

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.06.001

北斗三号卫星系统总体设计

陈忠贵, 武向军

(中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部, 北京, 100094)

摘要: 北斗三号全球卫星导航系统(The third generation Beidou navigation satellite system, BeiDou-3)于2020年7月31日正式开通运行。BeiDou-3不仅提供定位导航授时服务,同时提供具有北斗特色的多功能服务,包括区域短报文、星基增强、精密单点定位、全球短报文通信、国际搜救等服务。本文从卫星系统设计角度,详细分析介绍了BeiDou-3的功能,并讨论了卫星采用的主要新技术,包括卫星信号体制、星间链路、时频基准、星载综合电子、高效电源以及器部件的自主可控等。最后,对三类轨道的卫星设计进行了综合论述。

关键词: 导航卫星; 卫星系统; 北斗三号; 总体设计

中图分类号: V474 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2020)06-0835-11

General Design of the Third Generation BeiDou Navigation Satellite System

CHEN Zhonggui, WU Xiangjun

(Department of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China)

Abstract: The third generation Beidou navigation satellite system (BeiDou-3) officially started full-scale global services on July 31, 2020. The Beidou satellites are designed to provide positioning, navigation and timing services, as well as certain specific functions, like local and global short message communication, satellite-based augmentation, precise point positioning and international search-and-rescue service. This paper introduces the functions of BeiDou-3 in terms of the design principles and new technologies that are integrated into the system. Some novel breakthroughs are particularly analyzed, including the satellite signal system, inter-satellite links, time and frequency standards, space-borne electronics, effective powers and overall automatic controls. Finally, the general design of satellites that specifically targets three kinds of orbits is reviewed.

Key words: navigation satellites; satellite system; the third generation Beidou navigation satellite system; general design

北斗卫星导航系统是中国着眼于国家安全和经济社会发展需要,自主建设、独立运行的卫星导航系统,是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要空间基础设施。

中国坚持“自主、开放、兼容、渐进”的原则建设和发展北斗系统,实施“三步走”发展战略^[1]。

北斗一号卫星导航系统于1994年正式启动建

设,于2000年12月建成并投入运行。在国际上首先实现了利用地球同步轨道卫星和双星定位原理完成定位授时服务,同时具备短报文和位置报告能力;用较少经费,构建了服务于中国及周边地区的双星定位系统,使中国成为世界上第3个拥有自主卫星导航系统的国家。

北斗二号卫星导航系统于2004年正式启动建

收稿日期:2020-10-30;修订日期:2020-12-01

作者简介:陈忠贵,男,博士生导师,研究员,北斗三号卫星系统总设计师。主要研究方向:卫星导航,飞行器设计,一般力学。

通信作者:陈忠贵,E-mail:chenzhabd@163.com。

引用格式: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. CHEN Zhonggui, WU Xiangjun. General design of the third generation BeiDou navigation satellite system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2020, 52(6):835-845.

设,并于2012年12月正式开通运行,为中国周边提供连续稳定导航、定位、授时以及报文通信服务,向全世界发布接口控制文件。

北斗三号卫星导航系统(The third generation Beidou navigation satellite system, BeiDou-3)于2009年正式启动研制,2015年发射5颗新技术试验卫星,2020年6月完成了全部30颗组网卫星发射任务,并于2020年7月31日正式开通,标志着北斗全球卫星导航系统全面建成。

北斗三号全球卫星导航系统本着服务全球、富有特色、自主可控、世界一流的研制目标,经过了关键技术攻关、在轨试验和组网星发射3个历程,实现了国际一流的基本导航定位授时服务,和具有北斗特色的多功能服务,形成了具有中国特色的全球卫星导航系统。

1 北斗三号卫星系统与服务功能设计

1.1 卫星星座组成

北斗三号卫星系统是由3类轨道卫星组成的混合星座(图1)。3颗卫星布署在地球同步轨道(Geosynchronous orbit, GEO),即地球赤道面,轨道高度为35 786 km,轨道周期约24 h,分别位于东经80°、110.5°、140°;3颗卫星布署在地球倾斜同步轨道(Inclined geosynchronous orbit, IGSO),分布在3个轨道面,且轨道面与赤道面夹角55°,轨道高度和周期同GEO轨道,轨道面间相距120°,每个轨道面布署一颗卫星,3颗卫星星下点轨迹为8字形,中心位置为东经118°;24颗卫星布署在中圆地球

轨道(Medium earth orbit, MEO),分布在3个轨道面,轨道面与赤道面夹角55°,轨道高度21 528 km,轨道面间相距120°,每个轨道面布署8颗卫星,卫星星下点轨迹为波浪形,为7天13圈回归轨道。“3GEO+3IGSO+24MEO”轨道卫星组成的混合星座,是中国在自主独立、兼容渐进、平稳过渡发展历程中形成的独特星座设计。

1.2 卫星系统坐标与时间

北斗卫星系统采用北斗坐标系(BeiDou coordinate system, BDCS)。北斗坐标系的定义符合国际地球自转服务组织规范,与2000中国大地坐标系(CGCS2000)定义一致(具有完全相同的参考椭球参数),其主要参数如表1所示。

表1 北斗坐标系主要参数

Table 1 Parameters in BDCS

参数	值
长半轴 A/m	6 378 137.0
地心引力常数 (包含大气层) $\mu/(m^3 \cdot s^{-2})$	$3.986\ 004\ 418 \times 10^{14}$
扁率 f	1/298.257 222 101
地球自转角速度 $\dot{\Omega}_e/(rad \cdot s^{-1})$	$7.292\ 115\ 0 \times 10^{-5}$

北斗系统的时间基准为北斗时(BeiDou time, BDT),BDT采用国际单位制(SI)秒为基本单位,连续累计,不闰秒,起始历元为2006年1月1日协调世界时(UTC)00时00分00秒。BDT通过UTC(NTSC)与国际UTC建立联系,BDT与国际UTC的偏差保持在50 ns以内(模1 s)^[2]。

