

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.018

引用格式:金国平,刘芹丽,桑怀胜. 卫星导航系统上行注入的研究现状与发展趋势[J]. 电讯技术,2015,55(7):807-813. [JIN Guoping, LIU Qinli, SANG Huaisheng. Research Status and Developing Trend of Uploading Schemes for Satellite Navigation Systems[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(7):807-813.]

卫星导航系统上行注入的研究现状与发展趋势*

金国平**,刘芹丽,桑怀胜

(北京卫星导航中心,北京 100094)

摘 要:上行注入系统是卫星导航系统的生命线,是卫星导航系统不可或缺的一部分。详细研究了国外全球卫星导航系统和区域卫星导航系统的上行注入方案:全球定位系统(GPS)正由 GPS II 阶段过渡到 GPS III 阶段,上行注入也从全球布站的单星直接注入方案转变为本土布站的基于星间链路转发的注入方案,“伽利略”(Galileo)采取了全球布站的单星直接注入方案,而俄罗斯全球导航卫星系统(GLONASS)、准天顶卫星导航系统(QZSS)和印度区域导航卫星系统(IRNSS)采取了本土布站的单星直接注入方案。随着各大全球系统逐步研究、规划和开发星间链路,基于星间链路转发的上行注入方案势必成为全球系统的上行注入方案发展趋势,链路协同注入和高速传输也必然成为该方案的关键技术。

关键词:卫星导航系统;上行注入方案;星间链路;高速传输

中图分类号:TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)07-0807-07

Research Status and Developing Trend of Uploading Schemes for Satellite Navigation Systems

JIN Guoping, LIU Qinli, SANG Huaisheng

(Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: An uploading system is an indispensable part of a satellite navigation system because it is a life-line of the system. This paper studies the uploading schemes used by foreign global and regional satellite navigation systems. Global Positioning System(GPS) is transiting from GPS II to GPS III. GPS II uses a signal-satellite direct uploading scheme and sets uploading sites globally. But GPS III will use a scheme based on data transmission via its inter-satellite links and sets sites only in USA. Galileo uses the same scheme as GPS II. Russia’s Global Navigation Satellite System(GLONASS) and Quasi-Zenith Satellite System(QZSS) and Indian Regional Navigational Satellite System(IRNSS) use the signal-satellite direct uploading scheme and set native sites only. Today, with the studying, scheduling and developing inter-satellite link of global systems, the scheme based on inter-satellite links will certainly become a trend of the uploading scheme of a global system and a cooperation among uploading links and a high-speed transmission will be key technologies inevitably.

Key words: satellite navigation system; uploading scheme; inter-satellite link; high-speed transmission

* 收稿日期:2015-01-30;修回日期:2015-04-24 Received date:2015-01-30;Revised date:2015-04-24

** 通讯作者:ssource@126.com Corresponding author:ssource@126.com

1 引 言

卫星导航系统是一种全天候全时段的无源定位导航系统,为地面、空中甚至航天用户提供定位、测速、授时(Positioning Velocity and Timing, PVT)服务,如今已经深入到各行各业、千家万户。卫星导航系统所提供的各类服务都依赖于卫星播发的广播星历、卫星钟差和卫星历书等导航电文,这是由上行注入系统负责保障的。上行注入系统将地面运行控制系统生成的导航电文及载荷管理指令上注到卫星并保持及时更新,是地面运行控制系统有效管理和控制星上业务载荷的有效途径,是保障卫星导航系统 PVT 服务的“生命线”,其工作可靠性直接影响系统服务的连续性和稳定性。

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的上行注入系统在 GPS II 阶段采取了基于全球布站的单星注入建设策略^[1],并经历了多年的实际应用验证,而 GPS III 阶段将建设策略转变为依托本土布站的“一点通、全网通”^[2],目前正在建设过程中。Galileo 主要采取区域布站的单星注入建设策略^[3-4],但在欧洲之外的全球其他地区也建设了注入站,其功能仅限于上注本区域的完好性信息^[3],其上行注入系统也经历了前期 4 颗试验卫星的测试和验证。全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)同样是基于本土实施上行注入,并已历经多年运行。

