

融合北斗短报文与 CCSDS 标准的卫星遥测遥控 数据系统设计

张海威¹, 胡喆斯^{1,2}, 邢楠¹

(1 西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室 西安 710043;
2 西安交通大学 西安 710043)

摘要: 随着北斗系统全面建成, 北斗短报文在我国卫星测控领域的应用逐渐展开。为了充分利用北斗短报文双向通信功能、保密性好、全球覆盖等特性, 参考国际空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 的可扩展标记语言的遥测遥控信息交换 (XTCE) 标准, 提出了融合北斗短报文与 CCSDS 标准的卫星遥测遥控数据系统设计方法。首先, 分析了 CCSSDS XTCE 和北斗短报文的应用现状; 其次, 考虑到北斗短报文的容量限制, 设计优化了卫星遥测遥控数据传输格式和内容; 再次, 针对北斗短报文传输特性, 探讨了加密通信方法; 最后, 为保证遥测遥控数据传输的正确性与可靠性, 设计了数据连续识别和丢包补发方法。结果表明, 融合北斗短报文与 CCSDS 标准的卫星遥测遥控数据系统, 可以为提高卫星的设计与科学使用提供参考。

关键词: 北斗短报文; 卫星; CCSDS XTCE; 遥测遥控

中图分类号: V556.1; V474.2+5 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)01-0001-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220519001

引用格式: 张海威, 胡喆斯, 邢楠. 融合北斗短报文与 CCSDS 标准的卫星遥测遥控数据系统设计[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 1-6.

Satellites' telemetry and telecommand data system design combining Beidou short message with CCSDS standards

ZHANG Haiwei¹, HU Zhesi^{1,2}, XING Nan¹

(1. State Key Laboratory of Aeronautics Dynamics, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710043, China)

Abstract: With the completion of the Beidou system, the application of Beidou short message in the satellite measurement and control field in China is gradually expanding. In order to make full use of Beidou short message bidirectional communication function, good confidentiality, global coverage and other features, a satellites' design method telemetry and telecommand data system based on Beidou short message and CCSDS standard is proposed by referring to XTCE standard of extensible markup language. Firstly, the application status of CCSSDS XTCE and Beidou short message is analyzed. Secondly, considering the capacity limitation of Beidou short message, the format and content of satellites' telemetry and telecommand data transmission are optimized. Then, according to the characteristics of Beidou short message transmission, the encryption communication method is discussed. Finally, in order to ensure the correctness and reliability of telemetry and telecommand data transmission, the methods of continuous data identification and packet loss and retransmission are designed. The results show that the satellites' telemetry and telecommand data system design method combining Beidou short message and CCSDS standard can provide reference for improving satellite design and scientific use.

Keywords: Beidou short message; On-orbit satellite; CCSDS XTCE; Telemetry and telecommand

Citation: ZHANG Haiwei, HU Zhesi, XING Nan. Satellites' telemetry and telecommand data system design combining Beidou

short message with CCSDS standards [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 1-6.

引言

2020年7月,我国全面建成北斗导航系统。北斗卫星具有独立的双向通信功能、保密性好、覆盖范围大、同时具有兼容导航功能、组网方便等优点,具备卫星无线电定位系统(Radio Determination Satellite System,RDSS)定位转发和通信转发能力,可以为双向授时、报文通信及地面测运控系统之间的时间同步与数据传输提供转发信道。

国内较早开展了基于北斗短报文的研究和应用工作。何雨帆开展了通过遥感九号搭载北斗一号短报文终端进行测控试验^[1]。关新锋研究了基于北斗短报文的星基测控方法,并进行了系统总体方案设计和测控数据流程设计^[2]。刘保国分析了北斗三号全球短报文用于低轨卫星的测控能力^[3]。文献[4]提出了建立基于北斗短报文的卫星健康监控体系。随着我国在轨卫星数量急剧增加,基于北斗星座全球组网覆盖的优势利用北斗短报文技术进行测控通信是对当前卫星测控的有效补充,可以实现低轨卫星“随遇接入、按需测控、实时可见,时时在线”。鉴于国内对利用北斗短报文进行卫星测控还处于探索试验阶段,为避免出现后续各方设计不统一、结构不规范导致测控信息处理复杂等问题的出现,有必要对基于北斗短报文技术的遥测遥控信息进行规范设计。