1.3 通信链路

北斗三号卫星的通信链路主要包括上行注入、导航电文播发、测控、星间数据传输等通信链路。地面注入站通过上行L频段链路向卫星上注导航电文等相关业务信息,并进行星上测距,实现星地双向时间比对和时间同步;卫星在与地面站长期中断状态下,可在星上自主完成导航电文的生成并可自主运行60 d以上,且对用户定位精度没有显著影响。卫星通过下行导航频段链路向地面用户播发导航定位信号,星上具有导航信号完好性监测与告警能力。卫星的测控采用S频段扩频测控体制,通过卫星地面测控站对卫星进行遥测和遥控,完成卫星轨道和姿态机动、状态监视和维护管理等任务。卫星和卫星之间采用Ka频段星间链路实现相互通信和测距。测控、上行注入、星间数据信息通过卫星综合电子系统进行数据融合处理和路由交换,将所有卫星和地面站相互连接,实现单个或多个地面站对整个卫星系统的测控和业务管理。

1.4 卫星系统服务功能设计

北斗三号卫星系统通过3类轨道卫星不同功能和性能的设计,实现了对用户的6大服务功能。北斗系统提供的服务类型如表2所示^[1]。

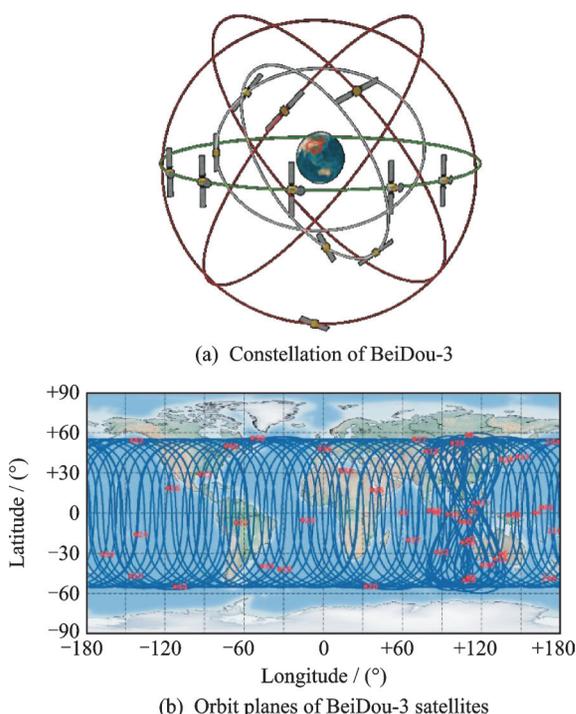


图1 北斗三号卫星导航系统星座组成

Fig.1 Constellation of BeiDou-3

表 2 北斗三号卫星服务类型
Table 2 Services of BeiDou-3

区域	服务类型	信号/频段	播发手段
全球范围	定位导航授时	B1I/B3I	3GEO+3IGSO+24MEO
		B1C、B2a、B2b	3IGSO+24MEO
	全球短报文通信	上行:L	上行:14MEO
		下行:GSMC-B2b	下行:3IGSO+24MEO
国际搜救	上行:UHF	上行:6MEO	
	下行:SAR-B2b	下行:3IGSO+24MEO	
中国及周边地区 (东经 75°~135°, 北纬 10°~55°)	星基增强	BDSBARS-B1C、 BDSBARS-B2a	3GEO
	精密单点定位	PPP-B2b	3GEO
	区域短报文	上行:L、下行:S	3GEO

1.4.1 基本导航定位授时服务

北斗系统的基本导航定位授时服务(Radio navigation satellite system, RNSS)在全球范围提供定位、测速和授时服务,空间信号精度优于

0.5 m;定位精度全球优于 10 m,测速精度优于 0.2 m/s,授时精度优于 20 ns,实测精度优于前述指标。RNSS 组成结构如图 2 所示。

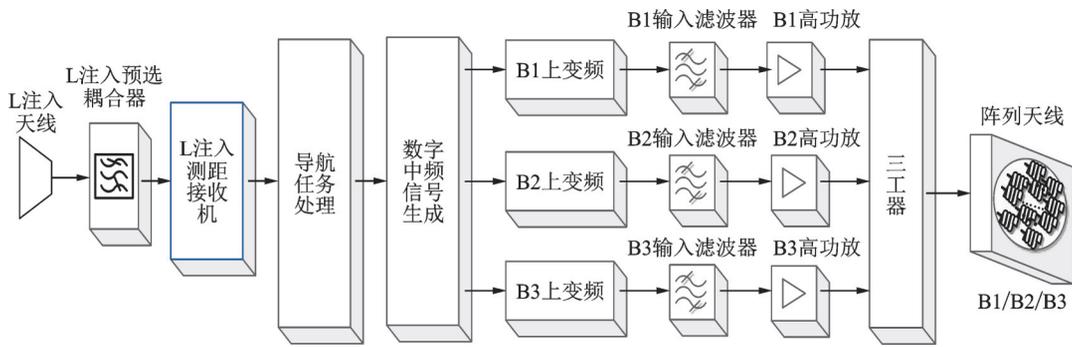


图 2 RNSS 设计组成结构图
Fig.2 Framework of RNSS

北斗三号信号播发频率、调制方式和数据速率如表 3 所示。民用信号为公开信号 B1C^[3]、B2a、B2b,在 24 颗 MEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星上播发,

提供全球信号 4 重以上覆盖。为了实现与北斗二号平稳过渡,同时在全局卫星上播发北斗二号 B1I 和 B3I 信号。

表 3 北斗三号卫星信号体制
Table 3 Signal system of BeiDou-3

频点	信号分量	中心频率/MHz	调制方式	符号速率/(symbol·s ⁻¹)	服务类型
B1	B1I	1 561.098	BPSK(2)	50	公开
	B1C_data	1 575.42	BOC(1,1)	100	公开
	B1C_pilot		QMBOC(6,1,4/33)	0	
	B1A_data		BOC(14,2)	50	授权
	B1A_pilot	0			
B2	B2a_data	1 176.45	QPSK(10)	200	公开
	B2a_pilot			0	
	B2b_I	1 207.14	BPSK(10)	1 000	公开
	B2b_Q		TBD	TBD	
B3	B3I	1 268.52	QPSK(10)	50	公开
	B3Q			500	
	B3A_data	QPSK(10)	100	授权	
	B3A_pilot		0		

RNSS就是通过接收地面运控管理中心上行注入的导航定位相关的参数,通过星上存储、处理生成导航电文,并按照规定的信号频率、调制方式、数据速率和电文编排格式生成导航信号。3个频段通过3个通道经过滤波和信号功率放大,通过一副地球匹配赋形天线向广大用户连续不断地播发。

