

# 导航电文设计与评估技术研究综述\*

黄智刚<sup>1</sup> 王陆潇<sup>1,2</sup> 梁宵<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京, 100191; 2. 重庆市环境保护信息中心, 重庆, 401147)

**摘要:** 卫星导航电文是卫星导航系统正常运行与性能保障的必备因素, 对电文的设计与评估是卫星导航系统设计与建设的关键环节。本文从卫星导航电文的数据内容、电文结构、播发方式等几个方面, 对目前不同的全球卫星导航系统的导航电文的发展历程、性能差异等进行了分析探讨, 指出了当前导航电文设计与评估存在的技术问题, 并对未来的相关技术和发展趋势进行了预测与展望。

**关键词:** 全球卫星导航系统(GNSS); 导航电文; 性能评估

**中图分类号:** TN99      **文献标志码:** A

## Review on GNSS Navigation Message Design and Evaluation

Huang Zhigang<sup>1</sup>, Wang Luxiao<sup>1,2</sup>, Liang Xiao<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100191, China;  
2. Chongqing City Environmental Protection and Information Center, Chongqing, 401147, China)

**Abstract:** Satellite navigation message is an indispensable element for satellite navigation system functioning normally and precisely. The design and evaluation of the message is critical for constructing a satellite navigation system. The development history and performance discrepancy regarding extant different GNSS are analyzed in message content, message structure, and message broadcast way. In addition, the technical problems of design and evaluation in current navigation message are proposed. Furthermore, the relevant technologies and trends are predicted and prospected.

**Key words:** global navigation satellite system(GNSS); navigation message; performance evaluation

## 引 言

国际上四大全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)的定位原理均是采用三球交会的几何原理来实现定位。接收机用户测量出观测点至可见星的距离, 利用距离交会法解算出观测点的位置。由于传播时间中包含有卫星时钟与接收机时钟不同步的误差、卫星广播星历误差、接收机测量噪声以及测距码在大气中传播的延迟误差等因素, 接收机求得的距离值是带有多种误差的伪距值。因此, 定位的关键问题在于对卫星即时位置的获取以及卫星到观测点的精准伪距测量。

导航电文作为卫星导航系统的信息载体, 其中包含了卫星位置(广播星历)、星钟(卫星时钟校正)、系统时、电离层延迟校正、对流层延迟校正等信息。卫星发射的测距信号与接收机的本地信号进行相关处理, 并利用导航电文中的信息进行卫星位置获取与测距误差修正, 就可以得到卫星与接收机之间的高

\* 收稿日期: 2015-05-10; 修订日期: 2015-07-08

精度伪距测量值。虽然导航系统的测距性能受码跟踪精度、载波跟踪精度、噪声干扰和多径和接收机技术等因素的影响,但导航电文中的信息内容会影响到星历误差、星钟误差、大气延迟校正误差等性能,进而影响测距精度,因此导航系统要达到最佳的定位性能必将受制于导航电文本身。同时,导航电文中星历和历书的播发速率和播发顺序等还会影响到接收机的首次定位时间。另外,导航电文还携带了卫星运行工作状态、完好性、兼容性等方面的诸多信息,这对于保障卫星导航的可靠性、完好性等性能必不可少。

卫星导航电文决定了导航系统在信息层面的根本性能。但导航电文的设计和播发也不可能是任意的,它会受制于信息容量、发播速率和误码率等因素的影响。因此,在给定的系统条件下,对不同信息内容、不同结构编排和不同播发方式的导航电文进行系统、全面的性能评估,是保证导航电文设计合理性、正确性和先进性的必要前提。中国新一代的北斗全球卫星导航系统目前正处于研制阶段,其导航电文还未完全确定,开展系统、全面的导航电文设计与评估工作迫在眉睫。