目前,美国NASA、欧洲ESA的卫星系统中广泛应用CCSDS XTCE标准。XTCE(XML Telemetric and Command Exchange)^[5-8]是空间数据系统咨询委员会(CCSDS)于2005年发布的遥测遥控信息描述标准。作为一种标准化语言,其目标是完整、准确地描述遥测遥控信息,实现同构或异构航天任务的遥测遥控信息在各系统、各部门乃至各个国家的航天局之间实现无缝对接、交换。国内,左江涛、苏举、曲艺、刘洋等人研究了基于XTCE遥测组帧技术^[9-12],并且国军标及国内大量的卫星遥测遥控信息传输设计均参考了CCSDS XTCE标准。

综上所述,本文在深入分析CCSDS XTCE标准关于卫星遥测遥控设计规范的基础上,结合北斗短报文的信息传输特点,综合考虑了在轨卫星的运行特点,提出了融合北斗短报文与CCSDS

XTCE标准优势的卫星遥测遥控数据系统设计方法,对丰富北斗短报文技术的使用场景,提升卫星的精细化使用水平,具有重要的应用价值和现实意义。

1 北斗短报文应用现状

依据文献[13],北斗短报文数据包为可变长度数据帧,可有效满足通信信息量较小但短时突发数据处理要求较高,且大量用户同时使用的各类应用需求。

①北斗终端收发信息的频度与轨道类型有关,北斗GEO卫星采用区域短报文业务类型,最大数据速率为1次/秒,单次为14 000 bit;高轨IGSO和中轨MEO卫星均采用全球短报文业务类型为1次/3秒。

②北斗短报文通信固定入站数据速率8 kbps,出站数据速率16 kbps。高/低轨波束分别最大可支持8 kbps/2 kbps数据速率的测控通信。

③北斗短报文高低轨通用兼容的电文帧长度为70 Byte,即560 bit。对于帧长度在70 Byte限制内的数据直接采用短报文方式实现;对于帧长度超过70 Byte的,可以拆包后通过短报文进行传输。

目前常用的是北斗用户机数据接口要求(4.0协议),民用的短报文通信协议格式如图1所示。

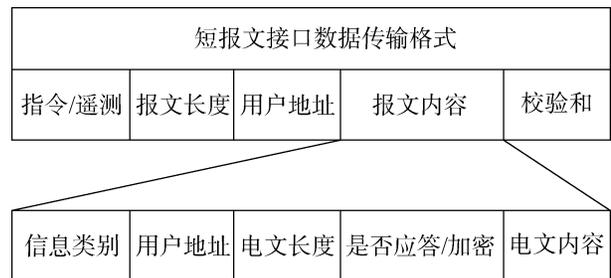


图1 民用的短报文通信协议格式

Fig.1 Beidou short message civilian communication protocol format

图中,“指令/遥测”表征终端或地面识别当前报文类别的标志。“报文长度”表征整个报文的字节长度,包含从指令到校验和的短报文消息总长度,可用来判断接收的报文数据是否缺失。“用户地址”表征报文传输时使用的当前终端ID号。“校验和”表征从前面四部分进行校验运算,采用CRC循环冗余校验,以保证数据的正确性。“报文

内容”表征传送或接收的用户数据信息，主要包含五部分：①“信息类别”表征传输信息的紧急程度、传输方式为汉字或代码等；②“用户地址”表征目标用户的ID号；③“电文长度”表征电文内容中的数据长度；④“是否应答/加密”表征地面依据此标志是否进行应答和解密；⑤“电文内容”表征实际上注的数据内容。

2 卫星遥测数据设计

CCSDS XTCE是以XML Schema的形式来定

义航天器遥测遥控描述信息的，是关于具体遥测遥控数据信息的元-元信息模型定义。具体的XTCE文档是遵守由XTCE模型定义的Schema的XML文件。XTCE标准本身设计时已经考虑了对包括星座、星群、空间站等异构航天器任务的支持，是对航天器本身层次设计的自然映射。