随着各卫星导航系统和相关技术的发展,上行注入方案在系统设计、工作方式、频率选择、技术体制等方面都逐渐地发生着变化,伴随着星间链路技术的兴起,也呈现出新的发展趋势。本文通过研究 GPS、Galileo、GLONASS、准天顶卫星导航系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)和印度区域导航卫星系统(India Regional Navigation Satellite System, IRNSS)等国外卫星导航系统的上行注入方案,试图归纳总结上行注入的发展与趋势,以期为我国卫星导航系统的未来建设和发展提供一些参考。

2 国外上行注入系统的现状和发展

2.1 GPS 系统

GPS 系统的上行注入方案经历了从 GPS II 到 GPS III 阶段的演变。

在 GPS II 阶段,美国采取了全球布站的策略以实现全星座、全弧段、全时段注入,在海外建立了阿

森松岛(Ascension Island)、迪戈加西亚(Diego Garcia)、夸贾林环礁(Kwajalein Atoll)、卡纳维拉尔角(Cape Canaveral)等 4 个注入站^[2]。但随着星间链路技术的发展,美国将在 GPS III 阶段改变上行注入策略,取消海外注入站,将全球布站收缩为本地布站,仅利用本土注入站在星地之间建立高速上行通道,借助星间链路向全星座分发导航电文等数据,仅需一副注入天线就可实现“一点通、全网通”^[5],同样可实现全星座、全弧段、全时段注入。GPS III 在美国境内建立 3 个高速地面天线(High-speed Ground Antennas, HSGA)注入站,三站相互备份,同时只有一个站与星座建立星地链路,一旦该链路中断,其他两个站可立即无缝接入^[5]。星座内的任一卫星均可作为节点星,地面高速天线与任一可视卫星建链均可实现全网注入,并且在与节点卫星的星地链路不畅通时,地面天线可迅速切换至与另一颗卫星建链。虽然 GPS II 阶段也有星间链路,但由于设计能力不足,难以承担上行注入信息的星间链路转发^[6]。

在 GPS II 阶段,美国申请并使用 L 频段 1775 ~ 1850 MHz 用于卫星发射、早期操作和异常处理, S 频段 2025 ~ 2110 MHz 用于支持测控(Telemetry, Tracking and Control, TT&C)和导航电文的上注^[5]。但由于美国要将陆地移动通信统一到全球频段,因此 L 频段 1775 ~ 1850 MHz 也要从空间通信业务移交给陆地商用移动通信业务,同时考虑到对支持所有航天器发射、早期操作和异常处理的信号标准化计划以及统一 S 频段(Unified S Band, USB)体制无法支持大数据量信息上注需求, GPS III 阶段拟使用 S 频段 2025 ~ 2110 MHz 用于卫星发射、早期操作和异常处理,并选用 C 频段 5000 ~ 5010 MHz 支持“一点通、全网通”的上行注入方式。该频段内的星地上行业务相对较少,上行注入业务优先级高,带内无意电磁干扰少,而且还可与 C 频段(5010 ~ 5030 MHz)形成上下行配对关系^[5,7],有利于设备一体化设计。在 GPS II 向 GPS III 过渡过程中, Block III 卫星会保留传统 S 频段硬件^[1],利用空军卫星控制网(Air Force Satellite Control Network, AFSCN)分布在全球各个天线站为 GPS III 提供备份上行注入。

在 GPS II 阶段,上行注入频度仅为每天一次^[1]。但在 GPS III 阶段,借助高速上行链路和定向宽带星间链路,可允许快速配置和频繁更新导航电文,拟将导航电文数据龄期(Age of Data, AOD)从

GPS II 阶段的平均 12.5 h 提高到 5 ~ 15 min^[8],还将播发全球完好性信息,并且有可能替代广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)播发区域差分及完好性信息^[9]。为此,Block III 的上行数据速率设计为 200 kb/s^[2,10],是 Block IIF 的 100 倍^[10],以此达到提高电文注入频度、降低导航电文数据龄期的目的。

