场景。

因此,为降低或消除 BDS 平稳过渡对 BDS-2 导航接收机服务性能产生的影响,同时考虑一体筹划 BDS-3 导航接收机的研制和应用,应按照“平稳过渡、分类施策、统筹实施”的原则,根据导航接收机的工作模式和应用场景,分别制定北斗导航接收机应用策略要求。

(1) 对于在用的北斗导航接收机,可采取如下应对措施:

① 对于使用 B1I、B3I 信号进行单频、双频定位的北斗导航接收机,如果已经支持 PRN 号 01~63 的卫星信号接收,可以不做改动,继续使用;如果仅支持 PRN 号 01~37 的卫星信号接收,需要及时升级软件支持 PRN 号 1~63 的卫星信号接收,避免因 BDS-2 卫星失效造成可用卫星数减少影响定位精度。

② 对于使用 B2I 信号进行单频或双频定位的北斗导航接收机,由于 BDS-3 卫星不再播发此类信号,因此需要接收机进行软件和硬件升级,改用 BDS-3 新体制信号进行导航定位授时服务。

③ 对于有海外应用需求的北斗导航接收机,如果当前仅能接收 BDS-2 信号,由于其服务范围仅限于中国及周边地区,无法满足应用需求,因此需要进行软件和硬件升级,使接收机能够接收 BDS-3 信号,以支持全球范围内的 PNT 和短报文服务。

④ 对于有应对复杂电磁干扰应用需求的北斗导航接收机,可以通过加装阵列抗干扰天线,同时进行软件和硬件升级具备 BDS-3 点波束功率增强信号接收能力,进一步提升抗干扰性能。

(2) 对于新研的北斗导航接收机,应根据 BDS-3

系统制定技术指标要求,全面支持 BDS-3 信号体制,为用户提供更好的服务质量,避免后续软硬件升级带来的资源浪费。

4 结论

2020 年 7 月 31 日,BDS-3 系统正式开通运行,标志着 BDS 迈进全球服务新时代。当前,BDS 正处于 BDS-2 和 BDS-3 卫星同时提供服务,逐渐向 BDS-3 卫星独立提供服务的过渡阶段,信号类型、信号体制、卫星数量和服务性能等方面的变化势必会对已得到广泛应用、规模庞大的 BDS-2 导航接收机服务性能产生影响。本文通过仿真分析 BDS 平稳过渡对不同状态北斗导航接收机服务性能影响,得到以下结论:

① BDS-2 接收机 RDSS 报文通信服务在 BDS 平稳过渡期间不会受到影响。但由于 BDS-2 与 BDS-3 系统在报文长度、信号体制方面存在差异,在 2 种类型接收机进行报文通信时应同时使用 BDS-2 体制信号,且最大信息长度不能超过通信等级要求。

② BDS-2 接收机 RNSS 导航定位应用需要考虑 BDS 平稳过渡中,BDS-3 卫星将不再播发 BDS-2 B2I 信号,因此采用 BDS-2 B2I 信号进行单频、双频定位的接收机存在因 BDS-2 卫星逐渐到寿退役导致定位精度下降或无法定位的风险,实际应用中应提早规划使用 BDS-3 新体制信号代替不再使用的 BDS-2 旧体制信号。

③ 导航接收机服务性能与其支持的卫星信号 PRN 范围密切相关,对于仅支持目前在轨 BDS-2 卫星 (PRN01~16) 的接收机,系统过渡阶段可为我国及周边提供定位服务,过渡到 BDS-3 系统后,因 BDS-2 卫星退役将无法继续提供服务,建议整机替换为 BDS-3 接收机。对于可支持全部 BDS-2 卫星 (PRN01~37) 的接收机,过渡到 BDS-3 系统后,空间可用卫星数、平均可见卫星数和服务连续性等数值均明显下降,定位精度和服务范围均受到较大影响,建议通过软硬件升级支持 BDS-3 卫星信号。对于同时支持全部 BDS-2 和 BDS-3 卫星 (PRN01~63) 的接收机,完成 BDS-3 系统过渡后,对定位精度影响较小,全球服务连续可用性仍可保持 100% 不变,可持续为全球用户提供连续可靠服务。

④ BDS-3 系统具备通过调整卫星信号发射功率和播发点波束功率增强信号的方式,可提高导航信号抗干扰性能,因此对于工作在复杂电磁环境条件下的导航接收机来说,建议升级支持 BDS-3 系统

信号,获得 7~15 dB 的抗干扰能力提升。

综上所述,在实际应用中需要根据北斗导航接收机的工作状态和应用场景采取软件升级、硬件更换或整机替换等措施,使北斗导航接收机能够在 BDS 由 BDS-2 向 BDS-3 过渡期间持续为用户提供连续、可靠的高质量服务。



参考文献

- [1] 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)[R]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室,2021.
- [2] 中国卫星导航定位协会. 中国北斗产业发展指数报告[R]. 北京:中国卫星导航定位协会,2023.
- [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.
- [4] 李鑫,展昕,陈亮,等. 北斗 RDSS 授时性能分析[J]. 无线电工程,2023,53(1):140-147.
- [5] 陈忠贵,武向军. 北斗三号卫星系统总体设计[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(6):835-845.
- [6] 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.
- [7] 林悦,许昭霞,满小媛. 美国导航卫星功率增强技术研究[C]//第十二届中国卫星导航年会论文集——S03 导航信号与信号处理. 南昌:[出版者不详],2021:72-75.
- [8] 吕志成,李蓬蓬,李立勋. 卫星导航系统点波束功率增强信号参数优化设计[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(10):2954-2960.
- [9] 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(2.1版)[R]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室,2016.
- [10] 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)[R]. 北京:中国卫星导航系统管理办公室,2019.
- [11] 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心北斗系统状态[EB/LO]. (2024-03-23)[2025-06-15]. <https://www.csno-tarc.cn/system/constellation>.
- [12] 叶小舟. 北斗三号系统新质服务模式性能评估与优化[D]. 长沙:国防科技大学,2020.
- [13] 高为广,隋叶叶,李敏,等. 北斗系统 RNSS 服务下行导航信号应用模式及使用建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(9):1444-1454.
- [14] 贺延伟,贾小林,刘家龙,等. BDS-3 与 BDS-2 基本服务性能对比分析[J]. 导航定位学报,2022,10(1):20-28.
- [15] 王西龙,许小龙,赵齐乐. 北斗三号系统信号质量分析及轨道精度验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):611-619.
- [16] 段博文,白征东,郭锦萍. 北斗系统观测数据质量分析[J]. 测绘工程,2024,33(3):60-66.
- [17] 王涵,姚曜,刘恩伯,等. 多体制卫星导航信号实时模拟仿真与处理技术[J]. 无线电工程,2024,54(8):1954-1969.
- [18] 梁熙民. 北斗三号卫星 RDSS 通信业务关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.

作者简介

吕志成 男,(1982—),博士,副研究员。主要研究方向:卫星导航建模仿真与测试评估技术。

高沙沙 男,(1986—),工程师。主要研究方向:卫星导航集成应用与试验验证技术。

张悦 男,(1989—),工程师。主要研究方向:卫星导航终端安全运用与维护保障。