我国卫星的分包遥测和遥控标准均是在参考CCSDS分包遥测遥控标准的基础上形成的。

2.1 CCSDS遥测格式

分包遥测过程示意图如图2所示：

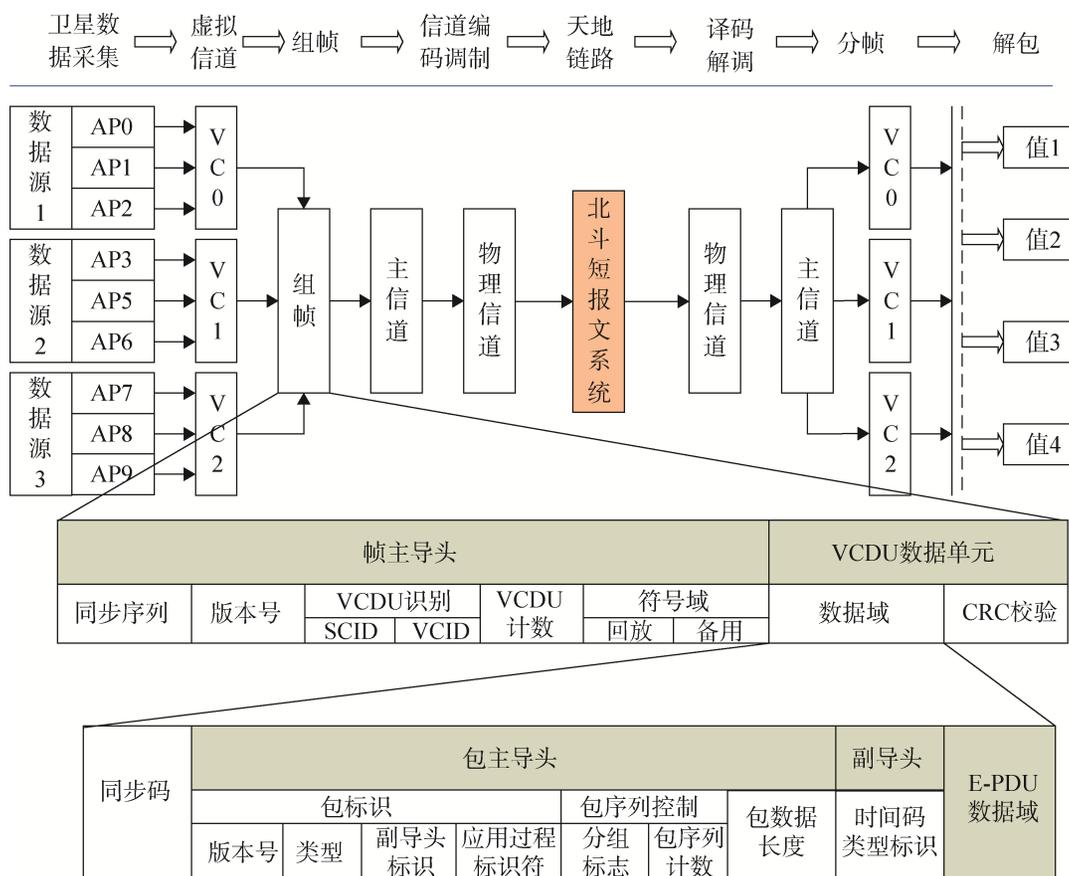


图2 卫星分包遥测系统及格式

Fig.2 Satellite packet telemetry system and format

卫星遥测系统数据源为星上产生遥测数据的物理实体（单机），可以对应一个或多个设备甚至是某个分系统。因此数据源与解析值不是一一对应的，而是采用虚拟信道（VC）按照数据特性和传输要求进行组帧。通过设置不同虚拟信道的优先级，可以为卫星数据提供不同等级的服务。

考虑到XTCE关于遥测规定已有大量文献可供参考，本文在此基础上，以不影响北斗系统导航、定位和授时主任务，并充分考虑北斗短报文数据

传输速率和内容的资源约束限制为目标，对符合北斗短报文传输规范的卫星分包遥测进行设计，便于减轻数据传输压力，提高信息传输效率。通过北斗短报文传输的卫星遥测内容应与常规遥测有较大区别。

2.2 遥测数据设计原则

基于北斗短报文的卫星遥测数据的设计，需遵循以下原则：

- ① 考虑到卫星遥测的兼容性和通用性，对现

有卫星遥测设计不做大的更改, 通过在虚拟信道 VCID 中设置新的标识, 用来识别北斗短报文传输的遥测格式及内容;

② 充分考虑北斗短报文的容量限制, 采用特定格式编排, 减少填充和无效数据, 提高信息传递效率和安全性; 原则上, 通过短报文传输的关键遥测数据, 帧长不超过每次短报文发送的最长限制, 需要多包进行传输时, 由多包续传标识进行标记;