卫星播发信号为右旋圆极化,波束采用“马鞍形”覆球波束的天线设计(图3),以保障用户接收机在任何地点、任何时间接收到的不同卫星发射的功率电平相近并且稳定,工作在合适的动态范围内。

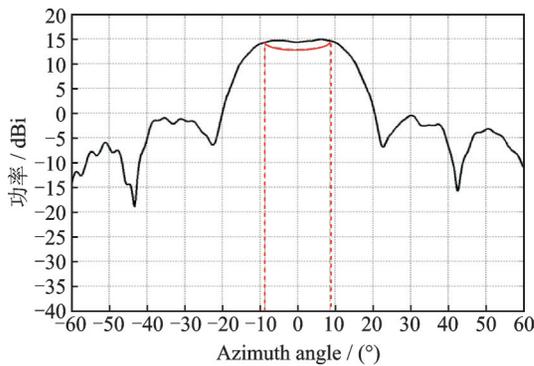


图3 天线波束设计示例

Fig.3 Example of antenna beam

1.4.2 全球短消息服务

北斗三号卫星具有全球短报文通信服务功能,为用户提供全球短消息传输服务,支持位置报告、短报文、非实时语音和图片传输等。卫星上行接收

用户频率为1 624 MHz,信息速率为400 bit/s,具备每小时30万次的短报文服务能力,用户单次可传输40个汉字,下行可通过北斗三号IGSO卫星和MEO卫星的B2b导航信号播发。报文通信载荷在14颗MEO卫星装载,按地面用户仰角15°计算,可实现全球范围两重以上覆盖,如图4所示。

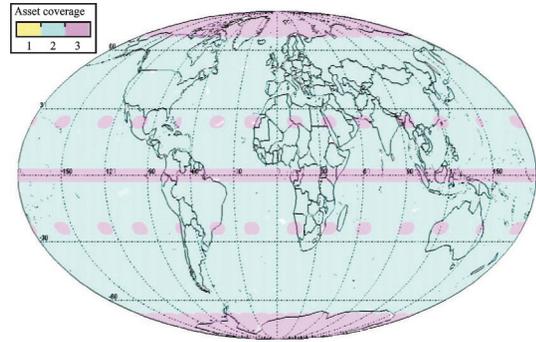


图4 全球短报文覆盖示意图

Fig.4 Global coverage of short message communication

卫星接收用户上行信号,完成短消息信号的接收、解扩解调和信息处理,并生成用户回执信息。按照与用户的接口要求生成用户回执信息。回执信息直接通过B2b电文下传用户,同时将用户上传信息以及用户回执信息通过卫星与地面中心站通信链路下传给中心站,或者利用星间链路回传至境内卫星并下传到地面中心站。地面中心站向用户播发的信息通过地面站上传到可视卫星,卫星将发送用户的上行信息通过星间链路传递到指定用户可见卫星,并通过B2b信号向用户播发(图5)。

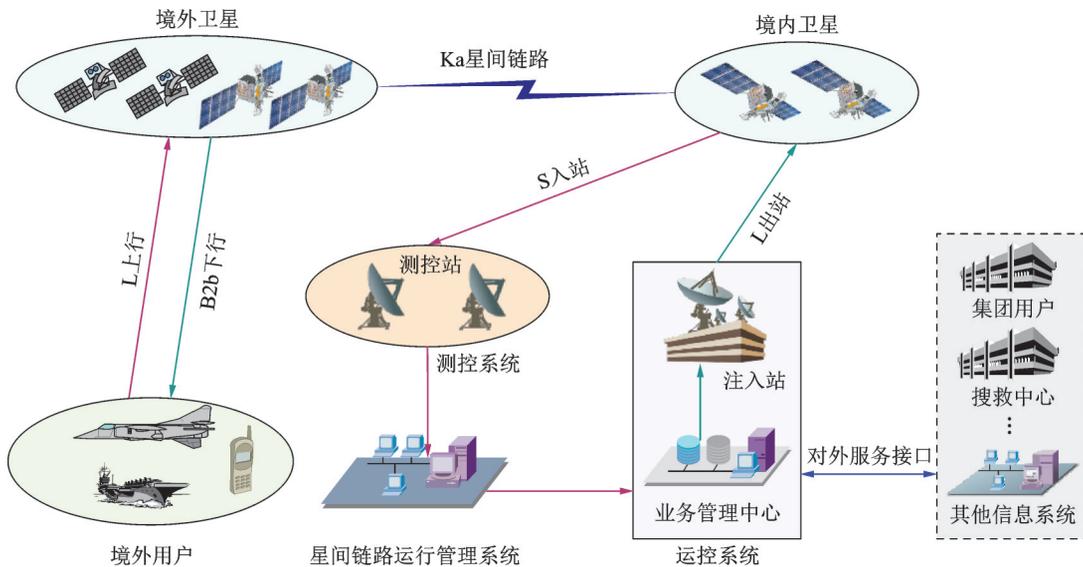


图5 全球短报文系统架构

Fig.5 Systematic construction of global short message communication

1.4.3 国际搜救服务

北斗三号在6颗MEO卫星上装载国际搜救载荷,实现全球一重覆盖,向全球提供国际搜救

服务^[4]。

卫星接收用户上行报警信号,完成信号的接收、滤波和上变频后,经放大器放大后通过天线向

地面中心发播,星上为转发模式,不进行信号的解扩解调和信息处理,星上组成如图 6 所示。

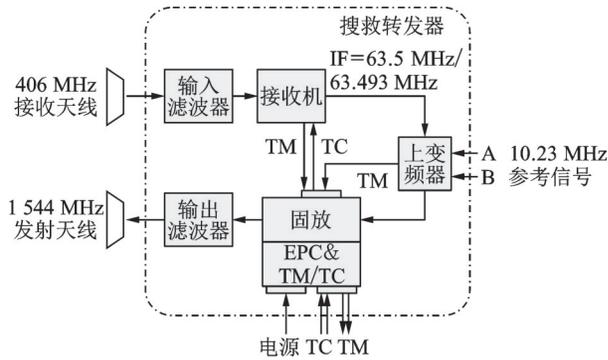


图 6 搜索救援载荷实现原理图

Fig.6 Principle of loading for search and rescuer service

用户上行报警信号按照 406 MHz 信标的种类分为第一代信标信号和第二代信标信号两种。第一代信标采用 BPSK 方式调制;第二代信标采用 DSSS-OQPSK 方式调制。卫星搜救载荷下行信号主要提供给 COSPAS-SARSAT 地面站使用。北斗 MEO 卫星搜救载荷的设计符合 COSPAS-SARSAT 的相关标准,并与其他卫星导航系统搜救系统兼容。反向链路消息信号,即用户接收卫星回传信息下行信号,由北斗三号 IGSO、MEO 卫星 B2b 信号播发。

