

北斗三号终端软件关键技术研究及应用

郭浩^{1,2}, 高扬^{1,2}, 吴强^{1,2}, 张军伟³, 张帅毅³

(1. 西安测绘研究所, 西安 710054; 2. 地理信息国家重点实验室, 西安 710054;
3. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195)

摘要: 北斗三号卫星导航系统建成并服务为产业化发展提供了新的机遇和动能, 如何利用好北斗、发挥其应用效能是北斗应用领域研究的热点问题; 针对行业用户对北斗终端软件的应用需求, 研究了格式化报文服务、虚拟化动态组网、多媒体压缩重建、长报文自适应传输等关键技术, 设计研制了北斗三号终端软件, 并在国防军工、救灾减灾、生态环保等领域典型场景进行应用; 实际应用表明, 北斗三号终端软件能够较好地实现格式化报文、语音、图像、长报文等多媒体信息高效传输, 满足多用户之间动态组网和信息共享需求; 这对于丰富北斗应用场景, 促进产业应用发展具有重要意义。

关键词: 北斗三号终端; 格式化报文; 动态组网; 多媒体压缩; 长报文传输

Research and Application of Key Technologies for BDS-3 Terminal Software

GUO Hao^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, WU Qiang^{1,2}, ZHANG Junwei³, ZHANG Shuaiyi³

(1. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;
2. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China;
3. Piesat Information Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China)

Abstract: BeiDou-3 Navigation Satellite System (BDS-3) was formally commissioned and operational on July 31, 2020, which provides new opportunities and energy for development of Beidou industrialization. How to make good use of BDS and maximize application efficiency is a research hot spot in the field of BDS application. Aimed at meeting the application requirements of industry users for BDS terminal software, the key technologies such as formatted message service, virtualized dynamic networking, multimedia compression and reconstruction, and long message adaptive transmission were studied, then a new BDS-3 terminal software was designed and developed. The terminal software can be used in the typical scenarios of national defense and military, disaster relief and reduction, and eco-environmental protection and so on. The practical application shows that the BDS-3 terminal software can efficiently realize the multimedia information transmission such as formatted short message, voice, image and long message etc., which can meet the needs of dynamic networking and information sharing among the users. It is great significance for enriching BDS application scenario and promoting the development of BDS industrialization.

Keywords: BDS-3 terminal; formatted short message; dynamic networking; multimedia compression; long message transmission

0 引言

2020年7月31日, 北斗三号卫星导航系统正式开通并组网运行, 面向全球用户提供导航定位、短报文通信、信息播发、国际搜救等多类服务, 这为进一步丰富北斗应用场景、赋能行业应用提供了良好机遇和有力保障^[1-4]。短报文通信是北斗的特色和优势^[5], 具有全天候、全天时、覆盖范围广等特点, 能为境外、远海、荒漠、复杂地形环境下的用户提供可靠通信手段, 已作为北斗终端软件的主要功能广泛应用于国防军工^[6-7]、救灾减灾^[8-9]、生态环保^[10]、交通运输^[11]、海洋渔业^[12-13]等领域。

现有的北斗终端软件在短报文通信功能上还比较基础单一, 多采用点对点自由文本的方式, 这种方式字符输入操作不便^[14]、信息传输效率不高、人工读写劳神费力, 还停留在

“人对机器”的阶段, 影响了用户的使用体验和北斗的应用效能。随着北斗三号短报文通信能力的大幅提升, 行业用户对北斗终端软件的应用能力提出了新的更高要求, 主要表现如下: (1) 北斗短报文通信链路作为一种稀缺资源, 纯文本信息传输效率不高, 需要进一步优化数据编码, 提高北斗短报文信息密度和传输效率^[6,15]。(2) 多个终端用户之间能够自由临机组网^[16-17]和动态调整组员, 类似于建微信群, 群组内用户可实现短报文信息互联互通和资源共享。(3) 北斗三号区域短报文通信容量显著增加, 使得语音、图像传输^[18-19]成为可能, 需要提升北斗短报文传输的适用性, 拓展多媒体信息传输功能。(4) 随着北斗应用持续深入, 单个报文的容量已无法满足大数据量信息的传送要求, 行业用户对于可靠准确的长报文传输^[13,20]需求日益强烈。

为适应北斗技术发展和行业应用需求, 本文在继承北

收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2021-12-10。

基金项目: 部委重大专项工程项目(SZ19601)。

作者简介: 郭浩(1987-), 男, 陕西汉中, 博士, 工程师, 主要从事卫星导航应用方向的研究。

引用格式: 郭浩, 高扬, 吴强, 等. 北斗三号终端软件关键技术研究及应用[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 150-155.

