

北斗卫星导航系统安全和完好性监测现状与发展

庄钊文,王飞雪,欧钢,孙广富,李峥嵘

国防科学技术大学电子科学与工程学院卫星导航定位技术工程研究中心,长沙 410073

摘要 随着导航现代化概念研究的深化,安全和完好性已成为全球导航卫星系统(GNSS)至关重要的性能指标。本文从导航战角度讨论了系统安全的内涵及组成,以及系统完好性监测的必要性和监测评估方法。结合北斗卫星导航系统建设,着重介绍了在信号传输体制设计、频率规划与协调、抗干扰体系建设、星间链路和完好性监测方面取得的关键技术突破和研究成果。最后,讨论了卫星导航发展趋势。

关键词 北斗卫星导航系统;系统安全;完好性监测;导航战;信号传输体制;抗干扰体系;星间链路

卫星导航系统是以人造地球卫星为导航台的星基无线电导航系统,系统的定位精度高,服务范围广,可提供全天时、全天候、连续的导航定位服务,已成为时空定位领域国家重大基础设施,是大国地位和战略利益重要支撑,也是国家经济社会发展和国防与军队信息化建设的重要基石。围绕卫星导航技术发展和系统建设,国际竞争日益激烈。美国和俄罗斯正紧锣密鼓开展全球定位系统(GPS)、格洛纳斯系统(GLONASS)现代化升级,中国和欧盟正加紧北斗卫星导航系统(BDS)、伽利略系统(Galileo)建设,印度和日本正在建设的印度无线电导航卫星系统(IRNSS)、准天顶系统(QZSS),其中GPS、GLONASS、BDS、Galileo是全球导航卫星系统(GNSS),而IRNSS、QZSS是区域导航卫星系统。

目前,四大GNSS系统处于“一超+三强”的基本格局。美国GPS是投入运行最早、一直稳定工作、技术发展最完善、用户数量最多的GNSS系统;且GPS不断进行创新和改进,先后经历了区域系统、全球系统阶段,正在进行现代化改造^[1]。俄罗斯GLONASS建设历程与GPS类似,几乎与GPS同时建成并投入使用,也正在进行现代化改造;但受接入方式、卫星寿命、用户设备等因素影响,用户数量很少,难以对GPS领先地位产生冲击^[1]。欧洲从20世纪90年代开始,先后启动欧洲地球同步导航重叠服务(EGNOS)广域增强系统和GALILEO全球系统建设,预计在2020年完成建设^[1]。中国BDS系统起步于20世纪90年代,先后完成了北斗一号、北斗二号和北斗全

球系统试验星工程建设,是第3个拥有独立自主卫星导航系统的国家;BDS工程建设已全面展开,2018年将向“一带一路”沿线及周边国家用户提供基本服务,2020年将向全球用户提供开放服务^[2]。

从技术代系看,建设中的BDS与Galileo系统和现代化后的GPS与GLONASS系统处于同一代系,系统性能也相当。与当前GPS和GLONASS系统相比,到2020年,四大GNSS系统将全面提升系统安全性和完好性,具体包括:1)显著提升系统安全与导航战能力;2)利用增加频率、采用二进制偏移载波(BOC)调制等手段实现军民信号分离;3)将增加星间链路、提升原子钟性能和系统测量精度,提高定轨精度和卫星自主运行能力;4)将增加系统完好性监测功能;5)通过采用GNSS系统共用频率、增加无数据调制导频信号等手段,可支持多GNSS信号兼容接收和弱信号接收。

近年来,瞄准GNSS现代化和卫星导航长远发展目标,中国在北斗全球系统建设、导航装备与应用产业化等方面取得了重大业绩,尤其在系统安全与抗干扰、系统完好性监测等方面更是取得了长足进步,为提升系统服务性能和提高国际竞争力打下了良好的基础。

1 系统安全与完好性内涵

1.1 卫星导航系统安全

在GPS现代化中,导航战包括保护、阻止和保持3个方面

收稿日期:2016-09-30;修回日期:2017-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(61403413)

作者简介:庄钊文,教授,研究方向为星基导航与定位技术,电子信箱:zwzhuang@nudt.edu.cn;李峥嵘(通信作者),副研究员,研究方向为星基导航与定位技术,电子信箱:lr_li@nudt.edu.cn

