

# 北斗卫星系统在空间飞行器天基测控中的应用研究

刘莉, 赵佳媚, 王超杰

(空间物理重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** 鉴于北斗卫星系统在空间信息传输中的重要作用, 结合我国空间飞行器发展现状及应用需求, 对基于北斗卫星系统的空间飞行器天基测控技术进行研究; 介绍了北斗卫星系统组成及应用前景, 论述了天基测控技术在提高空间飞行器测控能力方面的巨大优势及国内外天基卫星资源的建设及发展现状, 给出了基于北斗卫星的空间飞行器天基测控系统组成模型, 并结合北斗卫星系统特点及空间飞行器特殊应用需求初步梳理了北斗卫星应用于空间飞行器天基测控需解决的“扩展服务接入”、“高速数据传输”、“信息安全传输”三项关键技术, 最后通过北斗卫星通信链路试验表明性能指标满足空间飞行器天基测控需求。

**关键词:** 北斗卫星系统; 空间飞行器; 天基测控

## Application Research on BDS in Spacecraft Space-based TT&C

Liu Li, Zhao Jiamei, Wang Chaojie

(Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In view of the important role of BDS in space information transmission, Combined with the development status and application requirements of spacecraft in China, the spacecraft space-based TT&C based on BDS is studied. This paper introduces the composition and application prospect of BDS, discusses the great advantages of space-based TT&C in improving the measurement and control capability of spacecraft, the construction and development status of space-based satellite resources in China and abroad are introduced. This paper presents the composition model of spacecraft space-based TT&C based on BD, and presents the three key technologies of “extend service access”, “high-speed data transmission” and “information security transmission” to be solved according to the characteristics of BDS and special application requirements of spacecraft. Finally, the spacecraft space-based TT&C test is introduced.

**Keywords:** BDS; spacecraft; space-based TT&C

## 0 引言

北斗卫星系统是我国自行研制、独立运行的全球卫星导航定位与通信系统, 空间部分采用地球静止轨道、倾斜地球同步轨道以及中轨卫星的混合星座设计模式<sup>[1]</sup>。目前, 我国北斗卫星系统的区域组网工作已顺利完成, 初步建成覆盖国内及亚太地区的区域性卫星系统。2020年北斗卫星系统将实现全球组网, 从而为空间飞行器天基测控和通信提供了更多选择和可能。

## 1 北斗卫星系统简介

北斗计划是1983年由中国科学院院士陈芳允首次提出的, 其初衷是为中国海上船只提供导航服务。2003年12月完成了由三颗卫星组成的北斗一代试验卫星系统部署。2004年启动北斗二代区域卫星系统建设, 自2007年成功将第一颗中轨卫星M-1送上预定轨道, 至2012年12月已有5颗地球静止轨道卫星(GEO)、5颗倾斜轨道卫星(IGSO)及4颗中轨卫星(MEO)相继进入预定卫星轨道, 实现了5GEO+5IGSO+4MEO的区域卫星系统的建设目标<sup>[2]</sup>。

至2020年, 建成含33颗卫星的北斗全球卫星系统(下文简称北斗卫星系统), 实现全球覆盖。全球化的北斗卫星系统

星座是由27颗MEO(含三颗备份)、3颗GEO和3颗IGSO构成。其卫星星座布局如图1所示。

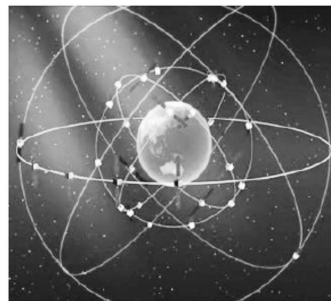


图1 北斗卫星系统星座构成

MEO卫星为标准Walker24/3/1星座, 分布在间隔120°的3条轨道上, 每条轨道上均匀地分布着9颗卫星, 其轨道倾角为55°, 轨道高度21528 km; 5颗GEO卫星分别定点于东经80°、110.5°、140°, 轨道高度35786 km; 3颗IGSO卫星分布在间隔120°的3条轨道上, 相位差为120°, 轨道倾角为55°, 其星下点轨迹重合, 交叉点的经为180°, 轨道高度35786 km<sup>[3]</sup>。

北斗卫星系统的地面控制部分主要包括监测站、主控站和注入站。监测站实时监测卫星的运行状态, 获得卫星的观测数据并保存。主控站则从监测站处收集所有的卫星观测数据汇总, 解算卫星的运行轨迹, 进而统计出每个卫星的星历信