③ 通过北斗短报文下传数据中应包含卫星测控、电源、姿态等关键状态信息; 遥测数据采集, 以各分系统的关键状态信息为主, 以模拟量数据为辅;

④ 遥测组帧采用星上主动收集各分系统工作状态信息, 进行主动存储, 如无下传需求, 则可定时由新数据进行自主覆盖; 仅在需要通过北斗短报文传输数据时, 占据物理信道, 完成数据采集、存储和发送。

2.3 遥测数据设计方法

考虑到北斗短报文通信能力限制和卫星遥测编排的一致性, 采用 CCSDS 推荐的信道访问数据单元 (CADU) 格式, 由虚拟信道数据单元 (VCDU) 附加同步序列组成, 典型代表如图 3 所示。

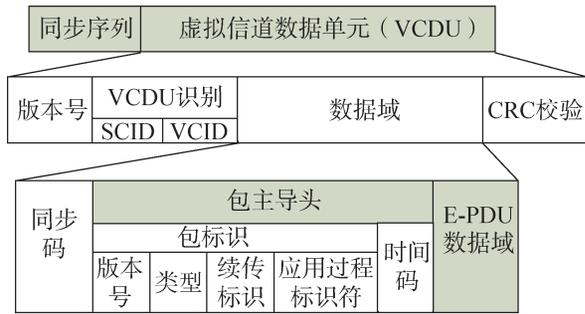


图 3 符合北斗短报文的遥测数据格式

Fig.3 Beidou short message telemetry communication format

- ① 同步序列。
- ② 版本号: 表示 CCSDS 虚拟信道数据单元 (VCDU)。
- ③ SCID: 航天器标识。
- ④ VCID: 虚拟信道标识, 通过设置约定字符表示该数据单元为北斗短报文遥测数据帧。
- ⑤ 包识别: 版本号表示 CCSDS 数据源包; 类型: 表示遥测包; 续传标识: 表示多包续传的序号; 应用过程标识符: 通过设计特定标识来表示

北斗短报文格式的遥测数据。

⑥ 时间码: 表示本包数据采集时间。

⑦ 数据域。

⑧ CRC 校验: 利用线性编码理论, 在发送端根据要传送的 k 位二进制码序列, 以一定的规则产生一个校验用的 r 位监督码 (即 CRC 码), 并附在信息后边, 构成一个新的二进制码序列数共 (k+r) 位, 最后发送出去; 在接收端, 则根据信息码和 CRC 码之间所遵循的规则进行检验, 以确定传送中是否出错。

此外, 为进一步规范北斗短报文遥测传递信息内容, 对遥测信息传输的规则同样需要统一, 包括:

① 遥测包结构、采样周期、码速率。

② 遥测参数结构: 字节序、位序。

③ 遥测参数编码方式。

④ 遥测参数处理方法: 模拟量处理方法、数字量处理方法。

⑤ 遥测参数物理意义。

⑥ 遥测参数正常值范围。

3 卫星遥控数据设计

3.1 CCSDS 遥控格式

类似地, 分包遥控通过分层体制, 再封装包头后形成遥控包, 加上帧头和差错控制域形成数据传输帧。通过将其调制到物理信道上, 向卫星发送。如图 4 所示。

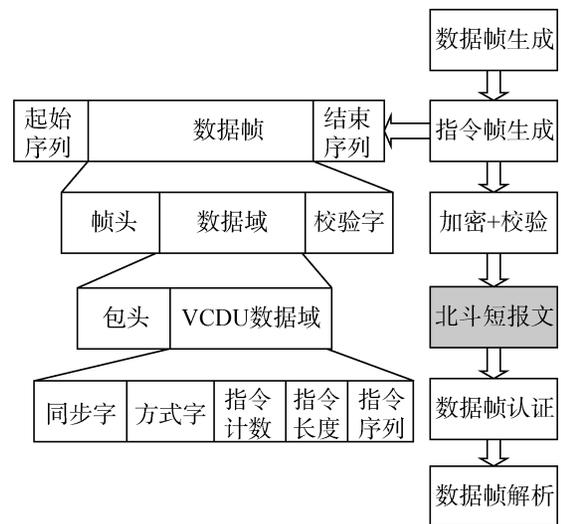


图 4 卫星遥控系统及格式

Fig.4 Satellite telecommand system and format

3.2 遥控数据设计原则

基于北斗短报文的遥控数据设计，需遵循以下原则：

① 采用指令帧格式进行统一设计，减少卫星设计更改。

② 通过设置约定“方式字”进行北斗短报文指令识别。

③ 采用“星上存储+地面触发”方式，大幅简化地面上注指令的长度和内容；即通过设计和优化星上自主执行动作指令序列，如构建故障条件下自主转对日巡航状态等指令链，通过北斗短报文发送触发指令，实现星上调姿、业务操作、安全控制等动作，优化卫星自主工作过程。