斗终端现有部分功能和底层通信协议的基础上, 定制统一编解码、可动态扩展的北斗格式化报文协议, 研究格式化报文服务、虚拟化动态组网、多媒体压缩重建、长报文自适应传输等应用功能和关键技术, 设计了新型的北斗三号终端软件, 并在国防军工、救灾减灾、生态环保等领域典型场景进行应用, 对于发掘北斗短报文应用潜能、提升北斗三号应用水平、促进北斗应用效能发挥具有重要作用。

1 终端软件设计

北斗三号终端软件以手持、车载、船载、机载北斗通用终端^[21]为应用平台, 为用户提供轻量便捷的定位导航、地理信息显示、信息传输共享、群组协同等应用服务。软件按照基础支撑、数据资源、应用支撑、应用功能的分层架构进行设计 (如图 1 所示), 满足结构化、标准化、模块化设计要求, 支撑软件具备良好的兼容性、灵活性和可扩展性。

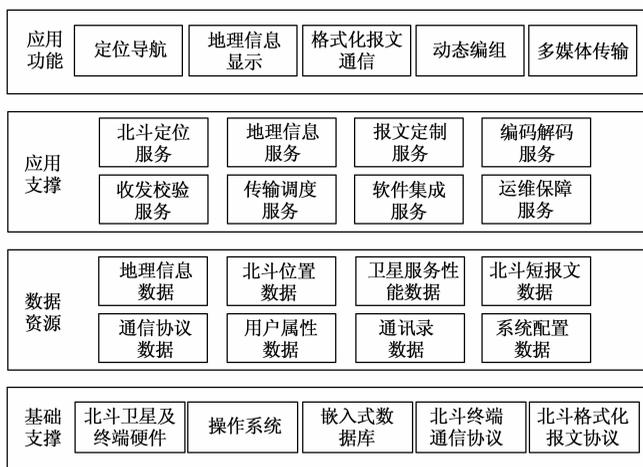


图 1 北斗三号终端软件设计架构

基础支撑层提供基础软硬件设施及协议规范支持, 主要包括: 北斗卫星、通用终端硬件、操作系统、嵌入式数据库、北斗终端通信协议、北斗格式化报文协议等。北斗格式化报文协议是在北斗终端通信协议基础上, 结合行业领域应用实际, 自定义设计和定制的格式化报文模板, 并采用统一的数据字典库和编解码规则, 实现北斗短报文信息传输由原有的自由文本模式向格式化代码模式转变。

数据资源层为终端软件运行、功能实现提供各类数据, 主要包括: 地理信息数据、北斗位置数据、卫星服务性能数据、北斗短报文数据、通信协议数据、用户属性数据、通讯录数据、系统配置数据等。

应用支撑层为上层应用功能提供相应的插件及控件, 主要包括: 北斗定位服务、地理信息服务、报文定制服务、编码解码服务、收发校验服务、传输调度服务、软件集成框架、运维保障服务等。按照北斗格式化报文协议, 依据各数据元素的信息、数据元素的关联关系及报文处理规则, 进行格式化报文的编码、解析、数据合法性检验以及报文规则处理、数据字典及报文模板管理维护。

应用功能层针对国防军工、救灾减灾、生态环保等领

域应用需求, 提供定位导航、地理信息显示、格式化报文通信、动态编组、多媒体数据传输等功能。

1) 定位导航: 支持本机定位和位置报告, 自动规划生成导航路线, 能够对途经点进行增、删、改、移, 具备导航引导、轨迹播放、航行计算等功能。

2) 地理信息显示: 加载和显示影像图、系列比例尺地形图、海图、空中交通图, 提供地理信息查询、标注、量算等操作, 支持图层管理、底图切换和地理信息显示控制。

3) 格式化报文通信: 除具备普通自由文本通信功能外, 还能收发格式化的北斗短信报文。基于北斗格式化报文协议进行短报文快捷编辑、发送和接收, 对报文内容进行可视化显示和图上标注, 支持消息群发和点对点通信。