引用格式:庄钊文,王飞雪,欧钢,等.北斗卫星导航系统安全和完好性监测现状与发展[J].科技导报,2017,35(10):13-18;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.10.001

的内容。保护就是提升己方系统的抗干扰能力和复杂环境下的生存能力;阻止包含对敌方导航系统实施干扰和阻止敌方使用己方系统进行导航定位,其实质就是提升系统对抗与反利用能力;保持就是保持战区外的民用导航不受战争的影响。除对敌实施干扰外,其他方面均与系统安全相关,具体包括卫星导航系统抗干扰、反利用和卫星自主运行等。

文献[3]从保证星地、星间、站间链路畅通的角度出发,提出了从信号传输体制、卫星系统、地面运控系统和地面应用系统构建抗干扰体系的构想。其中,信号传输体制抗干扰通过优化多路接入方式、伪随机码生成、信号调制方式、导航电文编排等提升体制级抗干扰能力;卫星系统抗干扰通过采用卫星防辐照、抗干扰上行接收、增强卫星发射功率等措施提升卫星抗干扰能力;地面运控系统抗干扰通过增强上行信号发射功率、提高运控终端抗干扰与防摧毁、优化注入策略与地面运控站选址等措施提升地面运控抗干扰能力;地面应用系统抗干扰通过采用干扰抑制、长码直捕、弱信号接收、辅助导航、组合导航等措施提升用户机抗干扰能力。

由于军用信号采用长周期高速伪码,抗破译能力强,敌方最可能是使用己方系统民用信号进行定位,阻止敌方接收己方民用信号是反利用的重点内容,主要采用关闭己方部分卫星信号或对己方卫星信号实施干扰两种方法。文献[4]详细分析了关闭部分卫星信号阻止目标点使用定位服务的可行性,分析表明关闭部分信号会导致全球49%以上地区的用户无法使用普通民用定位服务。因此,针对GNSS民用信号

最可能的反利用方式是在信号上叠加干扰,而不是通常所认为的直接关闭部分民用信号。

当前,各大GNSS系统均需要依赖运行控制段,通过运行控制系统周期性地向卫星注入导航数据保证系统连续稳定运行。一旦运行控制段发生故障,将严重影响系统的服务性能。同时,周期性注入也为对卫星实施电磁干扰提供了可能^[5]。为减小上行注入频度,可采用星间链路或X射频频脉冲星自主导航等技术降低卫星对地面的依赖,实现一定时间内的自主运行,从而提升整个系统的生存能力^[5-6]。

1.2 卫星导航系统完好性监测

完好性是指导航系统发生故障或误差超出了允许的范围时,自动向用户提供及时告警的能力^[1,7]。完好性直接关系到卫星导航定位服务的安全可靠性,对航空、航海等对安全系数要求很高的应用领域尤为重要;服务的完好性得不到保障,将会导致用户重大损失甚至出现灾难^[7-9]。

影响系统完好性的因素既广又多,通常由卫星导航系统各类故障所引起,包括地面运控系统故障、卫星系统故障、传播环境异常、用户接收处理故障等^[7]。应对各类故障有不同的完好性监测方法,这些单一的方法均存在不同的优缺点,需要通过建立如图1^[7]所示多层次、全方位的完好性监测体系,实时监测各类故障并传送给用户;监测体系的建立凸显了不同监测方法之间的互补性,较好地保证了用户对导航服务的完好性需求^[7]。

