

北斗三号短报文低轨卫星测控应用研究

刘保国, 张国亭, 郭永强
(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要: 针对低轨卫星星座测控管理的全球覆盖需求和测控链路资源需求, 分析北斗三号全球导航系统短报文用于低轨卫星测控的基本能力, 描述应用北斗三号全球短报文进行卫星测控的系统组成、工作流程及各部分功能, 识别用于卫星测控管理的相关关键技术, 并提出关键技术的初步解决途径, 给出测控应用模式建议。

关键词: 北斗三号; 全球短报文; 卫星测控

中图分类号: V556 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)01-0001-06

Research on BDS-3 short message communication used in LEO satellites TT&C system

LIU Baoguo, ZHANG Guoting, GUO Yongqiang

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Considering the requirements of global coverage and link resource occupation in Telemetry, Track and Command (TT&C) system for Low Earth Orbit (LEO) satellite, this paper analyzes the basic capability of Global Short Message Communication (GSMC) in the BeiDou Navigation Satellite System (BDS-3) used in LEO satellites TT&C system. Besides, the system composition, work process and functions of using GSMC in BDS-3 are described, and relevant key technologies for TT&C system management are classified as well. This paper also includes some preliminary solutions to these key technologies and also provides suggestions for the application modes in TT&C system.

Key words: BDS-3; Global short message communication; Satellite TT&C system

引 言

卫星测控主要完成对航天器的状态监视和运行控制任务, 高覆盖率、高可靠性是其主要特点。随着我国航天事业的发展, 在轨卫星数量大幅增加, 卫星应用深度和效能显著提升, 与此密切相关的航天测控工作, 呈现出管理卫星数量多、测控时效性强、测控频度大等特点。载人航天器的常态化管理、卫星应用快速响应、在轨故障应急处置等需求, 均要求卫星测控系统有较高的测控覆盖率能力, 以提高测控的时效性。目前, 对大多数低轨航天器而言, 提高测控覆盖率的主要途径有增加地面测控站数量、进行全球分布布站、利用高轨中继卫星多波束系统等。

2020 年 7 月 31 日, 我国自主研发的北斗三号全球卫星导航系统正式开通使用, 系统在对开放用户提供定位、测速和授时服务的同时, 可向授权用户提供通信报务, 通过系统配置的全球短报文功能, 可实现对轨道在 1000km 以下航天器的覆盖^[1]。若将该短报文能力应用于低轨卫星测控中, 可实现对低轨卫星全轨道、准实时的关键状态监视、轨道控制、健康管理、载荷控制、应用效能快速评估等应用, 将显著增强低轨卫星在轨应用效能; 若将其应用于卫星发射早期轨道段、载人飞船再入返回段等测控任务, 可增加测控链路的冗余备份, 提高该时段的测控可靠性。但短报文应用于卫星等航天器上, 与在地面低速、小范围运动目标应用有较大不同, 具有目标位置变化快、多普勒频率变化大以及与现有测控系统间信息传输协议差异大等需要关注的突出特点。本文对短报文应用于低轨卫星测控的相关需求、系统构成及关键技术进行了初步分析。

1 北斗三号短报文系统

短报文功能是北斗卫星导航系统的重要特色之一。北斗一号系统 2000 年投入使用, 采用有源定位体制, 为中国用户提供定位、授时、广域差分和短报文通信服务。北斗二号系统 2012 年投入使用, 在兼容北斗一号系统技术体制基础上, 增加无源定位体制, 为亚太地区用户提供定位、测速、授时和短报文通信服务。对低轨航天器测控而言, 北斗一号、北斗二号短报文服务区域与我国境内测控站资源高度重合, 对测控能力提升有限, 使用需求不强。

北斗三号卫星导航系统在北斗二号的基础上, 进一步提升性能、扩展功能, 完成 30 颗卫星组网发射, 为全球用户提供导航定位和通信数传一体的高品质服务。在北斗三号系统提供的三种全球范围服务类型中, 全球短报文通信 (GSMC) 服务利用 MEO 卫星向位于地表及其以上 1000km 空间的特许用户提供全球短报文通信服务, 主要性能如下^[1]:

①服务成功率达到 95%; ②响应时延一般优于 1 分钟; ③终端发射功率 $\leq 10\text{W}$; ④服务容量为上行 30 万次/小时, 下行 20 万次/小时; ⑤单次报文最大长度为 560bit; ⑥使用约束: 用户需进行自适应多普勒补偿, 且补偿后上行信号到达卫星频偏需小于 1kHz; ⑦信号频段为上行 L 频段, 下行 GSMC-B2b; ⑧播发手段为上行 14MEO, 下行 3IGSO+24MEO。

2 测控能力分析

使用北斗短报文开展低轨卫星测控, 主要包括测控覆盖、遥测数据传输、遥控数据传输等要素, 能力分析如下:

① 测控覆盖能力: 目前, 绝大多数在轨低轨卫星 (以下称用户卫星) 轨道高度在 1000km 以下, 按北斗三号卫星系统设计指标, 在短报文覆盖能力方面, 可满足用户卫星的测控覆盖要求。

② 关键遥测数据传输能力: 用户卫星的关键遥测数据包括卫星关键健康状态、运行状态、轨道数据等关键遥测数据, 传输方向为由用户卫星传输至卫星测控中心。可通过两个北斗终端连接用户卫星和测控中心实现遥测信息传输。在遥测数据传输码率方面, 以每 60s 由用户卫星回传 1 帧长度为 400bit 的综合关键遥测数据计算, 可涵盖卫星轨道数据、健康数据、运行状态等周期性关键遥测数据。另外, 也可根据需要在某段时间内将周期性数据改为特定遥测数据。上述能力可满足卫星正常条件下的状态监视。

③ 遥控指令传输: 卫星遥控数据仅在需要时发送, 无周期性发送需求。发送方向是由测控中心至用户卫星。按使用短报文传输常用的遥控指令的应用方式, 1 帧短报文有 460bit 的容量, 1~2 帧短报文可完成 1 条遥控指令传输, 10 帧左右的短报文可完成 4kbit 的数据注入。上述能力可以满足日常应急处置时遥控数据传输要求。

④ 用户卫星服务数量: 北斗三号卫星系统短报文能力为上行 30 万次/小时, 下行 20 万次/小时。按 500 颗在轨卫星、每颗星每分钟发送 1 条遥测报文计算, 其占用的上行总容量为 3 万次/小时, 占系统总容量的十分之一, 不会对系统能力带来明显压力。北斗系统可为在轨数百颗用户卫星提供短报文测控服务。

⑤ 传输时延: 系统发布的报文响应时延为一般优于 1 分钟。该时延对于卫星向测控中心周期性状态报告而言, 仅影响地面对卫星状态了解的实时性, 一般不会带来实质性的不良后果。但对于卫星遥控工作, 其影响程度则与遥控指令类型有关: a. 通过遥测判别决定是否重发的指令。地面发出指令后, 对返回遥测内容进行判决, 发送正确则停发, 否则重发。双向长时延将加大此类遥控工作进程。b. 不通过遥测判别的高实时性指令。此类指令一般是通过连续多次发送保证快速、可靠执行。由测控中心到用户卫星的单向长时延, 虽然不会影响指令多次发送而提高的遥控可靠性, 但影响执行的实时性。c. 提前注入的时间符合指令 (数据)。1 分钟左右的时延不影响指令的执行进程, 但注入数据过程中通常需进行星地大环反馈判决, 长时延影响指令的注入效率。综上, 短报文的时延明显大于现有测控系统, 对周期性

状态监视、前向遥控数据注入影响较小,但会影响实时遥控闭环控制的效率,需根据任务需求选择使用。

3 系统组成及功能

3.1 系统组成

基于北斗全球短报文的低轨卫星测控系统如图 1 所示,包括星载短报文测控终端、北斗三号卫星导航系统、地面短报文测控终端、卫星测控中心等四部分,实现低轨用户卫星遥测数据(含轨道数据)向卫星测控中心的数据传输,用户卫星遥控数据由卫星测控中心至用户卫星的数据传输。