1.4.4 区域报文通信服务

北斗三号区域报文通信服务,即卫星无线测定服务(Radio determination satellite service, RDSS),在 3 颗 GEO 轨道卫星上实现。3 颗卫星通过天线信号波束赋形设计,确保在中国及周边地区提供双重覆盖,满足中国及周边地区定位和报文通信的服务要求,其服务模式同北斗二号一样:用户需要定位服务时,利用用户终端通过 L 频段上行链路发送信号至卫星,进行滤波、放大、变频后通过 C 频段转发至地面中心;地面中心接收卫星信号,处理用户信息并解算用户位置后,通过 C 上行链路发送至卫星;卫星通过 S 频段向用户转发定位和通信信息。原理如图 7 所示。

北斗三号在北斗二号基础上进行了扩展改进,将单星固定覆盖波束由 2 个 L 上行+2 个 S 下行波束增加到 6 个 L 上行+6 个 S 下行。天线尺寸增大,天线增益提高约 3 dB,以提高服务容量并充分利用频率带宽,并增加一路可动点波束以扩大服务范围。天线 6 波束和单波束设计和覆盖如图 8 所示。用户容量提升到 1 000 万次/h 以上,单次报文可传输容量 14 kbit(1 000 汉字),用户机发射功率小于 3 W。用户上行采用频分+码分相结合,用户

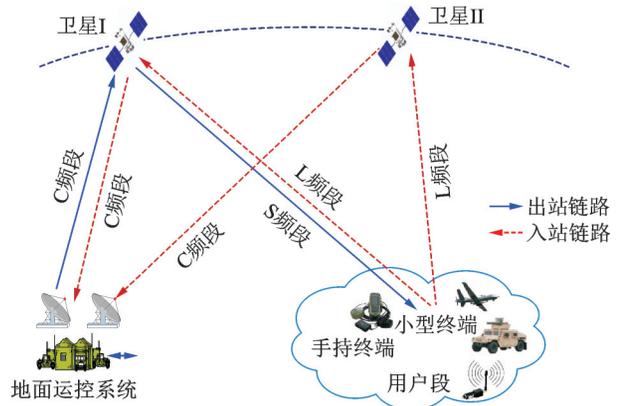
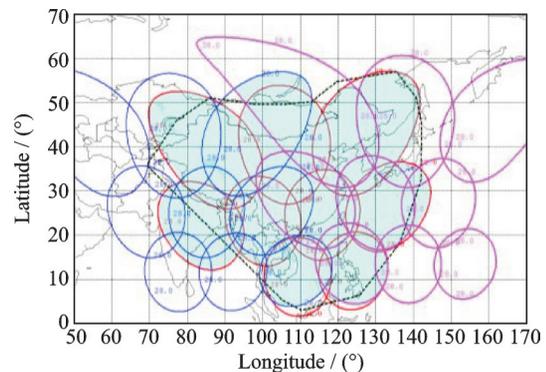


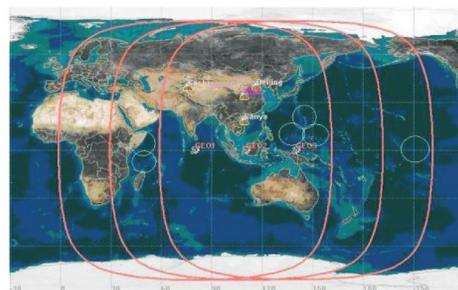
图 7 RDSS 系统架构图

Fig.7 Systemic construction of RDSS

可使用两个上行频率:Lf1,(1 614.26±4.08) MHz;Lf2,(1 618.34±4.08) MHz,采用 BPSK 调制方式。用户接收频率为(2 491.75±8.16) MHz,采用 QPSK 调制。



(a) Coverage of regional antenna beams



(b) Spot beams and movable area

图 8 区域报文通信波束覆盖示意图

Fig.8 Global coverage of antenna beams for RDSS

1.4.5 星基增强服务

北斗星基增强服务(BeiDou satellite-based augmentation system, BDSBAS)按照国际民航标准要求,通过地球静止轨道卫星向用户播发星历误差、卫星钟差、电离层延迟等多种修正信息,实现导航定位精度的提升和完好性报警信息的快速播发^[5]。

BDSBAS 由 3 颗北斗三号 GEO 卫星实现,分别定点于东经 80°、110.5°和 140°,对应的伪随机噪声(Pseudo-random noise, PRN)码分别为 144、143 和 130。

每颗卫星分别通过 BDSBAS-B1C 和 BDS-BAS-B2a 信号,向中国及周边地区用户提供符合国际民航组织标准的单频(Single frequency, SF)服务和双频多星座(Dual-frequency multi-constellation, DFMC)服务。BDSBAS 坐标基准为 WGS-84,时间基准与 GPS 时保持同步,同步精度小于 50 ns。

B1C 增强信号载波频率 1 575.42 MHz,调制方式为 BPSK(1),信息符号速率以 500 symbol/s 的速度通过模 2 和的方式叠加到 1 023 bit 的 PRN 码上,再通过二进制相移键控以 1.023×10^6 cycle/s 的速率调制到载波上。

1.4.6 精密单点定位服务

北斗精密单点定位(Precise point positioning, PPP)服务,通过 GEO 卫星向用户播发北斗三号和其他全球导航系统卫星的精密轨道和钟差改正等多种修正信息,实现导航定位精度的提升^[6]。

北斗 PPP 功能由 3 颗北斗三号 GEO 卫星构成。每颗卫星通过 B2b 信号向中国及周边地区用户提供 SF 服务,坐标基准和时间基准同北斗基本 RNSS 服务一致。

PPP-B2b 信号结构如表 4 所示。PPP-B2b 信号的载波频率为 1 207.14 MHz,信号包含 I 支路和 Q 支路两个分量,目前在轨 3 个 GEO 卫星仅播发 I 之路分量。调制方式 BPSK(10),符号速率 1 000 symbol/s。同基本导航服务的信号结构一样,但播发的电文数据内容不同。