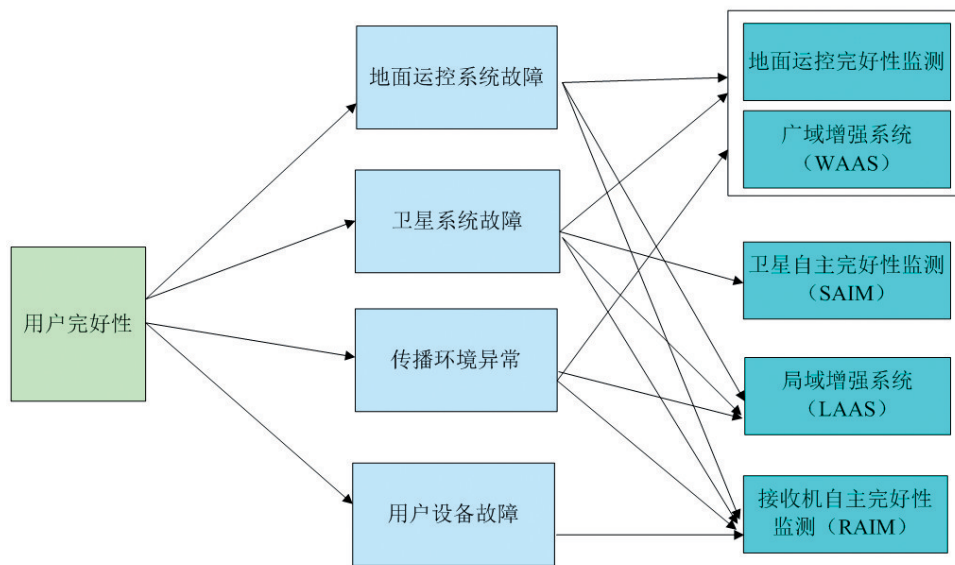


图1 不同完好性监测方法及其可检测故障因素间的对应关系

Fig. 1 Relationship between different integrity monitoring methods and different detectable fault factors

2 关键技术突破与技术进展

2.1 BDS 信号传输体制设计

北斗全球系统无线电导航卫星业务(RNSS)采用与GPS相同的直接序列扩频-码分多址(DS-CDMA)体制,扩频码采用伪随机码序列,分为长码和短码两种。长码又称精密测距

码(P码)或军码(M码),码周期超过1个月甚至更长,难以被破译,安全性高。短码又称民码或粗捕码(C码或C/A码),其周期1ms。因短码周期1ms,其频谱是间隔为1kHz的线状谱或梳状谱,易被破译^[8];且信号频带内谱线强度波动可达10~15dB,选择适当的干扰频率,较小功率的单频干扰能造

成较大的载噪比损耗。图2(a)、(b)分别给出了GPS C码接收机与P码接收机单频干扰损耗对比情况,分析时两种接收机均未采用抗干扰措施,干信比是干扰强度与信号强度之比,信号强度为-133 dBm。从图2可看出,P码接收机的抗干扰性能明显优于C码接收机。

与现代化之前的GPS类似,北斗二号系统也采用二相移相键控(BPSK)或正交移相键控(QPSK)调制方式,C码信号和P码信号分别调制到QPSK的I通道和Q通道上,两者中心频率相同。随着GNSS现代化概念的深入,通过采用点波束

功率增强技术,可使局地军用信号较民用信号强几百倍(或20多dB),信号频带内军用信号强度已与噪声强度相当甚至更强,可引起几dB的民用信号损耗。现代化GPS和欧洲Galileo均采用BOC调制方式,使军用信号频谱分开到中心频率两边,从而使军民信号分离和避免相互干扰^[11]。针对BOC调制及其复用技术,中国已开发了双正交移相键控和类双正交移相键控调制方法并申请了专利^[12-14],可支撑北斗全球系统调制方式的确定。

导航电文是由导航卫星播发给用户的描述导航卫星运

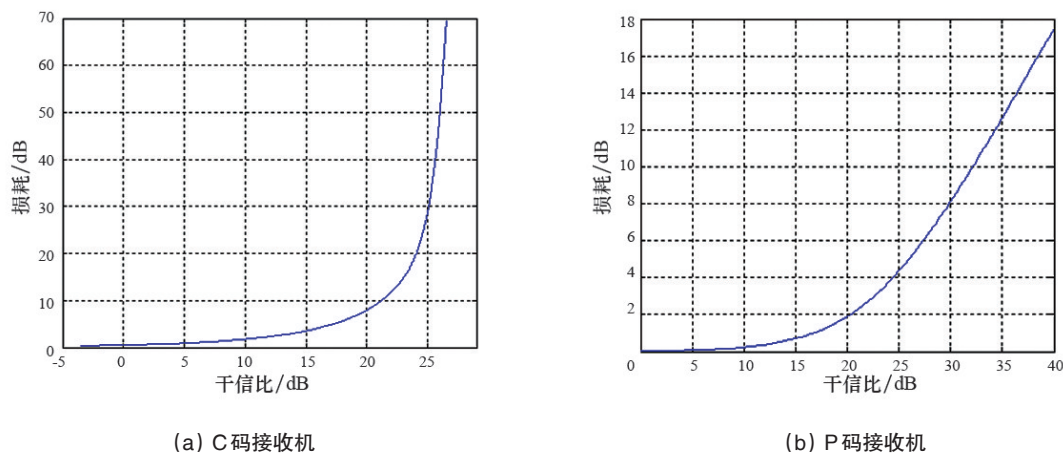


图2 GPS C码接收机与P码接收机单频干扰损耗对比

Fig. 2 The losses of continuous-wave jamming of GPS SPS receivers and PPS receivers