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-01。

作者简介: 刘莉(1973-), 女, 吉林松原人, 硕士, 高级工程师, 主要从事飞行器天基测控技术方向的研究。

息<sup>[4]</sup>。注入站主要任务是在主控站的统一调度下，完成卫星导航电文、差分完好性信息注入和有效荷载的控制管理<sup>[5]</sup>。

北斗卫星系统设计性能优于俄罗斯的 GLONASS 系统，在定位精度、授时精度、抗干扰能力等方面都与美国的第三代 GPS 系统性能相当。目前，北斗卫星系统基本服务性能可达到：位置精度平面 10 m、高程 10 m；测速精度每秒 0.2 m；授时精度单向 50 ns；还可提供双向高精度授时和短报文通信服务。

在充分发展并利用北斗卫星系统定位功能的基础上，诸如监视、指挥、通信等能力也在开发过程中。就未来应用而言，北斗卫星系统可让空间飞行器的通信功能更透明，信息传输更通畅。可以说北斗卫星系统的建设就像为各种飞行器装上了“千里眼”与“顺风耳”，使其“看得更清、够得更远”。

### 2 空间飞行器天基测控技术应用需求

天基测控技术以各类卫星作为信号中继、交换站，将信源信息传递至信宿，实现各节点间的互联互通和信息交换，开展不间断、实时、安全的信息传输与分发，是现代军事信息网络的重要组成部分<sup>[6]</sup>。相对于陆/海基测控，天基测控的优势集中体现在测控覆盖范围、数据传输实时性和可靠性的大幅度提高<sup>[7]</sup>。在测控覆盖范围方面，陆/海基测控受限于海外测控站和远洋测量船的数量，测控存在盲区，而天基测控依托卫星完成测控信息的中继和转发，能够有效延长空间飞行器的测控弧段，提高测控覆盖范围。在数据传输实时性方面，天基测控能够及时将其他中低轨卫星获取的数据回传到国内，相对于传统的过境回传方式，显著提高了数传时效性。在数据传输可靠性方面，天基测控系统和陆/海基测控系统相互补充、相互备份，可显著降低空间飞行器测控风险。

鉴于天基测控技术在提高空间飞行器测控能力方面的巨大优势，自美国在 20 世纪 80 年代建立了全球第一个数据中继卫星系统——“跟踪与数据中继卫星系统”（Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS）以来，俄罗斯、欧洲、日本以及我国纷纷投资建设了自己的数据中继卫星系统，为各类军/民用用户提供中继数据及跟踪服务，以较低的成本和较少的地面站解决了高覆盖率问题。目前，美国正在抓紧研究第四代跟踪与数据中继卫星方案，并计划于 2025 年完成部署。第四代系统主要面向 2020~2040 年航天任务需求，拟采用光通信、微波通信、毫米波星间链路、相控阵天线、容断组网、认知和自适应协议等新技术<sup>[8]</sup>。欧空局（European Space Agency, ESA）自 2008 年开始兴建“欧洲数据中继卫星”（European Data Relay Satellite, EDRS）系统，该系统由两颗同步轨道节点及其地面系统组成<sup>[9]</sup>，能够实现对欧洲地区的覆盖。俄罗斯研制了第二代 Luch 卫星系统，并于 2011~2014 年间相继发射了“Luch-5A”、“Luch-5B”和“Luch-5V”3 颗同步轨道卫星，分别定位于东经、西经和东经上空，组成星座实现全球覆盖。日本在发射数据中继试验卫星 DRTS 的基础上，提出下一代数据中继卫星系统方案，该方案大幅提高了 Ka 频段返向链路数据率<sup>[10]</sup>，同时采用了光通信技术，使前/返向数据率达 2.5/1.2 Gb/s<sup>[11]</sup>。

近年来，我国在天基测控领域也取得了显著成果。2008 年我国开始组建基于天链一号中继卫星的天基测控系统，通过三星组网的方式实现全球覆盖。基于天链中继卫星系统的用户

数据中继传输已在运载火箭、载人航天中有所应用；2012 年 7 月，我国首次利用中继卫星系统对运载火箭实施天基中继测控，试验取得圆满成功<sup>[12]</sup>。

北斗一代卫星系统的应用及北斗二代卫星系统的建设，进一步加强了天基中继传输能力。我国“遥感卫星九号”搭载北斗一号用户机，通过北斗一号短消息传输功能支撑天基遥测遥控，在轨验证了天基测控的多项关键技术<sup>[13]</sup>。随着北斗卫星系统全球组网的实现，基于北斗卫星系统的天基测控技术必将成为大力推广应用的重点<sup>[14]</sup>。