4) 动态编组: 通过虚拟隶属关系, 兼收动态组网消息, 按需创建和撤销通信群组, 实现多个终端用户之间自由组群、信息交互、群组管理和组员临机调整。

5) 多媒体数据传输: 支持长报文、语音、图像等多种类型数据输入、发送、接收和显示, 自动完成大数据量信息的拆包组包、压缩重建和管理调度。

2 关键技术研究

2.1 格式化报文服务

格式化报文服务通过定义并维护基础数据字典, 设计动态可扩展的格式化报文协议集, 提供跨平台格式化报文协议处理引擎, 定制系列协议应用组件库实现北斗短报文信息传输由原有的自由文电模式向格式化代码模式转变。

图 2 所示为北斗格式化报文服务框架, 面向各行业应用, 提取基本概念术语和元数据, 定义字段类型、索引编号、比特长度等信息, 形成基础数据字典。提供协议定制工具, 支持用户结合行业应用自定义设计协议的信息内容、数据类型、输入方式、显示方式、校验方式等, 灵活编排和扩充行业协议集, 形成自定义协议库。在协议库和数据字典库基础上, 研制跨平台协议处理核心库, 实现格式化报文的编码、校验、发送、接收、解码等功能, 封装形成 Android 和 Windows 两个版本协议处理引擎。定制系列协议应用组件, 包括自适应编解码、收发校验、传输调度等



图 2 北斗格式化报文服务框架

非图形化组件,以及可视化输入、可视化展示等图形界面组件,为国防军工、救灾减灾、生态环保等行业用户提供快捷的信息录入、高效的数据传输、直观的上图显示等短报文应用服务。

图 3 所示为基于格式化报文服务的短报文信息输入与编码过程,用户通过从协议库中选择报文协议模板能够快速编辑并生成北斗格式化报文。每条报文模板由描述项内容和数据项内容组成,描述项用于串联、修饰报文中的数据项,仅辅助用户输入和阅读,不进行传输和处理;数据项用于输入灵活多变的信息内容,是实际传输载荷,通过在数据字典库中索引编码实现信息内容代码化。传输过程中删除冗余描述项信息,并对数据项内容进行编码,实现北斗短报文信息传输代码化、精简化、高效化。

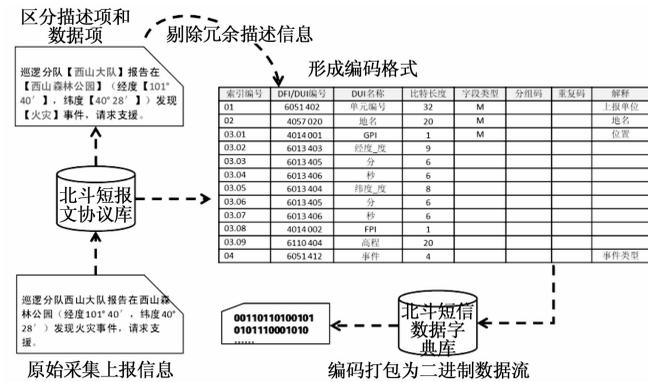


图 3 基于格式化报文服务的短报文信息输入编码过程

2.2 虚拟化动态组网

虚拟化动态组网技术是在参加组网的各终端设备中同时保存其他终端的密钥,在同一波束下,每台终端都能兼收到其他终端发送的短报文信息,以此构建起一个相互联通的虚拟化网络。设置建立群组、群组确认、调整群组、撤销群组、组内信息交互等北斗格式化报文协议。组网发起方(组长)根据需要自定义群组名称、群组 ID 和群组成员,发出“建立群组”消息。网络内所有用户都能兼收到此消息,通过解析群组成员列表,判断自己是否为群组成员,若是,则将群组名称、群组 ID、其他群组成员信息在本地存储,同时自动向组长发送“群组确认”回执消息;若不是,则忽略不做任何处理。组长根据群组成员消息回执情况,对没有入网的成员采取点对点(未入网成员较少)或广播(未入网成员较多)方式再次发送“建立群组”消息,直至收到所有群组成员回执,动态组网成功。组长可根据需要增加和删除组内成员,实现群组内成员动态调整。组长在更新群组内成员列表后,发出“调整群组”消息。原群组内成员收到此消息后,判断自己是否在群组内成员列表中,若在,则更新本地存储的其他成员信息,并发送回执;若不在,则删除本地存储的该群组信息,退出并发送回执。群组外用户收到此消息后,按照“建立群组”消息处理方式,发送确认回执或忽略。当任务结束时,组长可发出“撤销群组”消息,结束群组。群组内成员收到此消息后,