④ 通过短报文发送的遥控指令，帧长不超过每次短报文发送的最长限制。

⑤ 在不与现有的测控工作相冲突情况下，地面终端可通过短报文进行卫星操控。

3.3 遥控数据设计方法

考虑到卫星遥控指令的一致性，对图1中的“报文内容”采用图5的方式进行编排。

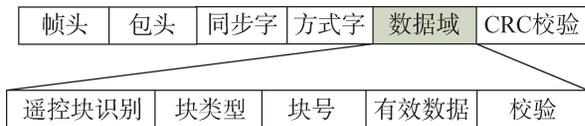


图5 符合北斗短报文的遥控指令协议格式

Fig.5 Beidou short message telecommand communication format

① 卫星同步字：用于识别卫星类型。

② 方式字：通过设置约定字符用来识别北斗短报文指令。

③ 数据域：装载某种用途的遥控块数据。

块识别：表示一个遥控块的开始。

块号：遥控块的序列号，用于标识多块上注指令序号。

有效数据区长度：表示块数据区域有效数据的字节数。

④ 校验：对数据域的内容进行正确性校验。

⑤ CRC校验：对整帧数据进行正确性校验。

4 信息加密传输技术

北斗短报文系统具有良好的加密功能，可保证用户数据通信安全。但是，用户与北斗中心、

在轨卫星与北斗卫星之间缺少相应的加解密手段，即对用户数据进行加密和对在轨卫星进行解密之间的数据双向交互，对图3与图5的数据域进行加解密，具体过程如图6所示。

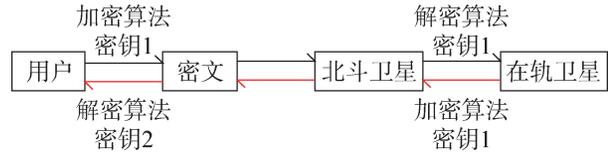


图6 北斗短报文加解密过程

Fig.6 Beidou short message encryption and decryption process

如上图所示，采用北斗短报文方式进行测控时，存在着“用户-北斗卫星-在轨卫星”双向数据通道。加解密流程主要包括“用户-北斗卫星-在轨卫星”双向数据通道，其间需要保证地面与卫星之间的密钥匹配。

考虑北斗短报文的资源约束，星地密钥同步的方法与传统加解密方式应有较大区别^[14-16]。

① 通过在遥测遥控VCDU数据域中，开辟专门的字节，用来标记加密后的数据长度。

② 采用星上存储密钥+定时更新的方式，实现星地密钥的同步。

③ 对于巨型星座而言，采用星间公钥+星地私钥的方式，确保加解密过程的可用性。

5 信息可靠传输技术

依据文献[4]中基于北斗短报文的卫星数据流向，通过在遥测遥控数据格式中开辟专门的字节，用以校验分包遥测遥控数据的正确性与完整性。通过在地面进行数据连续性判别和丢包补发，保证遥测遥控数据传输的可靠性。

(1) 遥测格式中，“续传标识”用以表征卫星遥测数据下传的连续性，“CRC校验”用以保证本帧遥测数据的正确性。

地面接收到卫星下行遥测数据后，按照北斗短报文数据格式解析出电文内容，按照“续传标识”的子包序号组装成长文数据，组包成功后地面正确解析；若组包不成功，存在数据子包缺失，根据“续传标识”定位丢失子包序号，并通过地面判断本包数据的重要程度，如有需要则进行丢失数据子包补发。

(2) 遥控格式中，“块号”用以表征卫星接收

上行遥控数据的连续性,“CRC校验”用以保证本帧遥控数据的正确性。

卫星接收到上行遥控数据后,按照北斗短报文数据格式解析出电文内容,并按照“块号”序号组装成整帧数据,组包成功后向地面端发送遥测信息,确认遥控数据包完整接收;若组包不成功,存在数据子包缺失,根据“块号”定位丢失子包序号,地面进行丢失子包数据补发。