2.2 GLONASS 系统

与 GPS 系统一样,GLONASS 同样是面向全球服务的系统,也要求导航卫星能在全弧段内及时获得导航电文等数据。在前苏联时期,由于拥有全球最大东西跨度的疆域,因此没有像美国那样在海外建站,而是在境内建立了 5 个控制站来实现对导航卫星的全网注入^[11-13],包括圣彼得堡、叶尼塞斯克、共青城、捷尔诺波尔和萨雷沙甘。苏联解体后,位于乌克兰和哈萨克斯坦境内的捷尔诺波尔和萨雷沙甘就不再参与卫星控制^[12]。根据相关文献资料,GLONASS 正在规划和开发星间链路^[6],基于星间链路转发技术的上行注入方案也必将是 GLONASS 上行注入的发展方向,以更好地实现全弧段全时段的导航电文上注、载荷的管理控制。

2.3 Galileo 系统

由于没有星间链路技术,Galileo 也采用了与 GPS II 一样的全球布站策略,分别在北美洲的温哥华(Vancouver)、南美洲的圣地亚哥(Santiago)和库鲁(Kourou)、南太平洋的帕皮提(Papetee)、亚洲的特里凡得琅(Trivandrum)、大洋洲的新诺尔恰(New Norcia)和努美阿(Noumea)、欧洲的基律纳(Kiruna)、印度洋的留尼旺岛(Reunion)建立了 9 个注入站^[3],每个注入站配备 4 副 3 m 天线,其中 1 副是冗余备份的,与地面控制中心(Ground Control Center, GCC)的通信使用了帧中继(Frame Relay, FR)、仅甚小孔径卫星终端(Very Small Aperture Terminal, VSAT)、FR 和 VSAT 配合、综合业务数字网(Integrated Services Digital Network, ISDN)等四种方式,四种方式逐级备份。不过,有文献资料显示 Galileo 也同样在规划星间链路^[6],一旦卫星上加载星间链路载荷,Galileo 就可以将注入站从海外完全收缩到欧洲本土,以降低注入站的管理难度和管理风险。

Galileo 选择了与 GPS III 相同的 C 频段 5000 ~ 5010 MHz 作为上行注入频段,并在信号体制中引入(2,1,7)卷积码其使用 Viterbi 译码技术^[3-4],以此

提高链路可靠性。同时,还设计了与 GPS III 不同的链路备份策略,GPS III 是在 S 频段载荷保留了 GPS II 阶段的注入能力,且仅在需要时才启用,而 Galileo 虽然也使用 S 频段测控上行链路作为备份链路,但采用简化备份策略和常态工作方式^[4],能及时、无缝地由主链路切换至备份链路,确保导航服务不中断、精度不降低。

在设计注入站时,Galileo 充分考虑了对卫星的冗余覆盖^[4],大部分区域内一颗卫星至少同时可视 3 个注入站,部分区域同时可视不低于 4 个,少部分区域同时可视数量也达到 2 个。

此外,Galileo 设计了新的完好性信息注入策略,与美国通过 WAAS 系统来发播完好性信息的方式不同,Galileo 将全球划分为若干完好性区域,在欧洲本土依靠注入站来完成本地区的完好性信息注入,但在欧洲本土以外,则依托全球 5 个外部区域完好性系统(External Region Integrity System, ERIS)站来负责本区域完好性信息的生成和上注,且不注入广播星历、钟差等导航电文,其 ERIS 站也不归属于 Galileo 系统。

2.4 其他卫星导航系统

除 GPS、GLONASS、Galileo 之外,国外卫星导航系统还包括日本的 QZSS 和印度的 IRNSS。QZSS 由 3 颗 HEO 卫星提供服务,由于该系统是区域服务系统,因此采取境内布站的策略,在境内建立两个跟踪控制站来负责注入^[14-15],并使用与 GPS III 和 Galileo 相同的 C 频段作为上行注入频段。IRNSS 星座仅包含 3 颗地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星和 4 颗倾斜同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星^[16],在印度本土是全时段可视的^[17],因此同样采取境内布站策略,在领土范围内铺设 9 个卫星遥测遥控及导航信息上行注入站即满足了注入需求^[18-19]。