导航电文设计与评估虽然是导航系统建设初期的一项重要内容,但是却由系统设计者在建设初期就已制订(如 GPS 系统),并没有随着全球定位系统的发展而成为卫星导航领域研究的热点。国外导航电文设计与评估成果主要包括:各版本的用户接口控制文件(Interface control document, ICD)、GPS NAV 导航电文设计分析的文献和 2005 年后 Galileo 在轨卫星导航电文测试结果。GPS 用户接口控制文件的变化反映了随着系统功能需求的不同对导航电文逐步改进完善的过程。NAV 导航电文设计分析的文献将导航电文设计分为两步:模型选取和结构设计。模型选取需要权衡信息量、精度、更新频率、用户计算量、继承性和退化精度等设计要素。结构设计确定后,最终导航电文的形式仍需要根据导航电文结构和用户实际处理数据内容的流程来决定。Galileo, GLONASS 的用户接口控制文件的变化仅仅反映了官方逐步公开 ICD 的过程。其中, Galileo 星间和频间交叉发播的结构设计、GLONASS 广播星历的设计都与 GPS 明显不同。北斗一期导航电文参考了 GPS NAV 导航电文的数据内容和结构,同时考虑了广域增强的电文来实现较好性能。近几年,随着北斗全球卫星导航系统建设的推进,国内逐渐展开对导航电文的设计和评估工作,但其评估成果主要集中在对已有 GNSS 导航电文分析比较及导航电文结构定性评估上。目前导航电文的评估指标有:导航数据的时效性、一个数据单元所需发播的数据量和所需的数据传输率、导航电文结构的可扩充性和灵活性以及通信资源利用率等。可以看出,这些评估指标不能完整地反映导航电文对导航性能的影响,且可量化的评估指标较少。因此,如何评估导航电文数据内容和结构带来的综合影响,并利用研究成果指导北斗全球卫星导航系统的导航电文设计,还需要深入研究。本文从 GNSS 导航电文设计与评估的现状入手,对电文的现状、发展趋势和不足进行了一系列的分析。

## 1 GNSS 导航电文设计与评估现状

### 1.1 GNSS 导航电文发展变化历程

GPS 系统最早公开发布 ICD 始于 1997 年 10 月,这部 ICD 称为 IS-GPS-200<sup>[1]</sup>,其中的导航电文即为 GPS L1 频点的固定帧结构 NAV 导航电文,这是截至目前 GPS 系统最早实际发播的民用导航电文。直至 2003 年 11 月, GPS 发布了新的 ICD,即 IS-GPS-705<sup>[2]</sup>,其定义了 L5 频点的数据块结构的 CNAV (Civil navigation message) 导航电文。L5 频点信号主要用于支持民航应用。2004 年 12 月修订了 IS-GPS-200,修订后的 ICD 称为 IS-GPS-200D<sup>[3]</sup>,主要体现在新增的 L2C 信号(L2 频点的民用信号)。L2C 信号同样发播 CNAV 导航电文,但速率仅为 L5 频点导航电文速率的一半。2006 年 3 月再次发布了新的 ICD,称为 IS-GPS-800(草案)<sup>[4]</sup>,定义了 L1C 信号,其上发播 CNAV-2(Civil navigation message-2) 导航电文。GPS 各频点导航电文历经多次升级,目前 NAV 导航电文 ICD 已升级至 IS-GPS-200G, CNAV 导航电文 ICD 已升级至 IS-GPS-705C, CNAV-2 导航电文 ICD 已升级至 IS-GPS-800C。IS-GPS-200 导

航电文的演变一方面是扩展并完善了卫星的伪随机码号(Pseudo random noise, PRN)、群延迟和用户测距精度(User range accuracy, URA)等已有参数的定义和用户算法<sup>[5]</sup>,另一方面为了使L2频点导航电文与L5频点导航电文定义一致,而不断规范历书、数据类型发播间隔和增强信息的用户算法<sup>[6,7]</sup>。IS-GPS-705导航电文的改进主要集中在2011~2012年,主要是完善已有伪随机码号、群延迟和用户测距精度参数<sup>[8-10]</sup>。IS-GPS-800导航电文在2010年针对完好性标识的用法进行了修改<sup>[11]</sup>,随后的演变也集中在2011~2012年,主要是针对已有参数的定义和用户算法进行修改完善<sup>[12,13]</sup>。可见,GPS卫星发射后,对导航电文的修改基本停留在参数定义层面,而修改导航电文的结构只能靠增加新的频点和发射新的卫星来实现。

GPS在多年运行过程中,L1频点NAV导航电文在长时间内保持固定帧结构不变,数据内容仅为包括卫星广播星历、钟差、电离层、系统间时间偏差、历书、卫星健康标识和文本信息等内容<sup>[1]</sup>。2005年发射的GPS IIR-M卫星上开始发播L2频点数据块结构的民用CNAV导航电文<sup>[14]</sup>,从而接收机用户可通过双频信号校正电离层延迟,提高GPS民用服务的精度。CNAV采用更为紧凑、高效的信息类型分类的格式,支持定义64种信息类型,目前已定义14种<sup>[2]</sup>。在内容构成方面,采用了新的广播星历参数模型并增加了频间信号偏差、地球定向参数、简约历书和差分改正数等新内容。在2010年发射的Block IIF卫星上开始发播第3个频点L5上的CNAV导航电文,从而保证L2信号的连续性,使其能避免在美国和欧洲大功率监视雷达在L2载频附近带来的干扰。GPS计划在下一代卫星Block III中加入L1频点的新民用现代化信号发播CNAV-2导航电文<sup>[15,16]</sup>以大幅度提升性能。CNAV-2的主帧由3个长度不同的子帧构成,共持续18s<sup>[13]</sup>,在内容方面基本与CNAV的内容一致。