行状态参数的电文,包括系统时间、星历、历书、卫星时钟的修正参数、导航卫星健康状况和电离层延时模型参数等内容,并以一定格式和信息速率进行传送^[14-15]。分析表明,信息速率越低,电文解调时所需的载噪比越小,系统和抗干扰余量越大;但所需传送的电文信息总量是确定的,需要尽量对电文进行高效编排。文献[15]在对比分析GPS NAV与CNAV电文、GLONASS电文、Galileo F/NAV与I/NAV的基础上,提出了一种基于页面流的电文编排方法,优化电文后的首次定位时间和首次定位时间最短的Galileo I/NAV电文相当,而优化电文后的数据资源利用率与Galileo F/NAV的相当。另外,良好的纠错编码方式也可获取较大的译码增益,可提高电文解调灵敏度和系统与抗干扰余量。传统信道编码有汉明码、卷积码、BCH码等,随着以低密度奇偶校验(LDPC)码和Turbo码为代表的高增益信道编码的发展,可通过提高编码增益获得更高的电文解调灵敏度;而LDPC码具有更好的错误平层性能和不受专利保护,可替代传统的信道编码方法^[17]。文献[17]提出了一种信息分组长度与编码效率约束的高增益、低编译码实现复杂度的LDPC码,可满足对抗干扰和弱信号接收的需求。此外,为了提高导航接收机弱信号接收能力,现代化GPS L5频点、Galileo E5a与E5b无线电文调制的导频通道,通过改进捕获和跟踪算法,可将接收机灵敏度提高20 dB以上^[18]。

上述研究为提升北斗全球系统抗干扰能力和确定信号

传输体制提供了依据。

2.2 BDS频率规划与协调

有业界人士多次提到:“卫星导航的竞争是星座与信号竞争,是技术体制的竞争。”由于国际电联(ITU)分配给卫星导航RNSS业务的频谱资源非常有限,频率资源是卫星导航系统最重要的资源之一。2000年世界无线电大会(WRC-2000)上新增1260~1300 MHz为RNSS业务频率,使得RNSS业务下行信号达到4个L频段和1个C频段;由于1215~1260 MHz传统导航频段已被GPS和GLONASS系统先期使用,新增的1260~1300 MHz频段成为中国BDS和欧洲Galileo竞争的焦点^[19]。自北斗系统第一颗飞行试验星发射以来,中欧历经4次频率磋商会谈,于2015年1月16日达成频率共用、在国际电联框架下完成卫星导航频率协调的意见,结束了长达8年的频率协调工作。统计表明,中国L频段可使用频率近70 MHz,比GPS和Galileo分别少12 MHz和2 MHz。但是在2012年世界无线电大会(WRC-2012)上,将无线电测定卫星业务(RDSS)的下行频段(即S频段的2483.5~2500 MHz)作为RNSS主要业务进行全球划分,而中国已先期使用该频段,具有优先使用权限。至此,中国BDS RNSS下行频率总计约86 MHz,与GPS、Galileo相当,在频率协调方面取得较大的成果。

2.3 BDS抗干扰体系建设

中国北斗系统曾遭受各类干扰的威胁,全国多地在S频段、C频段、上行L频段转C入站频段、下行L频段等频点上出

现了干扰信号^[20]。另外,北斗二号首颗卫星发射后不久,就曾遭受强烈干扰而信号中断,严重影响了星地测量与数据传输^[21]。面临如此复杂的信号环境,国防科大卫星导航工程中心结合系统建设和应用,突破了卫星抗干扰、地面运控抗干扰和用户机抗干扰等一系列关键技术。