删除本地保存的该群组信息,退出并发送回执。在组网有效期内,群组内成员通过“信息交互”消息报告本机位置和其他目标、状态信息,进行组内信息共享和短报文通信。图 4 所示为北斗终端虚拟化动态组网技术框架,能够按需管理可动态调整的北斗终端应用网络,为用户提供群组内信息互联互通和资源共享等功能服务。

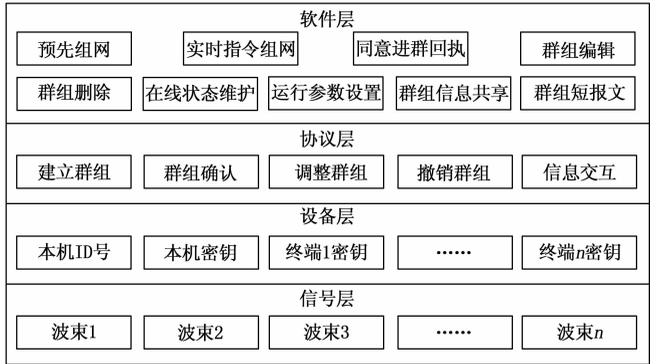


图 4 北斗终端虚拟化动态组网技术框架

2.3 多媒体压缩重建

针对北斗短报文通信链路特点,基于差值编码实现语音、图像等多媒体信号压缩与还原,如图 5 所示,发送端输出当前样值与前一样值的差值,在接收端将该项预测误差与前一输出误差相加,还原出当前样值。

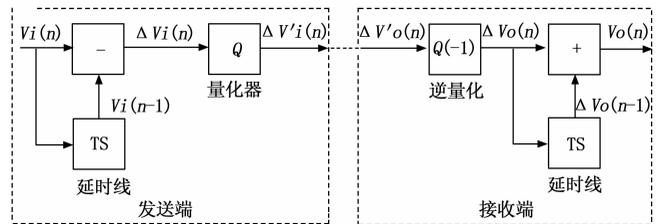


图 5 基于差值编码的多媒体信号压缩与还原

图 6 所示为多媒体信号优化处理流程,能够实现语音、图像数据保质、高效和稳定传输,并通过预处理和后期处理提升用户体验。

在语音优化压缩与重建方面,将多个音频帧合并成一个“超级帧”,以牺牲部分延时换取更高的压缩效率;提升线性预测部分整体计算精度,包括短时预测、长时预测和激励部分;对延时选择判断算法进行重写,增加参数并重新规划量化范围;调整计算步骤、增加新参数以减少计算量;重写码率控制算法,提升增益控制的准确度;内置数据恢复算法,通过算法恢复丢失数据。

在图像优化压缩与重建方面,使用预处理算法对图像去噪、锐化或者反锐化,突出核心信息,减少冗余信息;优化缩放算法,提升缩放后图像质量;对图像进行分块或者分层处理,便于分片传输;增加解码器的健壮性和鲁棒性,减少错误数据的影响,避免崩溃;采用渐进式传输方式,减少图像整体恢复时间;将常用变换存入常量表中,通过快速查表增加运算速度。