GLONASS系统公开发布其ICD始于1998年,它定义了GLONASS在L1/L2频点的导航信号上发播的导航电文,两个频点上的导航信号结构及导航电文均相同<sup>[17]</sup>,支持GLONASS双频接收机用户。2002年GLONASS ICD升级已至5.0版,2008年再次升级至5.1版<sup>[18]</sup>。GLONASS新的ICD版本没有本质上的更新,仅定义了新的卫星类型并逐步规范了ICD的内容。GLONASS L1,L2频点导航电文一直采用固定帧的导航电文格式,导航电文数据内容也与最初版本一致。GLONASS的导航电文与GPS的NAV电文基本类似,最明显的差异在于广播星历参数,在参数定义,即比特数、比例因子上均有差别。对于GLONASS-M卫星L3频点上信号的电文结构<sup>[19]</sup>,2013年莫斯科航空学院的Alexander Povalyaev教授提出了固定帧和数据块两种方案,并指出倾向于采用300 bit的数据块结构<sup>[20]</sup>。

2002年欧盟Galileo系统开始发布ICD,其导航信号在3个频段上发播,不同的频点对应不同的服务,相应服务的导航电文的传输速率设计也有所差异。导航电文类型有C/NAV商业服务导航电文、F/NAV基本导航电文和I/NAV完好性导航电文。目前仅有F/NAV和I/NAV导航电文的基本结构公开。与NAV相比,Galileo导航电文在继承NAV导航电文固定帧结构的同时,通过星间和频间交叉发播实现历书和完好性告警参数的高效发播。2006年5月,Galileo系统发布了称为GAL OS SIS ICD D.0(草案)的ICD文件,定义了Galileo E1-B和E5b信号上发播的I/NAV,Galileo E5a信号上发播的F/NAV电文格式<sup>[21-24]</sup>。2008年2月,又修订了上部ICD,称为GAL OS SIS ICD D.1(草案)<sup>[25]</sup>,主要体现在Galileo E1-B和E1-C信号采用CBOC信号结构(改进此前的BOC(1,1)信号设计)。2010年2月,Galileo正式公开发布ICD1.0版<sup>[26]</sup>,定义了I/NAV导航电文告警页格式,2010年9月ICD升级至1.1版<sup>[27]</sup>。Galileo系统ICD的更新过程实质上是导航电文内容逐步完善的过程。

北斗全球卫星导航系统分别在2012年和2013年12月公布了公开服务信号的接口控制文件1.0版<sup>[28]</sup>和2.0版。1.0版中仅定义了B1I的导航电文内容,该版本导航电文与GPS L1频点NAV导航电文采用同样的固定帧结构。2.0版中定义了北斗全球卫星导航系统空间星座和用户终端之间公开服务信号B1I和B2I的相关内容,并提到B2I信号将随着全球系统建设逐步被性能更优的信号取代。

## 1.2 GNSS 导航电文设计与评估技术

在国外已经公开发表的文献中,已有文献讨论了 GPS NAV 导航电文数据内容中广播星历、星钟参数的设计要素,更多文献着重讨论各系统公开的接收机用户接口控制文件,详细阐述信号结构、导航电文内容、参数表示以及接收机用户算法等,部分文献验证了 GPS 新体制的性能优势和 Galileo 系统在轨导航电文测试性能。在国内已公开发表的文献中,有的文献分析了导航电文中的信号体制和参数变化,还有的文献比较了 GNSS 导航电文数据内容和结构的差异,定性评价了导航电文的结构。

随着 GPS 现代化及 Galileo 系统建设的开展,未来的接收机用户可以获得更多的卫星载波信号,采用多个载波相位的最佳线性组合,能够降低各项误差,如电离层/对流层残留误差、卫星轨道误差,而且某些线性组合能够明显抑制载波相位测量的噪声,从而提高定位精度。不同载波信号上的导航电文数据内容和结构不尽相同,对线性组合方法的影响也不同。因此,基于已有 GNSS 导航电文开展性能评估方法及其相关研究,是今后导航电文设计 and 应用的一个重要方面。