表 4 B2b 信号结构

Table 4 Parameters of B2b signals

信号分量	中心频率/ MHz	调制方式	信息速率/ (bit·s ⁻¹)	符号速率/ (symbol·s ⁻¹)	服务类型
PPP-B2b_I	1 207.14	BPSK (10)	500	1 000	精密 定位

2 北斗三号卫星系统通用新技术设计

北斗三号卫星系统于 2009 年启动研制,在继承北斗二号设计和技术的基础上,在卫星载荷和卫星服务平台上采用了多项新技术,开展了一系列关键技术的攻关和试验验证。卫星载荷相关的主要新技术包括:卫星信号体制、星间链路、时频基准、信号生成与监测以及天线等技术。在卫星平台相关的新技术包括:综合电子技术、高效电源技术、卫星自主控制技术等。北斗三号还攻克了过去依赖进口的器部件技术,实现了自主可控。新技术在 3

类卫星上按照通用化、标准化的要求进行设计,软件、硬件模块和接口基本相同。

2.1 新型导航信号设计

北斗三号卫星的信号结构如表 3 所示。在信号设计上将公开服务信号和授权服务信号进行频谱分离设计,公开服务信号频段为 B1 和 B2 频点,授权服务信号为 B1 和 B3 频段。在 B1 频段上信号复杂,既有平稳过渡信号,又有公开和授权服务信号,通过采用 BOC 调制体制将公开和授权服务进行进一步的频谱分离。对于公开服务信号,为解决在兼容与互操作的约束下带宽与精度、发射功率与信号数量之间的矛盾,在 B1 频点提出了多载波恒包络复合导航信号理论,将 BOC(1,1)与 BOC(6,1)两个信号分量分别调制在载波的两个正交相位上,形成了一种新的多分量恒包络信号结构 QMBOC(图 9)。两个分量功率比可调,可以使用相同或者不同的 PRN 码,具有良好的测距精度和抗多径性能,支持信号的在轨参数配置。采用 BOC 和 QMBOC 的分裂谱设计,尽可能增大 Gabor 带宽,以改善测距精度;数据分量 BOC(1,1)与导频分量 BOC(6,1,4/33)正交,功率比为 1:3,力求改善低信噪比条件下的跟踪性能,提升抗遮挡能力,并具有较强的抗多径和抗干扰能力。B1C 信号的测距码采用分层码结构,由主码和子码异或构成(与 B2a 相同),具有互相关特性好、抗窄带干扰能力强和易于信道数据符号快速同步的特点。在其他频点通过频率中心点选择和带宽调制、信号结构、伪码设计、电文结构等设计,充分兼顾了兼容性、灵活性和可扩展性^[7-8]。

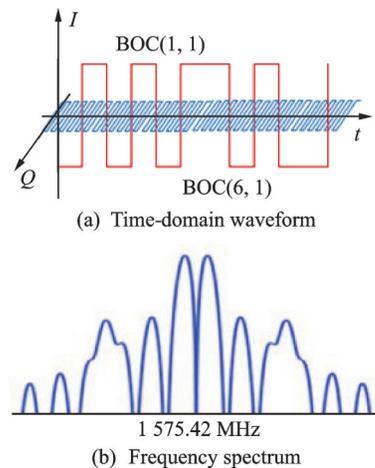


图 9 新型导航信号时域波形及频谱示意

Fig.9 Time-domain waveforms and frequency spectrums for new navigation signals

2.2 卫星系统星间链路设计

导航卫星需要通过全球布站对导航信号进行

连续监测以确定卫星轨道和时间参数,确定卫星信号发播状态,并及时上注卫星以维持定位和授时精度。为减少卫星对地面站的境外布站需求,北斗三号卫星在每颗星上装载了星间链路系统设备,完成卫星与卫星之间测距、信息传输和卫星状态监控,形成互联网络,实现整个卫星系统的实时监控。通过卫星与多星间的测距数据实现星地联合精密定轨,或通过卫星星上自主数据处理进行星间时间同步和自主生成导航星历参数并直接发播,实现自主导航^[9]。

星间链路采用Ka相控阵天线方案,接收和发射采用相同的中心频点。采用时分双工体制,相控阵链路具有波束指向捷变灵活的特点。如何确保指向正确和信号的快速捕获需要充分利用星间伪距与多普勒预报等信息。星间链路设备包括相控阵天线、收发信机和辅助部件组成(图10)。相控阵天线按照规定时隙完成波束指向并接收和发送星间信号,收发信机完成信号的收发处理和测距,并将信息传输到综合电子进行数据处理、自主导航计算与路由管理。

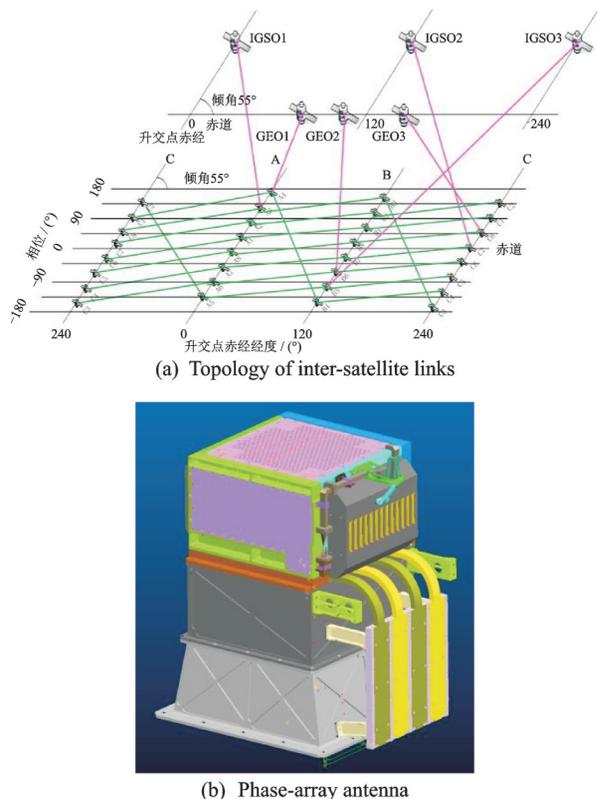


图 10 星间链路拓扑及相控阵天线示意
Fig.10 Topology of inter-satellite links and phase-array antenna