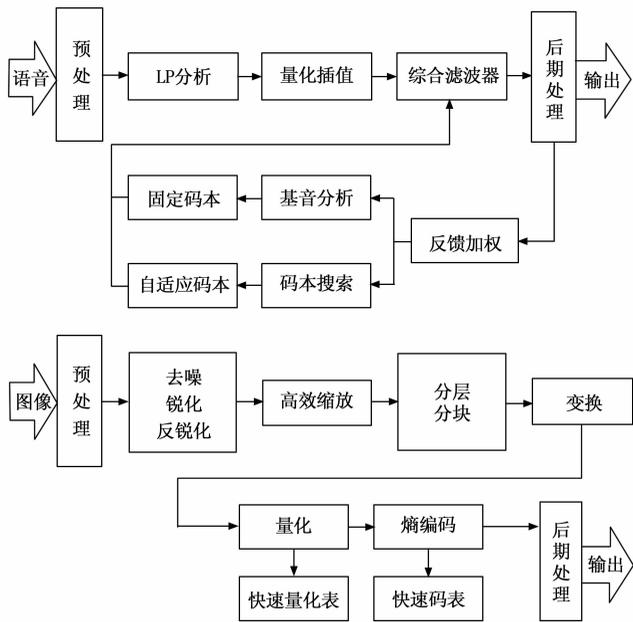


图6 语音、图像优化压缩处理流程

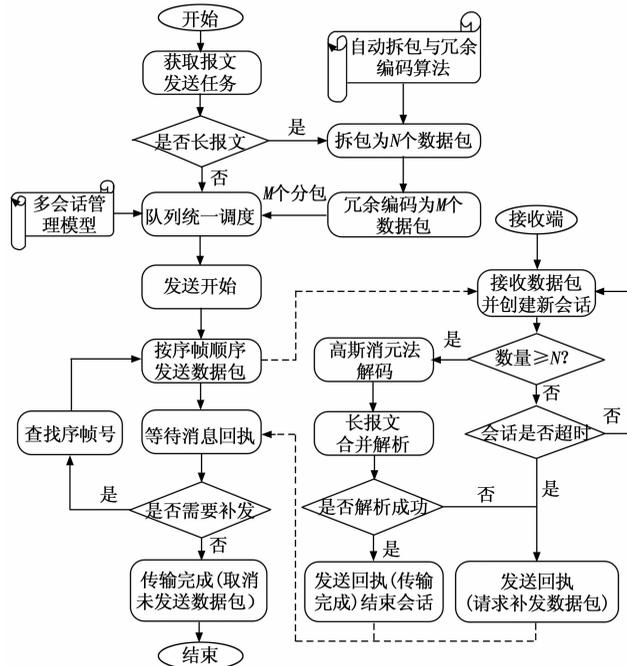


图7 北斗三号长报文自适应传输流程

2.4 长报文自适应传输

由于北斗短报文单次通信容量有限,对于语音、图像等较大数据量信息,需要进行分包传输。受北斗设备、通信环境等多种因素影响,长报文传输的成功率会随着分包数量的增加而逐步降低。为此,设计了北斗三号长报文自适应传输机制,根据用户类型、传输等级、服务频度对长报文进行自动拆分,采用随机线性矩阵和高斯消元法对分包报文进行冗余编解码,通过增加一定数量的冗余数据包($M \geq N$),保证了长报文传输的成功率和准确性^[22]。同时,针对多用户长报文分包传输需求,建立了会话调度管理模型,根据紧急程度、用户等级、传输完成率等确定传输优先级,通过动态调整分包发送队列,提高多用户整体的信息传输效率。图7所示为北斗三号长报文自适应传输流程,通过自动拆包与冗余编解码算法、以及多用户会话管理模型,显著提升了北斗三号长报文传输的成功率和传输效率。