3 对比与分析

从国外现状和发展来看,区域卫星导航系统均主要立足于本土服务,由高地球轨道(High Earth Orbit, HEO)、GEO 和 IGSO 等高轨卫星来发播导航信号,本土对卫星的可视范围大,基于本土布站、单星单链路直接注入的上行注入方案完全可以满足区域服务的要求,而且还有助于降低系统设计难度,缩减系统建设成本,是区域卫星导航系统最有效、最经

济的上行注入方案。

全球卫星导航系统由于要面向全球各地提供服务,需要实现全星座、全弧段、全时段的上行注入,除俄罗斯借助其疆域的东西大跨度仅在本土布站之外,GPS II、Galileo 均是在全球范围内建立注入站,并使用单星单链路直接注入方式,这是在成熟掌握星间链路技术之前唯一的技术低风险上行注入方案,但选址工作是一项巨大工程,除其对卫星的可视性能满足注入要求之外,还涉及政治、经济、安全、通信等多个领域,复杂度远高于本土布站。

从 GPS III 来看,星间链路技术的引入将会彻底改变卫星导航系统的上行注入方案,完全打破了区域受限的困局,突破了政治、安全等难题。为确保系统可靠性,单链路单星直接注入方式一般采用单站多天线冗余备份以及注入站对卫星多重覆盖的备份

策略,甚至使用其他链路来提供备份注入,但在基于星间链路转发注入的方式下,备份策略变得更为简单,在每颗卫星或注入站视界内多颗卫星均可作为节点卫星的条件下,仅需地面建立冗余备份站即可达到备份要求。

上行注入频段也逐渐统一到 C 频段(5000 ~ 5010 MHz),但 IRNSS 的 C 频段位于 3400 ~ 3425 MHz^[17,20],并与 C 频段 6700 ~ 6725 MHz 共同实现星地双向测距任务^[16-19]。

纵观国外各卫星导航系统的上行注入方案,GPS III 的基于星间链路转发注入的方案在灵活性、安全性、扩展性、维修便捷性、管理复杂性、系统可靠性等方面均更胜一筹,当然这一切都是以成熟星间链路技术和先进卫星技术为前提的。表 1 对国外各卫星导航系统上行注入方案进行了比较。

表 1 国外各卫星导航系统上行注入方案的比较
Table 1 Comparison of uploading schemes used by foreign satellite navigation systems

导航系统	服务类型	布站范围	注入方案	注入频段	站点备份	天线备份	链路备份	节点备份	
GPS	GPS II	全球服务	全球布站	单链路单星直接注入	S 频段	多重覆盖	单站天线冗余	无	无
	GPS III	全球服务	本土布站	基于星间链路转发注入	C 频段	三站互备	未知	保留 S 注入能力	所有卫星均可作为节点卫星
	GLONASS	全球服务	本土布站	单链路单星直接注入	未知	多重覆盖	未知	未知	无
	Galileo	全球服务	全球布站	单链路单星直接注入	C 频段	多重覆盖	单站天线冗余	S 链路常备	无
	QZSS	区域服务	本土布站	单链路单星直接注入	C 频段	多重覆盖	未知	未知	无
	IRNSS	区域服务	本土布站	单链路单星直接注入	C 频段	多重覆盖	未知	未知	无

4 上行注入发展趋势

(1)区域系统的上行注入方案以本土布站和单链路单星直接注入为主

对于区域卫星导航系统,其服务对象主要以本土为主并兼顾周边,只需确保本土及周边地区可视范围内卫星的导航电文能及时更新,就可满足系统服务性能。因此,无论是从国际政治和系统安全进行考量,还是从对卫星覆盖能力、技术难度和投入经费等方面考虑,区域系统采取本土布站策略和单链路单星直接注入方式都是最经济、最有效的方案。

(2)全球系统的上行注入方案将向立足于星间

链路技术的方向发展

要实现全球服务,上行注入方案基本有三种选择,第一是借助本土大跨度疆域实现全网注入,但这样的国家或地区并不多;第二是在全球范围内选址建站,但要考量国际政治环境、局势控制能力、系统军民特性、安全措施、经费投入以及对卫星的可视情况等,受制约因素太多;第三就是采取与 GPS III 类似的基于星间链路转发的方案,实现注入站本土化,即可避免疆域较小的尴尬,也可消除过多制约因素,在系统安全控制、维修便捷性、经费投入、管理复杂度等方面均有很大优势,并且可明显简化备份策略,显著提高系统可靠性。目前,GPS III 已以该方案开