### 1.2.1 导航电文设计

1993 年 GPS 官方公布 L1 频点的接口控制文件<sup>[1]</sup>,即 NAV 导航电文。它采用固定帧结构,数据内容包括:帧同步、遥测字、奇偶校验码、完好性状态标识、反欺骗标识、卫星反欺骗能力配置、子帧号、校验位、周内秒、周计数、L2 上 C/A 码/P 码启用标识、用户测距精度(URA)索引、卫星健康状态标识、估计差分群延迟、星钟数据发布号、星钟修正、星历数据发布号、星历、可用性指示、估计的测距偏差、高精度历书、UTC、跳秒以及电离层参数等。2003 年 GPS 官方公布了 L5 频点的接口控制文件<sup>[2]</sup>,即 CNAV 导航电文,采用灵活的数据块结构,并定义了其中的 14 种信息类型。数据内容新增信号间的群延迟、GPS 与其他 GNSS 系统的时间偏差、地球定向、星历星钟差分改正等参数。传统的广播星历 16 参数改为广播星历 18 参数,用户测距精度索引也进行细化,高精度历书被替换为中等精度历书和简约历书。2008 年 GPS 官方公布了 L1 频点民用信号的接口控制文件<sup>[4]</sup>,即 CNAV-2 导航电文,它采用混合帧结构,子帧 1 和子帧 2 的数据内容固定,子帧 3 为数据块结构,数据内容与 CNAV 导航电文的数据内容基本一致。

2006 年 Galileo 官方公布了用户接口控制文件,定义了公开服务的 F/NAV 导航电文结构及数据内容<sup>[25]</sup>,随后在 2008 年更新该用户接口控制文件,补充定义了完好性服务的 I/NAV 导航电文,2009 年开始逐步公开试验星上的导航电文性能。

### 1.2.2 导航电文评估

1978 年俄亥俄大学的 A. J. Van Dierendonck 教授定量分析了在数据速率、帧长、转接字和遥测字以及卫星内存空间等要素的影响下, GPS L1 频点导航电文的初步设计方案。该方案最终为 GPS NAV 导航电文采用<sup>[29]</sup>。2008 年文献<sup>[30]</sup>提出卫星导航电文结构的性能评估准则,开始定性和定量结合研究导航电文结构对性能的影响。

可以看出,国外导航电文设计技术的进展体现在空间信号的接口控制文件版本的更新中,对导航电文性能的评估研究较少,尚没有文献对导航电文的初期设计及性能评估进行研究。中国北斗全球卫星导航系统在设计初期,需要考虑与北斗一期导航电文的平滑过渡,且需考虑与其他 GNSS 系统的导航电文的兼容和互操作,因此急需对导航电文性能展开系统的、定量的评估,以指导中国北斗全球卫星导航系统导航电文的设计和应用。

## 1.3 广播星历参数设计和性能评估

GPS 广播星历 16 参数以其物理意义明确、外推精度高等优点直接被 Galileo 和北斗一期导航电文借鉴,然而目前 GPS 系统提出了采用广播星历 18 参数取代原有 16 参数。新的广播星历参数增加了较

多比特数,如果仍然采用原有导航电文结构,会导致比特空间不够的问题。因此,需要研究两种广播星历参数的性能评估方法,并设计出北斗混合星座下的广播星历参数。目前,国内学者对北斗广播星历参数的设计与评估开展了相应研究。

1989~2004年,文献[31-33]开始研究GPS广播星历参数拟合算法并分析GPS星历精度。2005年文献[34]提出采用8阶切比雪夫多项式的拟合系数作为北斗广播星历参数,该参数适用于各种类型卫星轨道。2006年,文献[35]仿真分析了中高轨卫星采用GPS广播星历16参数作为轨道参数时的星历拟合精度,并改进了北斗地球同步轨道卫星(Geostationary earth orbits, GEO)的广播星历参数拟合算法。2006~2007年,文献[36,37]比较分析GPS广播星历16和18参数的拟合算法及性能,并研究了GPS星历参数比例因子的设计方法<sup>[38]</sup>。2008年,文献[39]将GPS广播星历16参数应用于北斗混合星座,并提出对位置观测量进行合理的坐标系参考平面旋转的GEO卫星的星历拟合算法,使广播星历拟合误差可达厘米量级,而使用常规的拟合方法,混合星座中卫星的广播星历拟合误差最大在分米量级<sup>[40]</sup>。2010年,文献[41,42]提出一种改进的拟合算法解决GPS广播星历16参数应用于北斗GEO卫星时小倾角引起的拟合结果不稳定甚至不收敛的问题。但是,沿袭GPS广播星历16参数的接口范围定义会导致GEO卫星的轨道半径余弦、正弦校正参数(Crc, Crs)超出接口范围。2012年,文献[43]研究了广播星历参数注入频度对服务性能的影响分析。同年,文献[44]提出北斗可采用一套优化的广播星历参数来保证3cm内的位置误差,其中IGSO(Inclined geosynchronous earth orbit)/GEO和MEO(Medium earth orbit)采用基本的开普勒六参数和不同的调和改正数,但是并没有考虑广播星历参数的定义和北斗的平滑过渡问题。2014年,文献[45]提出了一套基于非奇异元素的适用于北斗GEO卫星的广播星历参数,最终拟合精度可保证在4cm以内。