北斗三号卫星突破了面向静态、动态混合连接的星间拓扑与路由协议、星间天线高精度指向、高动态星间链路信号辅助捕获、高精度远距离星间测

量、星载Ka相控阵天线、高精度自主轨道预报和多轨道类型广播星历统一拟合等关键技术。实测结果表明,基于星间链路的卫星轨道和钟差预报精度显著提升,60 d自主导航空间信号精度优于3 m,支持自主导航长期稳定运行。

2.3 时频基准系统设计

卫星时频系统由原子钟、基准频率合成器及开关等组成,原子钟输出10 MHz频率信号,基准频率合成器接收2路原子钟信号,生成主备两路10.23 MHz频率,并对两路信号进行相位差测量。通过开关选择输出一路10.23 MHz频率信号作为卫星时频基准,并通过功分网络进行多路分发(图11)。

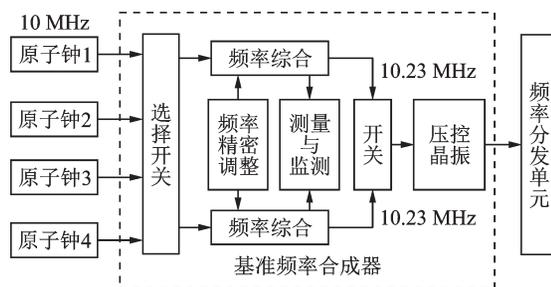


图 11 星载时频系统示意
Fig.11 Space-borne time-frequency system

原子钟的性能决定了时频基准的精度等性能指标,在设计上不仅要解决准确度、稳定性和漂移率,同时需温度、磁敏感系数小。目前北斗主用的原子钟为铷钟、氢钟。两类原子钟各有特点^[10]:铷钟稳定度好,频率漂移率大;氢钟稳定度好、漂移较小。目前星上原子钟频率稳定度、漂移率达到E-15量级。

基准频率合成器在研制上解决了高准确度、平稳切换和自主本地精确时间快速恢复、卫星钟自主相位跳变监测等技术难题,卫星钟频率调整精度优于30 nHz,相位调整精度优于0.1 ns,卫星钟平稳切换主备相位差优于2 ps、切换前后相位跳变优于0.1 ns,切换过程卫星钟信号不中断,本地时间恢复精度优于1 ns。

2.4 综合电子系统设计

北斗三号卫星采用了先进的综合电子技术,以中心管理单元为核心,以分布式网络体系结构为系统架构,构建了分布式协同和集中管理结合软件系统,完成在轨运行调度和综合信息处理^[11],其组成包括中心管理单元(CMU)、信息处理与路由单元(DPRU)、接口服务单元(ISU)(图12)。CMU集中实现卫星数据管理、自主热控、自主能源管理、姿轨

控、遥测遥控以及载荷数据管理;DPRU针对整星信息流及交互路由的综合设计,实现测控链路、星间链路和对地通信链路的综合化管理和信息融合,同时实现自主定轨与时间同步算法的运算处理;ISU为整星各类设备提供配电、遥测采集、指令输出、设备控制等接口服务。

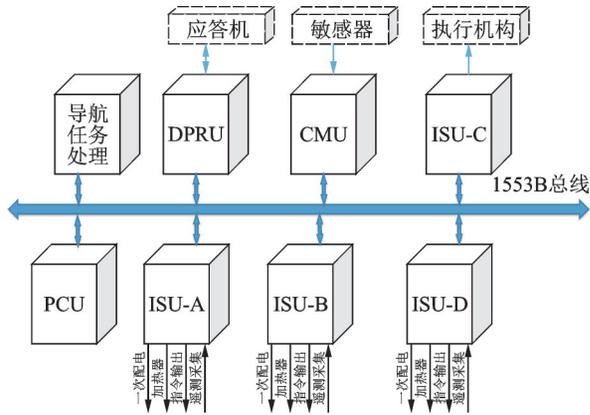


图12 卫星综合电子系统架构
Fig.12 Systematic structure of space-borne electronics

综合电子突破了多通道多源业务信息的融合传输服务技术、高低速混合网络数据路由和端到端数据加密技术、基于链路状态及时频信号特征的星间链路故障诊断和恢复、星地一体化的自主健康管理等关键技术,实现了星务管理、姿轨控、数据路

由、网络管理、链路控制、自主健康管理等多功能的综合处理和统筹调度,星载资源的综合利用技术使得卫星电子设备实现高集成、可扩展、轻小型化,相比传统电子设备重量减轻30%以上^[12]。

2.5 高效电源系统设计

卫星的电源分系统是卫星系统的核心,需为星上各单机产品提供连续稳定的供电。北斗三号卫星的电源分系统由太阳电池阵、蓄电池组及电源控制器(Power control unit, PCU)等产品组成(图13)。太阳电池阵为卫星的发电装置,采用轻型碳纤维蜂窝板和折叠展开结构形式,在结构板上粘贴高性能三结砷化镓太阳电池片,解决了力学、辐照、布片和连接工艺等技术,太阳能转化效率优于30%。蓄电池在光照时由太阳阵充电,在地影期为整星供电。采用锂离子蓄电池技术,通过并串连接提供所需电压和容量,解决了轻量化、高功率重量比的技术问题。PCU采用S3R技术实现对太阳电池阵的顺序开关分流调节,通过MEA电路对母线电压采样后形成统一的母线误差电压信号,对分流、充电和放电实现统一的三域控制,为用电设备提供稳定的母线输出电压。母线电压纹波优于0.3V,并解决了小型化、轻量化和高效率的技术难点^[13]。