6 结束语

本文综合了CCSDS XTCE标准和北斗短报文双向通信功能的特征,提出了融合二者优点的卫星遥测遥控数据系统设计方法,优化设计了基于北斗短报文体制的在轨卫星遥测遥控数据格式和内容,可以方便及时地监控在轨卫星使用状态,对提高在轨卫星科学使用提供了重要途径。

参考文献

- [1] 何雨帆,王家松,陈建荣.基于北斗一号的近地卫星天基测控技术及应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(4):441-444.
HE Yufan, WANG Jiasong, LI Yuan ping, et al. Technique and application of space-based TT&C for LEOs based on Compass-1 system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012,37(4):441-444.
- [2] 关新锋,范竞往,王小岛.一种基于北斗RDSS短报文的的天基测控方法[J].航天器工程,2019,28(3):20-26.
GUAN Xinfeng, FAN Jingwang, WANG Xiaodao. A Space-based TT&C method based on Beidou RDSS short message[J]. Spacecraft Engineering, 2019,28(3):20-26.
- [3] 刘保国,张国亭,郭永强.北斗三号短报文低轨卫星测控应用研究[J].遥测遥控,2021,42(1):1-6.
LIU Baoguo, ZHANG Guoting, GUO Yongqiang. Research on BDS-3 short message communication used in LEO satellites TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command,2021,42(1):1-6.
- [4] 张海威,侯波,车斌,等.面向北斗短报文的在轨卫星健康监控技术研究[J].上海航天,2021,38(6):47-52.
ZHANG Haiwei, HOU Bo, CHE Bin, et al. On-orbit satellites' health monitoring system based on beidou short message[J]. Aerospace Shanghai, 2021, 38(6): 47-52.
- [5] XML Telemetric and Command Exchange (XTCE), CCSDS 660.0-B-1, Issue 1[S]. 2007, 10.
- [6] CCSDS. XML Telemetric and Command Exchange CCSDS: CCSDS 660.0-M-0.0, Draft 1.4[S]. 2010, 3.
- [7] CCSDS. XML Telemetric and Command Exchange(XTCE)-Element Description: CCSDS 660.1-G-1[S]. 2012, 5.
- [8] ARMIN Braun, YI Wasser, MICHAEL Schmidhuber. XTCE at GSOC - First experiences adopting a new standard AIAA SpaceOps Conference[C]. AIAA, Huntsville, Alabama, 2010.
- [9] 左江涛.基于XTCE的实时遥测数据处理方法研究[D].北京:中国科学院研究生院,2011.
- [10] 苏举.科学卫星地面系统中XTCE应用研究[D].北京中国科学院研究生院,2011.
- [11] 曲艺,刘玉荣,左江涛,等.基于XTCE标准的遥测数据处理软件架构研究[J].飞行器测控学报,2012,31(1):60-64.
QU Yi, LIU Yurong, ZUO Jiangtao, et al. Study on the architecture of telemetry processing based on XTCE[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(1): 60-64.
- [12] 刘洋,刘勇,张永合,等.基于数据模型的卫星XTCE文件设计及应用[J].计算机测量与控制,2012,20(6),1643-1645.
LIU Yang, LIU Yong, ZHANG Yonghe, et al. Design and application of the XTCE satellite data exchange based on data model[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(6), 1643-1645.
- [13] 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(4.0版)[R].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2019.
- [14] 周一廷.北斗卫星导航系统短报文加密技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [15] 杨储华,周航帆,马军.基于国密算法的北斗短报文安全防护系统的研究与实现[J].计算机与现代化,2019,4:108-113.
YANG Chuhua, ZHOU Hangfan, MA Jun. Research and implementation of beidou short message security protection system based on national secret algorithm[J]. Jisuanji Yu Xiandaihua, 2019, 4: 108-113.
- [16] 何丽,刘茹,屈冬红.一种基于北斗短报文通信的动态组网技术[J].科学技术与工程,2015,15(13):149-152.
HE Li, LIU Ru, QU Dong-hong. A kind of dynamic grouping technology based on the short messages communication of the big dipper navigation system[J]. Science Technology and Engineering, 2015,15(13):149-152.

[作者简介]

张海威 1984年生,博士,主要研究方向为航天器测控技术。

胡喆斯 1987年生,在读硕士研究生,主要研究方向为航天器遥测遥控技术。

邢楠 1974年生,高级工程师,主要研究方向为航天器测控技术。

(本文编辑:潘三英)