卫星遥测、遥控数据传输流程如图 2 所示。

卫星遥测数据传输过程:用户卫星遥测数据周期性发送至星载短报文终端,终端将数据按北斗短报文协议封装后,生成短报文信号向特定导航卫星发送。为满足北斗短报文信号接口要求,短报文发射时需对发射信号进行频率补偿。北斗卫星接收到信号后,经北斗三号卫星系统星间链路、地面信关站、北斗卫星等环节,将遥测短报文信号发送至地面短报文测控终端;地面短报文测控终端接收解调遥测短报文后,将其中的遥测数据按地面遥测传输协议封装后,发送至卫星测控中心。

卫星遥控数据传输过程:卫星测控中心将用户卫星遥控数据通过地面链路发送至地面短报文测控终端,终端按北斗短报文协议对数据封装后,生成短报文信号向特定导航卫星发送。为满足北斗短报文信号接口要求,短报文发射时需要

对发射信号进行频率补偿。北斗卫星接收到信号后,经北斗三号卫星系统星间链路、地面信关站、北斗卫星等环节,将遥控短报文信号发送至指定的用户卫星星载短报文测控终端;终端接收解调遥控短报文后,将其中的遥控数据按遥控数据协议封装,发送至用户卫星星务系统。

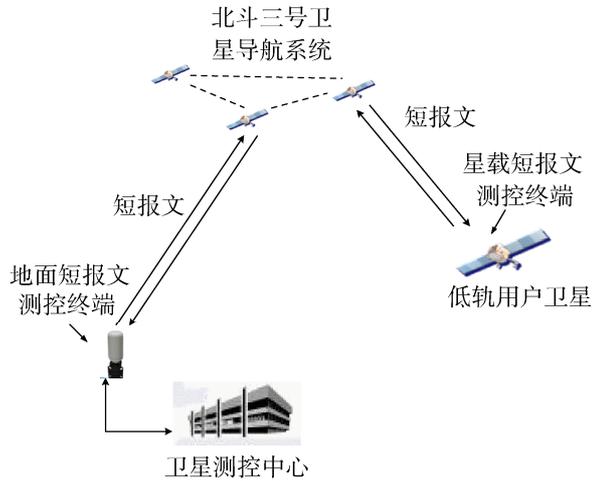


图 1 基于北斗全球短报文的低轨卫星测控系统组成图
Fig. 1 The TT&C system composition of LEO satellites based on the Beidou global short message