展建设, GLONASS 和 Galileo 也正在规划和开发星间链路^[6], 国内也有一批科技人员正在研究卫星导航系统的星间链路技术^[21-27], 建立星间链路系统势必已成为全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 发展趋势^[6]。因此, 立足于星间链路来设计和建设上行注入系统也必然会是一种发展趋势。

(3) 链路协同工作将成为提升上行注入抗干扰能力和任务可靠性的最佳方案

对于单链路注入的上行注入方案, 一旦星地上行链路被干扰, 目的卫星就无法获得导航电文。但在基于星间链路转发的上行注入方案下, 各注入天线与可视节点卫星间的上行链路可以协同工作, 当上行链路不畅通或因干扰中断后, 地面运控系统可控制注入天线或备份注入天线迅速指向其他可视节点卫星建立上行链路, 因为要同时干扰所有可视卫星是不可行的, 这正是 GPS III 阶段上行注入的强大优势。

(4) 提高注入频度降低数据龄期将成为进一步提高 PVT 服务精度的重要手段

对用户机而言, 其测量误差主要来源于系统解算和预测误差 (包括星历误差、星钟误差、电离层延时误差、对流层延时误差)、使用环境引入的多径误差、设备内部热噪声等, 如果通过改进用户机信号处理算法进一步降低多径和热噪声引入的误差, 就目前的技术水平来看, 已经是非常困难了。但是, GPS III 通过提高注入频度将数据龄期压缩到 5 ~ 15 min, 从而使 URE 从 1.1 m 降至 0.3 m, 授时精度从 30 ns 降至 1 ns^[4], 这是比在接收机方面做大量工作更为快捷有效的提高 PVT 精度的途径。因此, 以提高注入频度来降低数据龄期将会为上行注入系统的发展方向。

(5) 高速传输能力是支持高频度注入和完好性服务的必然需求

以遥控指令为例, 部分是抢救性指令, 都是即时性的, 必须立即注入到卫星并马上生效, 而对于导航电文, 要使数据龄期越短, 就要求注入频率越高, 尤其是完好性信息, 从观测到发播的时间要求极为严格, 如 Galileo 的完好性告警时间为 6 s, 区域完好性信息要求从地面任务段 (Ground Mission Segment, GMS) 接收开始的 1.2 s 内上注到目标卫星。为支持高频度注入和完好性服务, 上行链路必然要设计为

高速链路, 正如 GPS III 要将上行注入信息速率提高至 GPS II 的 100 倍。

5 结束语

上行注入系统是卫星导航系统的喉舌, 处于极其重要地位。各导航系统必将综合国际政治形势、国家经济实力、科学技术水平等多方面来设计上行注入方案, 并将随着卫星导航系统的发展而发生新的变化。综观全球各卫星导航系统, 定位和授时精度还在往更高方向发展, 星间链路技术必将在未来得到更广泛应用, 卫星故障也希望能得到更快速的在线诊断和恢复, 这些都要求上行注入系统具备快速高效的工作能力, 使其链路设计向高速、可靠、安全等方面发展, 体制设计也将由全球布站收缩至境内多点布站, 并借助星间链路实现全网、全弧段、全时段的上行注入。

参考文献:

- [1] Luba O, Boyd L, Gower A. GPS III Systems Operations Concepts[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(1): 10-18.
- [2] 金国平, 王茂磊, 范建军, 等. GPS 上行注入系统探析及思考[J]. 计算机与网络, 2012, 38(16): 48-51.
JIN Guoping, WANG Maolei, FAN Jianjun, et al. Analysis and Thought on GPS Uploading System[J]. Computer & Network, 2012, 38(16): 48-51. (in Chinese)
- [3] Journo S, Poumailloux J, Piéplu J M, et al. Producing the Galileo Services From the Ground Mission Segment (GMS)[C]//Proceedings of 2006 ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth, TX: IEEE, 2006: 504-519.
- [4] Dellago R, Pieplu J M, Stalford R. The Galileo System Architecture at the End of the Design Phase[C]//Proceedings of 2003 ION GPS/GNSS. Portland, OR: IEEE, 2003: 978-990.
- [5] Maine K, Anderson P, Bayuk F. Communication Architecture for GPS III[C]//Proceedings of 2004 IEEE Aerospace Conference Processings. Big Sky, MT: IEEE, 2004: 1532-1539.
- [6] 林益明, 何善宝, 郑晋军, 等. 全球导航星座星间链路技术发展建议[J]. 航天器工程, 2010, 19(6): 1-7.
LIN Yiming, HE Shanbao, ZHENG Jinjun, et al. Development Recommendation of Inter-satellites Links in GNSS[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(6): 1-7. (in Chinese)

- [7] 李作虎,席欢. 日本卫星导航系统发展与思考[J]. 卫星与网络,2013(10):68-73.
LI Zuohu, XI Huan. Development and Consideration of Japanese Satellite Navigation System[J]. Satellite & Network,2013(10):68-73. (in Chinese)
- [8] 金国平,闫小萍,王茂磊,等. Galileo 上行注入系统探析及思考[J]. 计算机与网络,2013,39(7):52-56.
JIN Guoping, YAN Xiaoping, WANG Maolei, et al. Analysis and Thought on Galileo Uploading System[J]. Computer & Network,2013,39(7):52-56. (in Chinese)
- [9] Kovach K, Dobyne J, Crews M, et al. GPS III Integrity Concept[C]//Proceedings of ION GNSS 21st International Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah, GA:ION,2008:2250-2257.
- [10] 陈忠贵. 现代卫星导航系统技术特点与发展趋势分析[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2009,39(4):686-695.
CHEN Zhonggui. Technological Characters and Trend of Modern Satellite Navigation System[J]. China Science E:Technology & Science, 2009, 39(4):686-695. (in Chinese)
- [11] 张明亮,金际航,李胜全,等. GLONASS 及现代化进展[C]//第二十一届海洋测绘综合性学术研讨会论文集. 成都:中国测绘学会,2009:165-167.
ZHANG Mingliang, JIN Jihang, LI Shengquan, et al. The Progress in GLONASS Modernization of Russia[C]//Proceedings of 21th Marine Surveying and Mapping Comprehensive Academic Seminar. Chengdu: Chinese Society for Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 2009:165-167. (in Chinese)
- [12] 陈念茹,唐云. GLONASS 加速现代化进程[J]. 卫星与网络,2012(9):70-74.
CHEN Nianru, TANG Yun. Modernization Acceleration of GLONASS[J]. Satellite & Network,2012(9):70-74. (in Chinese)
- [13] 闻新,刘宝忠. GLONASS 卫星导航系统的现状与未来[J]. 中国航天,2004(9):19-23.
WEN Xin, LIU Baozhong. Today and Future of GLONASS[J]. Aerospace China,2004(9):19-23. (in Chinese)
- [14] 廖宁华,张毅,黎宝琳,等. QZSS 导航系统的信号和服务性能[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(5):39-40,44.
LIAO Ninghua, ZHANG Yi, LI Baolin, et al. The Signal and Service Performance of the QZSS Navigation System[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013,36(5):39-40,44. (in Chinese)
- [15] 邵佳妮,冯伟,申俊飞. QZSS 系统及其信号设计[J]. 测绘科学,2009,34(增刊):225-227.
SHAO Jiani, FENG Wei, SHEN Junfei. QZSS and Signal Design[J]. Science of Surveying and Mapping,2009,34(Suppl.):225-227. (in Chinese)
- [16] 李晓梅. 印度区域卫星导航系统 IRNSS 特点分析(上)[J]. 卫星与网络,2013(7):60-65.
LI Xiaomei. Characteristics Analysis of IRNSS (Part 1)[J]. Satellite & Network,2013(7):60-65. (in Chinese)
- [17] 高为广,陈金平,王楠. 印度卫星导航系统最新进展[J]. 全球定位系统,2008(1):42-45.
GAO Weiguang, CHE Jinping, WANG Nan. The Progress of Indian Navigation Satellite System (Part 1)[J]. GNSS World of China,2008(1):42-45. (in Chinese)
- [18] 张春海,赵晓东,李洪涛. 印度卫星导航系统概述[J]. 电讯技术,2014,54(2):231-235.
ZHANG Chunhai, ZHAO Xiaodong, LI Hongtao. Overview of Indian Navigation System[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(2):231-235. (in Chinese)
- [19] 李晓梅. 印度区域卫星导航系统 IRNSS 特点分析(下)[J]. 卫星与网络,2013(8):52-58.
LI Xiaomei. Characteristics Analysis of IRNSS (Part 2)[J]. Satellite & Network,2013(8):52-58. (in Chinese)
- [20] 司耀锋. 印度积极推动导航卫星系统建设[J]. 国际太空,2010(3):13-17.
SI Yaofeng. Promoting of Indian Satellite Navigation System Actively[J]. Space International,2010(3):13-17. (in Chinese)
- [21] 孙娟. 导航星座星间链路设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
SUN Juan. Design and Research of Inter Satellite Links for Navigation Constellation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2011. (in Chinese)
- [22] 朱建锋,安建平,王爱华. 星间链路组网中链路层协议设计准则与实现[C]//第二届中国卫星导航学术年会论文集. 上海:中国卫星导航系统管理办公室,2011:1-5.
ZHU Jianfeng, An Jianping, WANG Aihua. Design Criteria and Implementation of Link Layer Protocol in Inter-satellite Link Networking[C]//Proceedings of the 2nd China Satellite Navigation Conference. Shanghai: China Satellite Navigation System Office,2011:1-5. (in Chinese)
- [23] 周建华,杨龙,徐波,等. 考虑波束限制的改进导航星座星间链路方案[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2011,41(5):575-580.
ZHOU JianHua, YANG Long, XU Bo, et al. An Improved Satellite Link Scheme with Beam Restriction for the Navigation Constellation[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica),2011,41(5):575-580. (in Chinese)
- [24] 何善宝,林益明,吴乐南,等. 星间链路新型信号体制设计[J]. 中国空间科学技术,2011(4):15-22.
HE Shanbao, LIN Yiming, WU Lenan, et al. Design of New Signal System for Inter-Satellite Links[J]. Chinese Space Science and Technology,2011(4):15-22.