在卫星抗干扰方面,针对北斗二号卫星遭受的强干扰,经努力攻关,于2008年初突破星上抗干扰的一系列关键技术,并成功研制出具有强抗干扰能力的卫星载荷^[21],极大地保证了系统建设进度。截至2016年8月,先后有17颗北斗卫星加装了该载荷,为提升复杂电磁环境下的系统生存能力提供了保障。在2015年3月开始发射的5颗北斗全球系统卫星中,又进一步提升了载荷的高精度、抗干扰、抗辐照等性能,干扰抑制能力进一步提升了100倍^[22]。至此,北斗二号和北斗全球系统22颗在轨工作卫星全部加装的抗干扰载荷设备,卫星抗干扰技术达到国际领先水平。另外,针对我国北斗系统的星座特点,详细研究了卫星导航系统功率增强策略及其对区域导航定位性能的影响^[23-24],可为北斗全球系统功率增强方案提供依据。

在地面运控抗干扰方面,针对下行L频段干扰,结合北斗二号监测接收机的研制,成功开发了时延约束的干扰检测与抑制技术,目前已广泛应用到全国监测站中,并即将在中国领海和海外相关监测站中使用,全面支撑了北斗二号系统稳定运行和地面站选址。针对C频段干扰,结合北斗二号RDSS业务系统设备研制,成功开发了短突发、随机入站信号干扰抑制技术,解决了临近共轨卫星干扰的问题。在北斗全球系统建设中,针对运控系统各类地面站全面开展了抗干扰论证与关键技术研究,可满足复杂电磁环境下星地高精度测量需要和提升运控系统生存能力。

在用户机抗干扰方面,先后开发了长码直捕技术,时域自适应处理、变换域处理、自适应阵列天线、卫星/惯性组合导航等抗干扰技术^[25-27],并结合高动态捕获与跟踪技术,成功研制了抗干扰用户终端、长码生成与长码直捕模块(类似于GPS防欺骗模块)和各类抗干扰天线,并形成了模块、天线、专用芯片等系列抗干扰产品,进一步装备应用将全面展开。

2.4 BDS星间链路

与GPS星间链路主要用于卫星自主运行相比,北斗全球系统星间链路除用于卫星自主运行外,还要用于支持全球区域内星座定轨与时间同步,着重解决海外建设监测站的不足,对链路测距和通信性能提出了更高的要求^[28-30]。结合北斗全球系统星间链路总体设计、星间收发信机研制,我们突破星间链路快速建立、星间精密测距、星间数据通信、抗干扰与抗辐照等关键技术。2015年7月,中国利用一箭双星技术发射了两颗中圆轨道北斗卫星,该卫星均装备了星间收发载荷,随后于2015年8月利用两颗卫星首次建立星间链路^[30]。另从第七届中国卫星导航学术年会获悉,到2016年5月,历时1年多的星间链路在轨测试圆满完成,将为北斗全球系统搭建太空桥梁^[31]。相关技术的突破,标志中国成为继美国之

后第2个拥有星间链路技术的国家,也将进一步提升北斗全球系统的导航战和完好性性能。

2.5 BDS完好性监测

中国完好性监测工作启动较早,在北斗二号系统建设之时,面临的技术约束主要是难以在国外布设监测站,卫星可观测弧段小,且卫星星钟精度也不如国外系统。为保证系统精度和完好性,在国土范围建设了20多个各类监测站。由于北斗二号监测接收机具有测距精度高、监测频带范围广、全频带实时电磁环境监测、干扰与多径抑制等功能,极大地保证了系统精度和完好性等性能指标。随着北斗二号系统应用和全球系统建设的深入,又逐步在中国领海和海外建立了若干监测站,大大扩展了监测的弧段范围,基于监测接收机的完好性监测性能进一步提升。

在开展地面完好性监测同时,北斗全球系统建设中专门安排了卫星自主完好性监测(SAIM)任务,主要目的是保证卫星自身能够完成下行导航信号的自主完好性监测,并具备对关键导航载荷工况的完好性监测告警能力。目前,在部分北斗全球系统卫星中加装了SAIM载荷设备,并完成相关在轨测试验证。另外,北斗全球系统星间链路也已完成在轨测试,可利用星间链路完成卫星自主完好性监测,进一步提升监测性能。