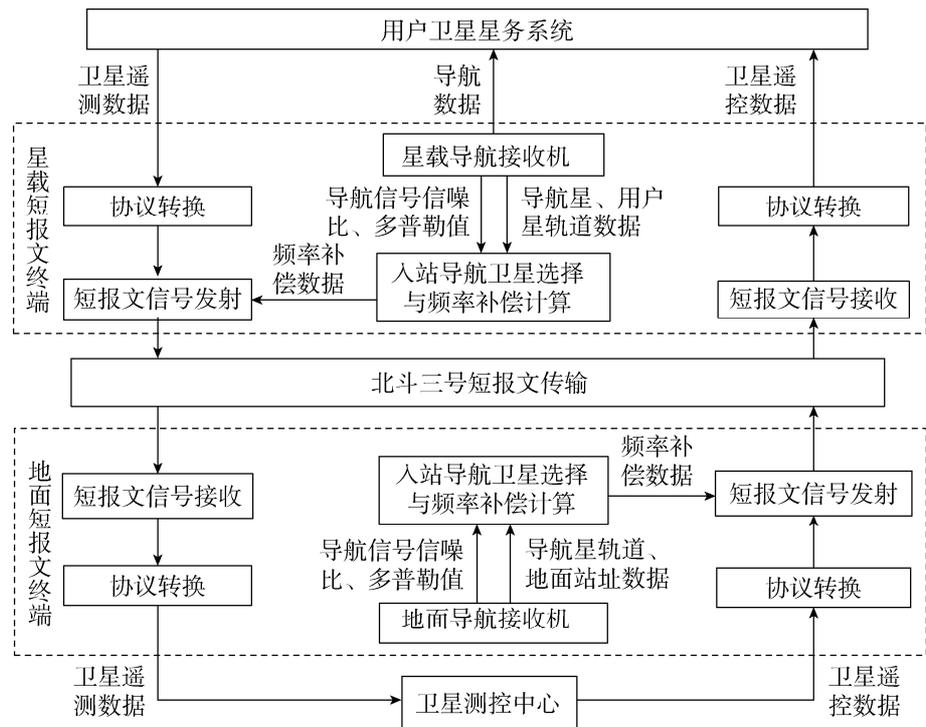


图 2 卫星遥测遥控数据传输流程

Fig. 2 The transmission process for satellite telemetry and remote control data

入站导航卫星选择及频率补偿: 由于短报文终端相对于导航卫星存在相对运动, 且终端本振频率存在不准确度, 需对终端发射信号频率进行补偿, 以满足到达导航卫星的频偏需小于 1kHz 的要求。补偿流程为: 依据导航接收机接收的多路导航信号, 获得可视范围内入站卫星的轨道、径向多普勒、接收信号信噪比、短报文终端位置及本振频偏等信息, 综合选择合适的入站卫星并计算发射信号的频率补偿值, 送短报文终端信号处理模块进行频率补偿。星载终端与地面终端的主要区别是星载终端高精度频率源实现难度大, 相对入站卫星的径向多普勒数值更大。

3.2 星载短报文测控终端功能

星载短报文测控终端主要完成卫星平台与北斗导航系统之间的双向数据传输任务, 主要功能如下:

① 遥控短报文信号接收解调: 对含有大频率动态的短报文出站信号进行捕获、跟踪, 解调出遥控数据。

② 遥控数据封装: 将不同短报文中的遥控数据, 按遥控数据协议进行封装, 发送至卫星星务系统。

③ 遥测数据封装: 接收卫星星务系统发送的卫星遥测数据, 按要求提取卫星健康状态数据、运行状态数据、卫星轨道数据等关键数据, 组成遥测数据包, 并封装为符合北斗短报文协议的数据帧。

④ 入站卫星选择及频率补偿计算: 依据导航接收机接收的下行多路导航信号, 获得可视范围内入站卫星的轨道、径向多普勒、接收信号信噪比、短报文终端位置及本振频偏等信息, 或根据预置的上述信息, 综合选择合适的入站卫星并计算发射信号的频率补偿值, 送终端信号处理模块进行频率补偿。

⑤ 遥测短报文发送: 将符合北斗短报文协议的数据帧进行编码、调制、频率补偿、功率放大等处理, 生成符合空中接口要求的短报文信号, 向选定的导航卫星发送。

主要技术指标如下:

接收频率为 B2b 频点; 接收灵敏度 $\leq -157.8\text{dBW}$ (误码率 $\leq 1 \times 10^{-5}$); 发射频率为 Lf4 频点; 发射信号功率为 10dBW; 频率补偿精度要求信号到达卫星总频偏小于 1kHz; 单次报文最大长度为 560bit。

3.3 北斗三号卫星导航系统功能

北斗三号卫星导航系统主要完成星载短报文测控终端与地面短报文测控终端之间双向短报文传输任务, 具体包括: 按短报文地址标识, 将星载短报文终端发送的短报文转发至地面短报文测控终端, 将地面短报文测控终端发送的短报文转发至指定的星载短报文测控终端。

3.4 地面短报文测控终端功能

地面短报文测控终端主要完成测控中心与北斗导航系统之间的双向测控数据传输任务, 主要功能如下:

① 遥测短报文信号接收解调: 对含有频率动态的短报文出站信号进行捕获、跟踪, 解调出遥测数据。

② 遥测数据封装: 将不同短报文中的遥测数据, 封装为规范的遥测数据帧, 通过地面链路发送至卫星测控中心。

③ 遥控数据封装: 接收卫星测控中心发送的卫星遥控数据帧, 封装为符合北斗短报文协议的短报文数据。

④ 入站卫星选择及频率补偿计算: 依据导航接收机接收的下行多路导航信号, 获得可视范围内入站卫星的轨道、径向多普勒、接收信号信噪比、短报文终端位置及本振频偏等信息, 综合选择合适的入站卫星并计算发射信号的频率补偿值, 送终端信号处理模块进行频率补偿。