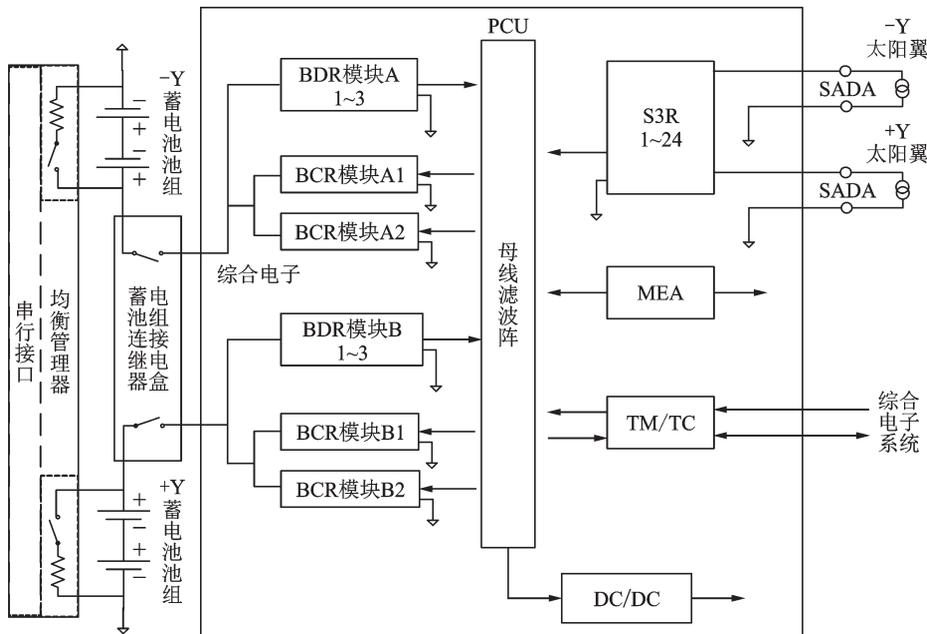


图13 卫星电源系统架构示意
Fig.13 Systematic structure of satellite power

2.6 核心器部件自主可控设计

北斗三号为解决部分宇航器件和产品依赖进口受制于人的局面,从设计源头上确定选用和研制国产器部件,建立导航卫星器部件国产化,从研制、

验证到应用一体化体系。在大功率切换开关、固态放大器、行波管放大器等方面解决了低气压放电、微放电、低功耗、高性能、长寿命等难题,满足了导航信号发播的高性能、高效率要求。在导航卫星设

计上大量采用了在轨处理和可编程重构加载的技术。过去大部分采用进口民用芯片加筛选的途径解决元器件使用。北斗三号通过技术攻关,对单机使用的核心芯片如CPU、DSP、FPGA以及相关的高性能大容量FLASH和SRAM存储器等元器件,从设计和工艺上采取措施,达到了宇航产品的规范要求,性能与国际相关宇航产品相当,实现了核心器件100%自主可控的目标。部分国产器件如图14所示。

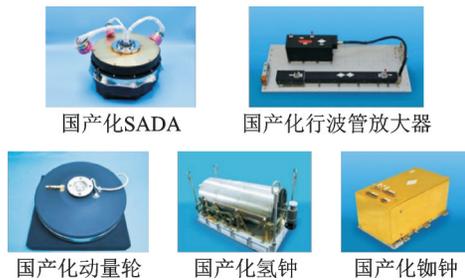


图14 星载国产化设备示例

Fig.14 Equipment produced and designed in China

3 北斗三号卫星总体设计

3.1 GEO卫星

北斗三号GEO卫星用于提供基本RNSS、RDSS、SBAS、PPP 4种用户服务,整个卫星按照功能划分为12个分系统。RNSS、SBAS与PPP服务由卫星的导航分系统和天线分系统完成。导航分系统由时频产生与分配、上注信号解调处理、导航信号生成、导航信号变频与放大等设备组成。其中星上时频配置2台氢原子钟和2台高精度铷原子钟;导航天线由一副L上行注入天线和24个螺旋单元形成的一副B1/B2/B3阵列天线组成。RDSS服务由转发分系统和天线分系统完成。转发分系统由7路L/C入站链路、7路C/S出站链路相关设备和1路C/C通信设备组成。L/C入站链路包括L/C接收机、C开关、C固放、C输出多工器等设备。C/S出站链路包括C输入多工器、C/S接收机、S开关、S行波管放大器等设备。转发天线包括一副固定波束和一副可动点波束天线,两个天线都为构架式天线。

卫星星间链路和自主导航功能由自主运行分系统完成,分系统包括星间相控阵天线、Ka收发信机和自主星历生成软件组成。

卫星平台采用东方红三号B(DFH-3B)卫星公用平台,包括综合电子、测控、电源、总体电路、控制、推进、热控和结构共8个分系统。平台采用最新综合电子和高效能源技术设计。综合电子分系

统由1台CMU、1台DPRU、4台ISU及配套软件组成;测控分系统由S频段测控应答机和测控天线组成,测控天线实现 4π 空间方位的全覆盖;总体电路由提供各种设备连接的供电、信号传输电缆组成;电源分系统由2个太阳翼、1台PCU和2组75 Ah锂离子蓄电池模块组成,母线电压100 V,太阳翼输出功率大于7 000 W;控制分系统包含了2个浮陀螺、星敏感器、太阳敏感器等姿态测量设备和动量轮、磁力矩器等姿态控制设备;推进分系统采用统一双组元推进系统,包括用于姿轨控的490NG发动机和10NG双组元推力器设备,以及用于推进剂和氦气储供的贮箱、高压氦气瓶、阀门和管道等设备;热控分系统由高效热管、加热器、OSR散热片和多层热控材料组成,通过综合电子进行自主热控;结构分系统为碳纤维中心承力筒和蜂窝壁板组成的长方体结构,具有承载大重量轻的特点。

整个卫星设计起飞质量5 400 kg,整星功率6 400 W,在轨工作寿命大于12年。GEO卫星由CZ-3B运载火箭从西昌卫星发射中心发射并送入地球同步转移轨道(Geostationary transfer orbit, GTO)轨道,卫星自主变轨进入GEO定点位置。卫星在轨飞行状态如图15所示。

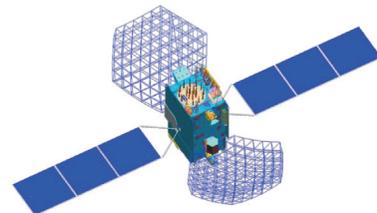


图15 GEO卫星在轨展开图

Fig.15 GEO satellite unfolding on-orbit

3.2 IGSO卫星

北斗三号IGSO卫星用于提供基本RNSS、全球短报文和国际搜救服务的返向信息发播服务。整个卫星按照功能划分为11个分系统。RNSS服务以及在B2b播发的全球短报文和国际搜救返向信息由卫星的导航分系统和天线分系统完成。导航分系统设备组成与GEO卫星的导航分系统一样;导航天线为24螺旋单元形成的B1/B2/B3阵列天线,同GEO导航天线。卫星星间链路和自主导航功能由自主运行分系统完成,分系统包括星间相控阵天线、Ka收发信机和自主星历生成软件组成,同时搭载了高速数据传输和处理等新技术试验载荷。