因此,中国已初步建成了星地一体的北斗全球系统完好性监测系统,取得了较为突出的成绩。

3 展望与讨论

从卫星导航系统发展看,今后10~15年卫星导航技术发展的主要趋势包括:1)进一步提升系统性能;2)大力加强导航战能力;3)在国家PNT体系结构的框架下发展未来卫星导航系统。

在进一步提升系统性能方面,主要包括提高系统的精度、完好性和弱信号接收能力等,有待突破的关键技术包含星间链路、高精度星载原子钟、BOC类调制与军民信号分离、增加民用三频与军用双频、系统兼容与互操作、增加导航通道、增强完好性监测等,以满足实时高精度、可靠航空应用和复杂环境下信号接收等需要。

在大力加强导航战能力方面,主要是实现保护、阻止与保持三大目标,技术上的指导思想主要是将导航战上升到国家安全政策层面、军用频谱独占与共用相结合,加强卫星抗干扰与自主运行能力,提升地面运控系统抗干扰能力,强化军用信号的安全性和易用性,高度重视民用基础设施的导航定位授时安全性,全面提升用户终端抗干扰能力,及提升军用信号区域增强能力等。

在国家综合定位导航与授时(PNT)体系建设方面,当前与今后很长一段时期内,作战武器系统和平台越来越依赖卫星导航系统提供的高精度位置和时间信息;由于卫星导航存在易受干扰、在城区、茂密丛林、水下、地下等无法正常接收等问题,难以完全满足现代化战争需要。因此,国家PNT体

系必须以北斗系统为主体,融合陆基无线电、惯性、微器件(含芯片级原子钟、微惯导等)、视觉、数据库匹配(含地磁、重力场、地形等)等全源导航定位手段,为全域内的军民载体提供定位导航与授时服务,这将成为未来导航定位技术发展的必然趋势。

4 结论

自1994年启动北斗一号系统建设以来,中国卫星导航系统发展经历了北斗一号试验系统、北斗二号区域系统和北斗全球系统试验星工程三个阶段,与现代化GPS处于同一代系的北斗全球系统即将于2020年建成并向全球开放服务,工程建设将在系统安全性和完好性方面实现重大跨越。

当前,在系统安全方面,已完成北斗系统抗干扰信号传输体制设计与实现,初步建成了包含卫星抗干扰、地面运控抗干扰、地面应用抗干扰在内天地一体化的北斗抗干扰体系建设,取得了以长码设计与直捕、系统反利用、卫星抗干扰、中欧频率协调等一系列成果,极大提升了在复杂电磁环境下的系统生存能力。

在系统完好性方面,已初步建成了包含卫星自主完好性监测(SAIM)、导航增强与全球连续监测评估、接收机自主完好性监测(RAIM)在内的星地一体化完好性监测系统,取得了星间链路、SAIM载荷、监测接收机等一系列成果,提升了卫星自主运行和完好性监测能力。

总体而言,中国北斗全球系统发展与世界卫星导航主要发展趋势一致,已取得了令世人瞩目的突破;预计2020年系统建成之时,包含安全性、完好性在内的系统性能将达到国际先进水平,并将在国际合作和全球GNSS竞争方面掌握技术主导权与话语权。

参考文献(References)