⑤ 遥控短报文发送: 将符合北斗短报文协议的数据帧进行编码、调制、频率补偿、功率放大等处理, 生成符合空口要求的短报文信号, 向选定的导航卫星发送。

在主要技术指标方面, 地面终端除在设备工作环境、信号频率动态等方面有差异外, 与星载终端相比基本相同。

3.5 卫星测控中心功能

卫星测控中心主要完成用户卫星测控任务, 在利用北斗短报文对卫星测控过程中的功能与使用常规

测控站测控功能相同。

卫星测控中心在性能上与常规测控站的最大的区别是闭环控制的响应时间显著加长。

4 关键技术

短报文终端用于低轨卫星测控，突出特点是低轨卫星的大动态特性，相对于地面低速用户应用，需重点解决以下关键技术。

① 星载遥测短报文入站卫星选择及信号频率补偿技术

按北斗三号卫星导航系统要求，用户终端需进行自适应多普勒频率补偿，使补偿后到达导航卫星入口处的频偏小于 1kHz。由于每颗在轨低轨卫星，同一时间星载短报文终端可使用的短报文入站卫星不止 1 颗，其与不同导航卫星间相对运动产生的径向多普勒最大差别可达数十千赫兹之多，另外相对不同导航卫星的天线增益、传输距离也不相同，需首先进行入站卫星选择，之后针对该卫星进行频率补偿。入站卫星优选原则为：a.多普勒频率修正值的绝对值较小；b.入站卫星方向上短报文终端的 EIRP 值较大。对卫星上装载导航接收机的情形，可通过实时接收、估计、比较可视范围内导航卫星的导航信号信噪比和径向多普勒信息，选择信噪比高、多普勒绝对值低的卫星作为入站卫星。对无星载导航接收机的情形，则需在短报文终端上预置北斗三号卫星轨道及属性、短报文终端发射天线方向图等信息，结合由星务获取的卫星轨道和姿态信息，计算当时可用的入站导航卫星、理论多普勒以及理论 EIRP 值，优选信噪比高、多普勒绝对值低的可入站卫星作为优选卫星。

信号频率补偿应包括因相对运动产生的径向多普勒频率和因终端自身频率源准确度偏差两部分。对有导航接收终端的情形，可结合导航信息对上述两部分频率进行测量，综合优选入站卫星进行针对性补偿；对于无导航接收机的情形，相对径向多普勒可以通过轨道信息进行精确计算，但终端频率源准确度偏差部分，需要采用高稳频率源或采取定期测量等措施，满足修正后总偏差优于 1kHz 的要求。

② 星载高动态短报文信号接收技术

低轨卫星的高动态特性，将增加星载终端低噪比遥控短报文信号的捕获、跟踪难度，需进行针对性设计。应对高动态信号捕获通常采用匹配滤波与 FFT 频域搜索相结合的方法，利用匹配滤波的时域实时性和 FFT 频域搜索的高灵敏度性，保证接收机在一定的硬件资源条件下的高灵敏度快速捕获。应对高动态跟踪通常采用锁相环与锁频环相结合的方法，将锁频环的动态跟踪能力和锁相环的跟踪精度相结合，实现对高动态信号的稳定跟踪。

③ 低轨卫星长时延闭环控制技术

短报文数十秒的前返向传输响应时延，对于卫星向测控中心周期性状态报告而言，主要影响地面对卫星状态了解的实时性。但对于卫星遥控工作，其影响程度与遥控过程密切相关。对通过遥测判别后决定是否重发指令或发送后续指令的遥控过程，双向长时延传输将延长遥控工作进程；对不通过遥测判别的连续多次重发类应急实时指令，长时延特性不会影响多次发送提高的可靠性，但影响指令执行的实时性；对提前注入的时间符合指令（数据）。长时延仅影响指令注入效率，不影响指令的执行进程。需根据不同的控制过程，分析长时延传输对遥控工作的不同影响，针对性地制定卫星控制策略。