### 3 基于北斗卫星的空间飞行器天基测控系统

对于长航时空间飞行器，天基测控是实现其全程测量、控制的最佳手段。空间飞行器天基测控包括飞行状态监测和飞行任务控制两个方面。

飞行状态监测包括对飞行器飞行轨迹、时序状态及设备工作状态等进行监测。为有效获取空间飞行器飞行状态，需基于空间飞行器控制系统方案，利用总线技术、一体化设计技术等，完成飞行状态信息汇集，并通过空间飞行器上北斗卫星通信终端及相控阵天线实现基于北斗卫星的飞行状态监测。飞行任务控制是空间飞行器天基测控的核心。飞行任务控制包括安全控制、故障控制、轨迹调整等。基于北斗卫星的空间飞行器天基测控系统组成如图 2 所示。

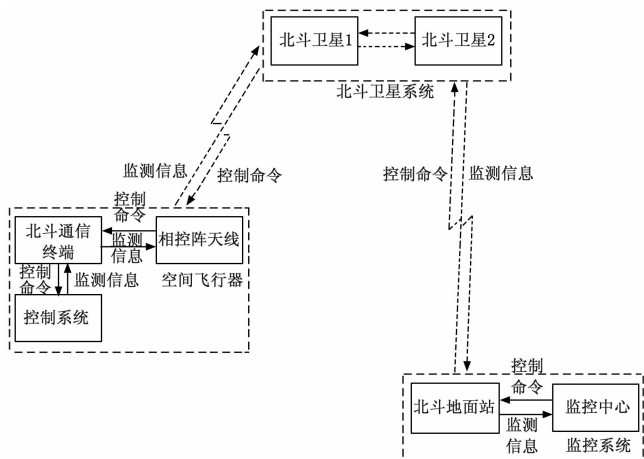


图 2 基于北斗卫星的空间飞行器天基测控系统

#### 3.1 监控系统

监控系统是实施空间飞行器天基测控的枢纽。其通过北斗卫星地面站接收空间飞行器返向监测信息，进行显示、分析、判断，以掌握空间飞行器飞行状态；根据飞行器状态及监控中心最新规划结果通过北斗地面站向北斗卫星发送飞行控制命令。

#### 3.2 北斗卫星系统

北斗卫星作为天基中继平台，对空间飞行器返向信息进行转发。当一颗北斗卫星难以覆盖空间飞行器飞行全程时，通过北斗卫星星间链路实现多级中继后，实现空间飞行器与地面监控系统间的通信。

#### 3.3 空间飞行器系统

空间飞行器上需配备北斗卫星通信终端及相控阵天线，并可以根据飞行器位置、姿态和星历信息，实时计算天线指向角；收集空间飞行器位置、速度、姿态、工作参数等状态信

息,按一定格式及频率发送给北斗卫星并传递到地面监控系统;接收北斗卫星发送的安全控制、故障控制、轨迹调整等控制指令后,实施相应操作。

#### 4 基于北斗卫星的空间飞行器天基测控关键技术

北斗卫星系统作为我国具有自主知识产权的全球导航定位系统,具有非常重要的应用价值。针对一些飞行时间长、应用目的特殊的空间飞行器,为实现飞行过程全程可监控,更是将与北斗卫星系统通信作为飞行必须具备的一项重要功能。目前,由于北斗卫星系统正处于建设阶段,如何将空间飞行器所需的扩展服务添加到北斗卫星系统总体框架中、如何确保基于北斗卫星系统通信的实时性及安全性等都是值得深入研究和探讨的问题。

北斗卫星系统应用于空间飞行器天基测控涉及到如下关键技术:

##### 4.1 扩展服务接入方案

北斗卫星系统扩展服务接入可采用节点模式和中断模式。节点模式适用于中高轨飞行器,此类服务将用户航天器视为北斗卫星系统的一个新增工作节点,纳入卫星系统进行统一规划。中断模式适用于需要持续服务的用户,根据用户位置选取位置最佳的若干卫星指向用户以提供持续服务。针对空间飞行器,需结合具体应用目的进行具体分析,确定以一种最为合理的模式实现扩展服务有效接入。同时,在选择接入模式时,要考虑应用灵活性及效率,减少中间环节,确定合适的用户权限。