看和处理。



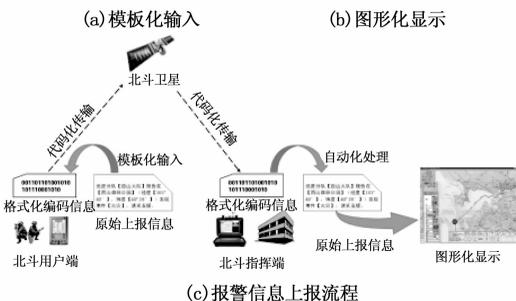
(a) 模板化输入 (b) 图形化显示

3 典型场景应用

本节以国防军工、救灾减灾、生态环保等领域典型场景应用为例,展示北斗格式化报文服务、北斗终端动态编组、语音图像传输等终端软件功能服务。

3.1 北斗格式化报文典型应用

图8所示为北斗格式化报文在救灾减灾领域的应用场景,巡逻分队发现火灾警情后立即向应急指挥中心上报报警信息。巡逻分队调用北斗终端软件的“紧急报警”报文协议模板,快速编辑录入事件发生的时间、地点、警报类型,生成火灾报警并请求支援的北斗格式化报文。通过报文协议处理引擎进行规则处理,完成格式化报文的编码、校验和发送。在应急指挥中心接收端,利用统一的格式化报文处理规则进行报文接收、校验和解码,并通过图形界面组件在二三维地图上显示报文的具体内容,方便用户查



(c) 报警信息上报流程

图8 北斗格式化报文在救灾减灾领域的典型应用

通过北斗格式化报文服务,实现北斗短报文信息的模板化输入、代码化传输、自动化处理和图形化显示。相比与普通文本报文通信,采用模板化报文输入,通过菜单和对话框选择,信息录入更快捷、操控速率更高;采用代码化数据传输,只传递变化的数据项内容,数据量更精简、

价值密度更大；采用自动化规则处理，由机器根据数据字典编码和解析，数据二义性更小，准确率更高；采用图形化界面显示，以符号和标牌展现报文内容，信息显示更直观、读取效果更佳。

3.2 北斗终端动态编组典型应用

图 9 所示为北斗终端动态编组在国防军工领域的应用场景，根据任务需要建立巡逻小组，组内成员互联互通和信息共享。巡逻小组组长（群组管理员）利用终端软件的“创建群”工具，编辑生成“建立群组”指令（包括群组名称、群组 ID、群组成员等）后发送；群组成员接收并确认后，发送同意进群的回执信息，创建群组成功。群组成员可以在巡逻小组群内共享本机位置和通报目标，并在二维地图中查看位置、属性等信息。群组管理员可进行群组名称的编辑和群组成员的添加、删除、备注修改等操作，也可发出“撤销群组”消息，结束群组。



图 9 北斗终端动态编组在国防军工领域的典型应用

3.3 语音图像传输典型应用

图 10 所示为语音图像传输在生态环保领域的应用场景，在监测车、微站等设备上安装北斗终端，开展某区域陆地沙化及水污染日常监测。利用终端软件的“图片传输”工具，向环保监察中心指挥机回传现场图像；中心结合图像和污染源数据进行分析研判，确定重点核查区，利用终端软件的“语音传输”工具，向现场环保监察执法人员下达执法检查指令。

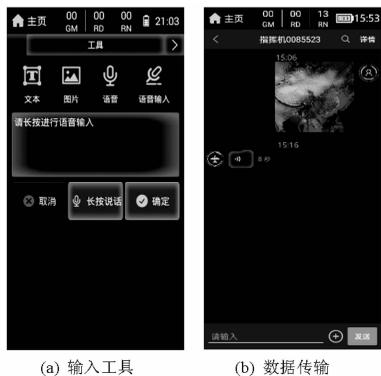


图 10 语音图像传输在生态环保领域的典型应用

区域短报文可传输 20 s 语音，基本无失真、无丢字；图像压缩率约为 2%，10 包北斗三号区域短报文可传输 3MB 大容量图片，且支持渐进式传输。

4 结束语

本文研究了基于北斗的格式化报文服务、虚拟化动态组网、多媒体压缩重建、长报文自适应传输等关键技术，设计研制了北斗三号终端软件，能够较好地实现格式化报文、语音、图像、长报文等多媒体信息高效传输，满足多用户之间动态组网和信息共享需求，为北斗三号卫星导航系统规模化、体系化、产业化应用产生引领和推动作用。

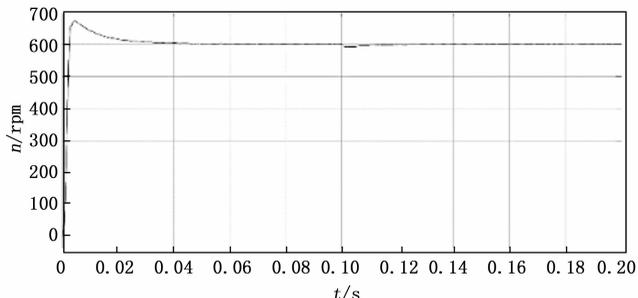
参考文献:

- [1] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system [J]. Navigation, 2019, 66 (1): 7-18.
- [2] 杨 军. 北斗卫星导航系统建设与发展 [J]. 卫星应用, 2020 (12): 8-11.
- [3] 蔡洪亮, 孟铁男, 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.
- [4] 卢 鑫, 张 弓, 陈谷仓, 等. 卫星导航系统发展现状及前景展望 [J]. 航天器工程, 2020, 29 (4): 1-10.
- [5] 刘 晗. 基于北斗全球卫星的短报文通信业务 [C] // 第十五届卫星通信学术年会论文集, 2019, 6: 311-316.
- [6] 刘云雷, 蔡 伟. 北斗短报文功能在侦察领域的应用 [J]. 舰船电子对抗, 2021, 44 (3): 16-20.
- [7] 张 杰, 何玉晶, 厉 剑. 北斗用户机应急指挥系统研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43 (12): 133-135.
- [8] 吴 悦, 任 涛, 王 璇. 基于北斗短报文的泥石流监测预警系统 [J]. 自动化与仪表, 2014, 29 (3): 19-22.
- [9] 张志峰, 李中学. 应急状况下北斗短报文通信功能的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 276-279.
- [10] 李邦训, 陈崇成, 黄正睿, 等. 基于北斗与 ZigBee 的生态环境参数实时采集系统 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (4): 460-466.
- [11] 王 洵, 欧志伟, 柳井明, 等. 交通运输行业北斗系统国际化应用综述 [J]. 卫星应用, 2021 (4): 12-16.
- [12] 陈海生, 郭晓云, 王 峰, 等. 一种基于北斗卫星通信的渔业信息编解码方法 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33 (8): 153-156.
- [13] 莫云音, 吴盛洪, 陈 亮, 等. 北斗船载终端可视化气象预警信息技术研究 [J]. 计算机技术与发展, 2020, 30 (10): 199-203.
- [14] 海 涛. 应急通信发展现状和技术手段分析 [J]. 电力系统通信, 2011, 32 (2): 1-6.
- [15] 欧阳中辉, 樊辉锦, 陈青华, 等. 基于北斗短报文的特种车辆状态信息压缩传输方法研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (9): 124-129.
- [16] 何 丽, 刘 茹, 屈冬红, 等. 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.

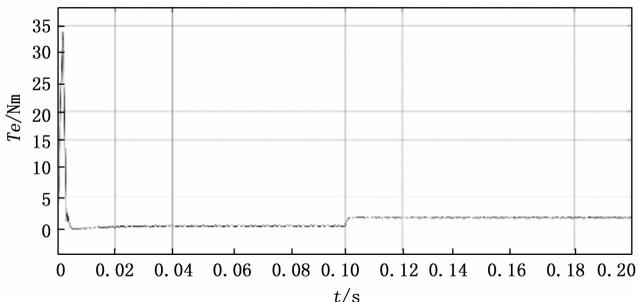
经实际应用测试，语音压缩率约为 1%，单包北斗三号

[17] 高 扬, 吴 娟, 吴 强, 等. 北斗终端动态组网方法研究 [J]. 测绘科学与工程, 2020, 40 (4): 51-55.
 [18] 敖 振, 李 凤, 马 婧, 等. 基于北斗导航星座的语音与定位同传通信系统 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38 (5): 1010-1017.
 [19] 周 菲, 王春梅, 林树青, 等. 基于北斗短报文的图像步进传输技术研究 [J]. 通信技术, 2018, 51 (12): 2841-2847.