④ 低轨卫星遥控报文寻址技术

对低动态短报文用户，北斗三号短报文系统可以将入站卫星作为出站卫星规划短报文路由。对低轨卫星用户，若使用上述策略，则需要用户卫星周期性发送入站信号，周期长短的选择与用户星遥测数据发送需求、用户卫星能源分配、用户卫星轨道、入站卫星选择等因素有关，需综合选择。另外，应探索由卫星测控中心将用户卫星轨道信息发送至与北斗短报文信关站的方式，使出站短报文以用户轨道为先验信息进行路由选择。该方式不仅可解除对用户卫星入站信号发送频度的约束，而且可用于对用户卫星的应急“盲发”操作。

5 应用模式

鉴于北斗短报文对低轨卫星的全球高覆盖、低数据码率、长响应时间的特点, 北斗短报文用于低轨卫星测控, 应主要用于数百颗量级卫星星座的日常状态监视。通过周期性接收卫星发送的关键健康状态、运行状态信息, 实现对在轨卫星的日常监视, 减轻对常规测控网的使用压力。同时, 充分利用其传输容量, 兼顾在轨卫星的小数据量遥控数据注入, 应急条件下发送特殊实时性遥控指令。

6 结束语

随着大规模低轨卫星星座的快速发展, 其对测控资源的需求迅猛增加, 北斗三号卫星导航系统的短报文全球能力, 为大规模星座运行监管提供了新的测控资源, 下一步应积极开展相关技术研究和试验验证, 提升低轨卫星综合测控能力。

参考文献

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统应用服务体系(1.0版)[M]. 2019, 12.
China Satellite Navigation Office. The Application Service Architecture of Beidou Navigation Satellite System (Vision 1.0)[M]. 2019, 12.
- [2] 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 B2b)(1.0版)[M]. 2020, 07.
China Satellite Navigation Office. Beidou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document (Open Service Signals B2b) (Vision 1.0) [M]. 2020, 07.
- [3] 夏晓巍. 基于移动平台的北斗应急通信系统[J]. 通信技术, 2013, 5(46): 19–20, 23.
XIA Xiaowei. Beidou emergency communication system based on mobile platform[J]. Communications Technology, 2013, 5(46): 19–20, 23.
- [4] 陶德桂, 刘关心. 基于北斗短报文通信的无人机安控系统[J]. 电光与控制, 2018, 25(6): 98–101.
TAO Degui, LIU Guanxin. UAV safety control system based on Beidou short-message communication[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6): 98–101.
- [5] 雷思磊, 贺文宝, 李剑青, 等. 基于北斗短报文的卫星通信车快速组网方案设计[J]. 全球定位系统, 2018, 43(4): 53–58.
- [6] 金文, 李智中, 李宝, 等. 基于 GPS 与北斗短报文通信的无线定位装置设计[J]. 遥测遥控, 2018, 39(3): 8–14.
JIN Wen, LI Zhizhong, LI Bao, et al. The design of wireless positioning device based on GPS and Beidou's short message communication[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(3): 8–14.
- [7] 史永祥, 叶宇煌. 基于 STM32 的北斗短报文转发器设计[J]. 三明学院学报, 2015, 32(6): 65–69.
SHI Yongxiang, YE Yuhuang. Design of transponder of Beidou satellite SMS based on STM32[J]. Journal of Sanming University, 2015, 32(6): 65–69.
- [8] 史谦. 基于北斗短报文和落点预测的定位信标机的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2018.
SHI Qian. The research and realization of beacon based on short message communication and landing prediction[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [9] 王超. 基于北斗短报文的测量船舶动态管理系统研究[J]. 中国水运, 2018, 18(5): 82–83.

[作者简介]

- 刘保国 1969 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控。
张国亭 1976 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控。
郭永强 1979 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为航天测控。