(in Chinese)

- [25] 陈忠贵. 基于星间链路的导航卫星星座自主运行关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.
CHEN Zhonggui. Key Technologies of Autonomous Operation for Navigation Satellite Constellations Using Inter-satellite Tracking Data[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [26] 罗大成,刘岩,刘延飞,等. 星间链路技术的研究现状及发展趋势[J]. 电讯技术,2014,54(7):1016-1024.
LUO Dacheng, LIU Yan, LIU Yanfei, et al. Present Status and Development Trends of Inter-satellite Link[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54 (7): 1016 - 1024. (in Chinese)
- [27] 董飞鸿,吕晶,常江,等. 全球卫星导航系统星间链路层协议设计[J]. 电讯技术,2012,52(2):130-135.
DONG Feihong, LYU Jing, CHANG Jiang, et al. Link Layer Protocol Design of Global Navigation Satellite System[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(2): 130-135. (in Chinese)

作者简介:



金国平(1978—),男,浙江湖州人,2009年获博士学位,现为助理研究员,主要研究方向为卫星导航;

JIN Guoping was born in Huzhou, Zhejiang Province, in 1978. He received the Ph. D. degree in 2009. He is now an assistant researcher.

His research concerns satellite navigation.

Email:ssource@126.com

刘芹丽(1977—),女,湖南冷水江人,2001年获学士学位,现为助理工程师,主要研究方向为卫星导航;

LIU Qingli was born in Lengshuijiang, Hunan Province, in 1977. She received the B. S. degree in 2001. She is now an assistant engineer. Her research concerns satellite navigation.

桑怀胜(1970—),男,山东茌平人,2003年获博士学位,现为高级工程师,主要研究方向为卫星导航。

SANG Huaisheng was born in Chiping, Shandong Province, in 1970. He received the Ph. D. degree in 2003. He is now a senior engineer. His research concerns satellite navigation.