- [1] 李跃. 导航与定位[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Li Yue. Navigation and Positioning [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [2] 中国北斗卫星导航系统[EB/OL]. [2017-04-28]. [http://www.beidou.gov.cn/attach/beidou/China's BeiDou Navigation Satellite System \(Chinese\).pdf](http://www.beidou.gov.cn/attach/beidou/China's%20BeiDou%20Navigation%20Satellite%20System%20(Chinese).pdf).
China's BeiDou Navigation Satellite System[EB/OL]. [2017-04-28]. [http://www.beidou.gov.cn/attach/beidou/China's BeiDou Navigation Satellite System\(Chinese\).pdf](http://www.beidou.gov.cn/attach/beidou/China's%20BeiDou%20Navigation%20Satellite%20System(Chinese).pdf)
- [3] 李峥嵘, 曾祥华, 王飞雪, 等. 北斗全球系统抗干扰体系探讨[C]. 长沙: 导航系统安全与导航战专题研讨会, 2009.
Li Zhengrong, Zeng Xianghua, Wang Feixue, et al. The Anti-jamming Architecture Research of BDS[C]. Changsha: Seminar on Safety of Navigation System and NAVWAR, 2009.
- [4] 彭竞, 聂俊伟, 王飞雪. 关闭部分导航信号实现区域定位阻断对全球定位性能的影响分析[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2011, 41(5): 547-555.
Peng Jing, Nie Junwei, Wang Feixue. An analysis of the performance of global positioning service affected by partially turning off navigation signals for preventing positioning in local area[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2011, 41(5): 547-555.
- [5] 孟繁智. 星座自主导航关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Meng Fanzhi. Research on key techniques of autonomous navigation for satellite based navigation constellation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [6] 黄震, 李明, 帅平. 美国航空航天局大于射线脉冲星导航计划[J]. 国际太空, 2008(10): 8-11.
Huang Zhen, Li Ming, Shuai Ping. NASA X-ray pulsar-based navigation project[J]. Space International, 2008(10): 8-11.
- [7] 刘文祥. 卫星导航系统高精度处理与完好性监测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Liu Wenxiang. Study on techniques of accuracy augmenting and integrity monitoring for satellite based navigation system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [8] Safety Regulation Group. GPS integrity and potential impact on aviation safety[R]. CAA THESIS, 2003.9.
- [9] 陈金平. GPS完善性增强研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2001.
Chen Jingping. Research of GPS integrity augmentation[D]. Zhengzhou: Information Engineer University of PLA, 2001.
- [10] 王梦丽, 朱祥维, 王飞雪. 梳形滤波器在自干扰载波下短周期伪码截获中的应用[J]. 信号处理, 2007, 23(5): 779-782.
Wang Mengli, Zhu Xiangwei, Wang Feixue. Comb filter's application to capture of short cycle PN-code under self-jamming carriers[J]. Signal Processing, 2007, 23(5): 779-782.
- [11] 陈建军, 李峥嵘, 王飞雪. GPS现代化信号体制与系统裕量分析[J]. 全球定位系统, 2006, 31(6): 20-24.
Chen Jianjun, Li Zhengrong, Wang Feixue. GPS modernization signal system and system margin analysis[J]. GNSS World of China, 2006, 31(6): 20-24.
- [12] Zhang K. Generalised constant-envelope dualQPSK and altBOC modulations for modern GNSS signals[J]. Electronics Letters, 2013, 49(21): 1335-1337.
- [13] 国防科学技术大学. 一种双正交相移键控信号的调制方法和调制装置: 中国, ZL201110451739.0[P]. 2013-10-16.
National University of Defense Technology. A Modulation Method and Modulation Set of Dual QPSK: China, ZL201110451739.0 [P]. 2013-10-16.
- [14] Huang X M, Zhu X W, Ou G. Constant-envelope Dual QPSK-like modulation and its generalized form for modern GNSS signals [J]. The Electronics Letters, 2015, 51(2): 175-177.
- [15] 毛家俊. 卫星导航系统导航电文设计技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Mao Jiajun. Study of navigation message design technology in satellite navigation system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [16] 陈金平, 王梦丽, 李保东. 卫星导航电文设计分析[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国科学院光电研究院, 2010.
Chen Jinping, Wang Mengli, Li Baodong. Analysis of satellite navigation message's designing[C]//Proceedings of the 1st China Satellite Navigation Conference. Beijing: Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [17] 王建辉. 高灵敏度导航信号接收技术与信道编码设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Wang Jianhui. High sensitivity receiving techniques for navigation signal and channel code design research[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [18] 林红磊. GNSS高灵敏度导航信号接收技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Lin Honglei. Research on techniques for acquisition pilot and data GNSS signals[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.