(上接第 126 页)



(a) 转速变化曲线



(b) 转矩变化曲线

图 9 分数阶滑模控制器输出波形图

5 结束语

在汽车产业链中, 永磁同步电机因其体积小, 效率高优点, 越来越得到人们的重视。本文针对永磁同步电机无位置传感器启动困难的问题, 采用了一种分段启动的方式, 保证了启动过程的平稳性, 针对启动后转子位置的获取, 提出了一种依据分数阶滑模观测器的转子位置估计算法, 针对永磁同步电机无位置传感器的速度闭环控制, 采用了基于分数阶滑模控制器的转速-转矩双闭环控制方式, 通过 Matlab/Simulink 仿真平台, 分析了仿真结果, 验证了解决方案的可用性, 具有很强的应用价值。

参考文献:

[1] 王伟华, 王文楷, 冯 博, 等. 并联式混合动力汽车驱动模式切换协调控制方法 [J]. 交通运输工程学报, 2017, 17 (2): 90-97.
 [2] 张会娟, 姚艳艳, 刘建娟, 等. 基于矢量控制的永磁同步电机控制方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 77-81, 86.
 [3] 于 海, 邓钧君, 王震坡, 等. 基于卷积神经网络的逆变器故障诊断方法 [J]. 汽车工程, 2022, 44 (1): 142-151.
 [4] 李 真, 王 帆, 王冉璐. 永磁同步电机的自抗扰控制器参数自整定 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 92-96.

[20] 张志峰, 李中学, 阮 博. 基于混合纠错技术的北斗长报文可靠传输机制设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (9): 283-286.
 [21] 高昆仑, 杜 峰, 王延昭. BDS RDSS 位置信息共享系统设计 [J]. 导航定位学报, 2019, 7 (3): 57-62.
 [22] 周 峰. 基于无速率码的卫星自适应可靠多播协议研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
 [5] 毕森森, 王心宇, 任培培. 基于分数阶 $PI^{\alpha}D^{\beta}$ 的飞机永磁同步电机转速控制技术 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 114-118.
 [6] 李大字, 刘 展, 靳其兵, 等. 分数阶控制器参数整定策略研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (19): 4402-4406.
 [7] 王 飞, 雷虎民. 基于分数阶微积分 PD^{α} 比例导引制导规律 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27 (1): 126-130.
 [8] 袁赣南, 左志丹, 曲桂娟, 等. 二阶滑模变结构控制系统的滑模到达条件 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (6): 70-75.
 [9] 张袅娜, 许祥军, 林晓梅. 基于二阶滑模的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. 微电机, 2010, 43 (10): 33-35.
 [10] 李 浩, 梁 婕, 梁海波, 等. 不确定二阶系统的非奇异快速终端滑模控制 [J]. 航天控制, 2014, 32 (4): 8-12.
 [11] 宋申民, 邓立为, 陈兴林. 分数阶微积分在滑模控制中的应用特性 [J]. 中国惯性技术学报, 2014 (4): 439-444.
 [12] 李 伟, 宁 君, 赵国栋, 等. 基于分数阶滑模的船舶航向保持控制 [J]. 上海海事大学学报, 2020, 41 (3): 6.
 [13] 陈思溢, 皮佑国. 永磁同步电机的分数阶无位置传感器控制 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2015 (4): 43-4.
 [14] CHEN Z, ZHANG H, TU W, et al. Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Motor in Rail Transit Application Using Segmented Synchronous Modulation [J]. IEEE Access, 2019, 7: 76669-76679.
 [15] 南余荣, 姚亚楠, 钱 宁, 等. 基于 NESO 的永磁同步电机无位置传感器控制 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (9): 88-92.
 [16] 吴 春, 傅子俊, 孙明轩, 等. 基于扩张状态观测器负载转矩补偿的永磁同步电机全速范围无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (z1): 172-181.
 [17] 赵文祥, 刘 桓, 陶 涛, 等. 基于虚拟信号和高频脉振信号注入的无位置传感器内置式永磁同步电机 MTPA 控制 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (24): 5092-5100.
 [18] 刘计龙, 付康壮, 麦志勤, 等. 基于双频陷波器的改进型高频脉振电压注入无位置传感器控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (2): 749-758.
 [19] 肖烨然, 刘 刚, 宋欣达, 等. 基于改进滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器 I/F 启动方法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (8): 95-102.
 [20] 张 波, 李 忠, 毛宗源, 等. Poincare 映射的数值算法及其在永磁同步电机混沌分析中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2001, 18 (5): 796-800.
 [21] AGHABABA M P. Design of a chatter-free terminal sliding mode controller for nonlinear fractional-order dynamical system [J]. International Journal of Control, 2013, 86 (10): 1744-1756.