##### 4.2 高速数据传递技术

为更好实施空间飞行器天基测控,需要利用尽可能多的实时飞行状态数据以支撑飞行任务控制。现阶段北斗卫星系统的数据速率制约着实际运用中快速判断及决策,有必要针对更高码率的北斗通信技术开展进一步研究。针对该技术,国外已提出利用光通信使前/返向数据率达 2.5/1.2 Gb/s,我国北斗卫星系统也有必要针对激光链路等高速数据传输技术开展攻关和研究。

##### 4.3 信息安全传输技术

利用北斗卫星系统实现空间飞行器前返向信息传输,有效扩展了空间飞行器的通信手段及能力。但是远程无线信息传输存在重要控制信息被干扰的可能性,其结果将导致空间飞行器无法按照预想进行调整及开展其它工作。针对该情况,需要从链路、体制、编码等多方面考虑,全面提升无线通信链路抗干扰能力。并在北斗卫星系统建设过程中,逐步落实到星上及地面设备中,从系统顶层解决无线信息安全传输问题。

#### 5 空间飞行器天基测控试验

开展空间飞行器天基测控系统设计需重点解决无线链路通信问题。天基测控无线通信链路设计涉及到测控频段选择、用户终端技术参数确定、信道和基带设计等多个方面。为验证天基测控无线通信链路设计的可行性,除根据用户终端技术参数及天基资源技术参数进行仿真分析外,还必须进行用户终端和卫星之间的通信验证试验,以最终确定空间飞行器天基测控系统及无线通信链路设计的有效性和正确性。

为充分验证天基测控无线通信链路设计的可行性及空间飞行器上天基测控终端、相控阵天线的性能,需开展用户终端和卫星之间的通信验证试验。按照对接标地的不同,基于北斗卫

星系统的空间飞行器天基测控通信链路验证试验可划分为试验室对接和天基卫星对接试验两个阶段。

空间飞行器天基测控通信链路验证具体开展的试验包括:试验室有线对接试验、试验室无线对接试验、转台状态北斗卫星无线对接试验、挂飞状态北斗卫星无线对接试验。

##### 5.1 试验室有线对接试验

试验室有线对接试验的主要目的是验证空间飞行器上天基测控终端射频辐射/接收特性,验证前返向信道状态及数据格式。

##### 5.2 试验室无线对接试验

试验室无线对接试验的主要目的是验证空间飞行器上相控阵天线指向算法及工作状态,测试前返向传输误码率。

##### 5.3 转台状态北斗卫星无线对接试验

转台状态北斗卫星无线对接试验的主要目的是验证空间飞行器上天基测控设备在动态情况下的跟踪能力和信号处理能力,验证前返向天地通信接口及数据格式,验证天地大闭环状态下空间飞行器测控信息经天基无线通信链路传输的有效性,获取传输时延、误码率等性能参数。

##### 5.4 挂飞状态北斗卫星无线对接试验

挂飞状态天基卫星无线对接试验的主要目的是进一步验证空间飞行器上天基测控设备在较高动态情况下对天基卫星的捕获跟踪能力,进一步考核空间飞行器上天基测控设备前、返向传输性能,验证不同北斗卫星切换情况下的跟踪处理能力,获取切换时间等性能参数。

#### 6 结束语

伴随北斗卫星系统的建设和发展,我国部分新型航天器已将与北斗卫星系统通信作为飞行必须具备的一项重要功能。空间飞行器作为北斗卫星系统的扩展服务用户,如何构建其基于北斗卫星的天基测控系统,如何实现与北斗卫星系统有效接入,如何实现大量监测信息有效传输、如何确保重要传输信息安全,如何验证空间飞行器天基测控相关理论、关键技术及系统方案的正确性及有效性,都是需要深入研究和研究的问题。

##### 参考文献:

- [1] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述 [J]. 导航定位学报, 2013, 1 (1): 3-8.
- [2] 陈 雪. 基于北斗系统的飞行器安控系统设计与故障阵地图研究 [D]. 东北大学, 2014.
- [3] 石 磊. 北斗卫星应用产品认证测试 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [4] 梁银龙. 北斗卫星系统中伪码捕获技术研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2016.
- [5] 熊 林. 基于北斗卫星通讯的船舶油耗管理系统设计 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- [6] 王世强,侯妍. 天基信息传输系统需求分析 [J]. 兵工自动化, 2009, 28 (12): 51-53.
- [7] 李艳华,卢满宏. 天基测控系统应用发展趋势探讨 [J]. 飞行器测控学报, 2012, 31 (4): 1-5.
- [8] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势 [J]. 电讯技术, 2016, 56 (1): 109-116.