- [19] 张春海, 赵晓东, 葛侠, 等. 浅谈全球卫星导航系统的频率规划及其组合应用模式[C]//第二届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国科学院光电研究院, 2011.
Zhang Chunhai, Zhao Xiaodong, Ge Xia, et al. Study about the layout of GNSS frequency and combined application model[C]//Proceedings of the 2nd China Satellite Navigation Conference. Beijing: Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [20] 温日红. 北斗卫星导航系统频率保护现状与对策[C]//第二届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国科学院光电研究院, 2011.
Wen Rihong. Status and countermeasure on frequency protect of BDS [C]//Proceedings of the 2nd China Satellite Navigation Conference. Beijing: Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [21] 中国北斗曾遭外部强烈干扰导致信号中断[N/OL]. (2013-06-17). <http://mil.sina.com/?sa=t134d359589v76&domain=mil.news.sina.com.cn&vt=4>.
Chinese BDS signals were ever interrupted because of strong jamming [N/OL]. (2013-06-17). <http://mil.sina.com/?sa=t134d359589v76&domain=mil.news.sina.com.cn&vt=4>.
- [22] 王握文, 于洪涛. 国防科大突破卫星导航多项关键技术 干扰抑制能力提高 100 倍[N/OL]. (2015-05-23). <http://military.people.com.cn/n/2015/0523/c1011-27-44789.html>.
Wang Wowen, Yu Hongtao. National University of Defense Technology had resolved many key problems of GNSS. And the capability of anti-jamming had enhanced 100 times than before. [N/OL]. (2015-05-23). <http://military.people.com.cn/n/2015/0523/c1011-27-44789.html>.
- [23] 吕志成, 刘增军, 王飞雪. 卫星导航系统功率增强对区域导航性能的影响分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 55-61.
Lv Zhicheng, Zhang Yonghu, Wang Feixue. An analysis of effect of enhancement on performance of region positioning service[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 55-61.
- [24] 吕志成, 张勇虎, 刘增军, 等. 基于混合星座的卫星导航系统功率增强服务性能分析[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2): 76-80.
Lv Zhicheng, Zhang Yonghu, Liu Zengjun, et al. An analysis of service performance for enhancing power of satellite navigation system based on mixed constellation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(2): 76-80.
- [25] 李峥嵘. 卫星定位接收机抗干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
Li Zhengrong. Study of anti-jamming technology for satellite positioning receiver[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [26] 聂俊伟. GNSS 天线阵抗干扰算法及性能评估技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Nie Junwei. Study on GNSS antenna arrays anti-jamming algorithm and performance evaluation key techniques[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [27] 曾祥华. 卫星导航抗干扰中的时延-量化和运动适应性技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
Zeng Xianghua. Study on delay, quantization and motion adaptability issues of satellite navigation anti-jamming technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [28] 唐小妹, 王飞雪. GPS与北斗导航系统星间链路需求及性能比较分析[C]//第二届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国科学院光电研究院, 2011.
Tang Xiaomei, Wang Feixue. Performance comparison of GPS and BeiDou navigation system[C]//Proceedings of the 2nd China Satellite Navigation Conference. Beijing: Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [29] 王东会. 面向测距与通信性能优化的卫星导航星间链路组网技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
Wang Donghui. Research on networking of navigation inter-satellite link oriented the optimization of ranging and communication[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [30] 北斗导航卫星首次星间链路建立[EB/OL]. [2015-08-11]. <http://news.sohu.com/20150811/n418622042.shtml>.
The First Inter-satellite Link of BDS have been Erected[EB/OL]. [2015-08-11]. <http://news.sohu.com/20150811/n418622042.shtml>.
- [31] 星间链路完成在轨验证 为“北斗”系统搭太空桥梁[EB/OL]. [2016-05-20]. <http://it.qq.com/a/20160520/014229.htm>.
Inter-satellite Link, which had finished Orbital Measurement, will establish space bridge for BDS[EB/OL]. [2016-05-20]. <http://it.qq.com/a/20160520/014229.htm>.

Current state and development of monitoring system safety and integrity for BeiDou Satellite Navigation System

ZHUANG Zhaowen, WANG Feixue, OU Gang, SUN Guangfu, LI Zhengrong

Satellite Navigation and Positioning Research and Development Center, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract Along with the development of navigation modernization concept, the system safety and the integrity have become the key performances of the GNSS. This paper discusses the connotation and the composition of the system safety from the perspective of navigation warfare. Combined with the construction of the BeiDou system, this paper reviews the key breakthroughs and research achievements in the design of the signal system, the frequency planning and coordination, the construction of the anti-jamming architecture, the inter-satellite link and integrity monitoring. Finally, the future development of the satellite navigation system is discussed.

Keywords BeiDou Satellite Navigation System; system safety; integrity monitoring; navigation warfare; signal transferring system; anti-jamming architecture; inter-satellite link

(责任编辑 刘志远)