卫星平台采用东方红三号B(DFH-3B)卫星公用平台,其组成和状态同GEO卫星。整个卫星设

计起飞质量 5 400 kg, 整星功率 6 400 W, 在轨工作寿命大于 12 年。IGSO 卫星由 CZ-3B 运载火箭从西昌卫星发射中心发射并送入 GTO 轨道, 卫星自主变轨进入倾角为 55° 的 IGSO。卫星在轨飞行状态如图 16 所示。



图 16 IGSO 卫星在轨展开状态图

Fig.16 IGSO satellite unfolding on-orbit

3.3 MEO 卫星

北斗三号 MEO 卫星用于提供基本 RNSS、全球短报文和国际搜救 3 种服务, 整个卫星按照功能划分为 11 个分系统。RNSS 服务和全球短报文与国际搜救 B2b 反向信息服务由卫星的导航分系统和天线分系统完成, 导航分系统由时频产生与分配、上注信号解调处理、导航信号生成、导航信号变频与放大等设备组成。其中星上时频配置为 2 种状态: 一为 4 台铷钟; 二为 3 台高精度铷原子钟和 1 台氢原子钟。导航天线由一副 L 上行注入天线和 12 个螺旋单元形成的一副 B1/B2/B3 阵列天线组成。全球短报文服务通过 L 频段上行接收天线、接收机等设备完成。国际搜救服务通过 UHF 接收天线、接收机、变频器、固放和 L 下行天线等设备完成。

卫星星间链路和自主导航功能由自主运行分系统完成, 分系统包括星间相控阵天线、Ka 收发信机和自主星历生成软件组成。

MEO 卫星平台采用新型的导航卫星专用平台, 包括综合电子、测控、电源、总体电路、控制、推进、热控和结构共 8 个分系统。平台采用最新综合电子和高效能源技术设计。其中综合电子、测控、总体电路、控制和热控分系统组成和配置基本与 GEO/IGSO 卫星平台配置相同。电源分系统的在太阳翼、PCU 和锂离子蓄电池模块的尺寸和模块数量相比 GEO 卫星有所减少, 母线电压 42 V, 太阳翼输出功率大于 3 600 W。推进分系统采用单元阱推进系统, 配置姿轨控用的多台 5 N 推力器以及推进剂储供相关的贮箱、阀门和管道等设备。结构分系统为桁架式主承力框架和蜂窝壁板组成的长方体结构, 卫星功能密度比、功率质量比高, 可扩展性好^[14]。

整个卫星设计起飞质量 1 060 kg, 整星功率 3 100 W, 在轨工作寿命大于 10 年。MEO 卫星采用 CZ-3B+上面级一箭双星在西昌卫星发射中心发射。上面级直接将卫星送入运行初始轨道, 卫星自主轨道相位捕获进入 MEO 轨道指定位置。卫星在轨飞行状态如图 17 所示。

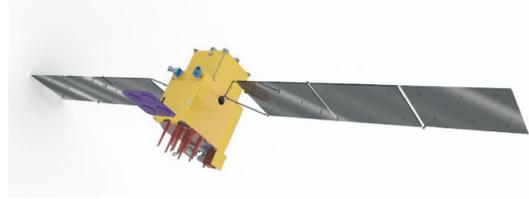


图 17 MEO 卫星在轨展开图

Fig.17 MEO satellite unfolding on-orbit

4 结 论

北斗三号卫星系统是中国第一个真正意义的全球组网卫星系统。北斗三号通过星间建链、星地联合定轨等方案, 系统解决了中国无法全球布站的难题, 为北斗三号提供高精度的全球导航服务铺平了道路。北斗三号卫星设计瞄准国际全球导航系统一流水平, 在全面提升基本导航能力的同时, 拓展了短报文、国际搜救、星基增强等服务类型和能力, 形成了北斗导航卫星的中国特色。北斗三号卫星全面实现星上器部件自主可控, 带动了相应技术和产业链的发展。

参考文献:

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告[R]. 4 版. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019.
- [2] 谢军. 卫星导航系统与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
- [3] 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[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017.
- [4] 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: 国际搜救服务-1.0 版[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2020.
- [5] 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: 星基增强服务信号 BDSBAS-B1C-1.0 版[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2020.
- [6] 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: 精密单点定位服务信号 PPP-B2b-1.0 版[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2020.
- [7] 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[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(5): 584-594.
- YANG Yuanxi, XU Yangyin, LI Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system [J]. Scientia Sinica (Terra), 2018, 48(5): 584-594.
- [8] 陆明泉,姚铮,张嘉怡,等. 北斗卫星导航系统信号设计的进展及发展趋势[J]. 卫星应用, 2015(12): 27-31.
- [9] 陈忠贵,帅平,曲广吉. 现代卫星导航系统技术特点与发展趋势分析[J]. 中国科学(E辑:技术科学), 2009, 39(4): 686-695.
- [10] 帅涛,林宝军,张军,等. 北斗导航卫星氢原子钟性能分析评估[J], 中国科学(物理学,力学,天文学), 2020, 51(1): 019513.
- SHUAI Tao, LIN Baojun, ZHANG Jun, et al. Performances and telemetres analysis of BD satellite passive hydrogen maser[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2020, 51(1): 019513.
- [11] 赵和平. 以综合电子技术构筑航天器智能化的坦途[J]. 航天器工程, 2015, 24(6): 1-6.
- ZHAO Heping. To build a highway to spacecraft intelligentization with avionics technology[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(6): 1-6.
- [12] 常克武,贾卫松. 北斗导航试验卫星综合电子软件研制管理经验与启示[J]. 航天器工程, 2016, 25(4): 108-112.
- CHANG Kewu, JIA Weisong. Practice and inspiration in development of integrated electronic subsystem software for test satellite of BeiDou navigation satellite system[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(4): 108-112.
- [13] 李建平,武明,鲁伟. 高轨大功率电源控制器的工程研制与在轨应用[J]. 电源技术, 2019, 43(5): 864-868.
- LI Jianping, WU Ming, LU Wei. Engineering development of GEO high-power PCU and its in-orbit application[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(5): 864-868.
- [14] 肖伟,陈忠贵,钱志英. 一箭多星直接入轨的卫星构型研究[J]. 航天器工程, 2012, 21(1): 43-47.
- XIAO Wei, CHEN Zhonggui, QIAN Zhiying. Study on satellite configuration for one vehicle with multi-satellites[J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(1): 43-47.

(编辑:张蓓)