综上所述,关于北斗全球卫星导航系统混合星座广播星历参数的设计评估,国内研究分成3个阶段。第1个阶段研究GPS, GLONASS广播星历算法差别及拟合算法实现问题<sup>[33-34,44-57]</sup>;第2个阶段研究GPS广播星历16参数应用于北斗混合星座时,GEO卫星的拟合精度提高问题<sup>[36-40,58]</sup>;第3个阶段研究采用特有的广播星历参数描述北斗混合星座轨道问题<sup>[41-45]</sup>。但是,以上研究均没有涉及到广播星历参数模型选择、用户算法设计和参数接口定义等的综合影响,没有从面向用户需求的角度进行广播星历、星钟参数的系统化设计,缺乏一种适合北斗全球卫星导航系统混合星座的广播星历、星钟参数的设计方法。

#### 1.4 历书参数设计和性能评估

GPS在L1频点的空间信号接口控制文件中包含了历书信息,随后在L5频点CNAV导航电文中,采用了新的中等精度和简约历书进行了替代。由于历书可以辅助信号捕获,所以在导航电文中占据大量比特空间。历书参数作为导航电文的主要数据内容之一,其发播方式、对信号捕获的贡献和不同历书的适用场合等成为了导航电文设计过程中的研究重点。国内外学者对历书的研究分为3大类:历书对精度和捕获性能的贡献、简约历书的性能以及卫星发播历书数据的方式。

2000年,芬兰学者提出可以使用历书参数来辅助捕获卫星信号,捕获时间可以缩短50%以上<sup>[59]</sup>。2003年,GPS官方公布的L5频点信号的接口控制文件中,中等精度和简约历书取代了NAV导航电文中的高精度历书。2006年,文献[60]对GPS新提出的简约历书算法和性能进行分析,指出简约历书带来的误差较高精度历书显著加大。2007年,文献[61]对GPS历书有效龄期对性能的影响进行了分析,提出在静止的接收机中预先输入历书参数,即可将冷启动时间缩短至25s以内。2008年,文献[62]研究了GPS历书参数拟合算法的实现问题。2009~2011年,慕尼黑工业大学的学者提出GPS每颗卫星不发播星座中全部卫星的历书,而只发播8颗卫星的历书,可将冷启动下的信号捕获时间减小至原捕获时间的1/2.6<sup>[63,64]</sup>。2013年,文献[65,66]开始研究高精度、中等精度和简约历书对信号捕获的定量影响,

并探讨了系统级 3 种历书的发播场景和用户端 3 种历书的应用方式,取得了一些有用的结论。

综上所述可以看出,在北斗全球定位系统导航电文的历书设计过程中,仍然需要深入研究 GPS 3 种历书参数的特点和性能差异,从而提出适合北斗全球卫星导航系统的历书参数模型和接口定义。

## 2 已有 GNSS 导航电文比较分析与发展趋势

现代化 GPS, Galileo 等 GNSS 系统对导航电文的服务、可扩充性和发播效率等方面进行了改进设计,下面对现代化 GNSS 导航电文进行符号速率、数据内容、编排结构、发播方式 4 个方面的比较分析,内容包括了 GPS, GLONASS, Galileo、北斗以及增强系统的多种电文,比较结果见表 1。

表 1 已有 GNSS 系统导航电文比较

Table 1 Comparison of existed GNSS navigation message

电文种类	符号速率 /sps	数据内容	编排结构	发播方式
GPS NAV	50	基本定位信息 <sup>①</sup> , UTC, 历书	固定帧结构: 基于子帧(页面)、主帧和超帧; 超帧 37 500 sps, 主帧为 1 500sps, 子帧 300sps	顺序发播: 按照子帧号/页面号发播
GPS CNAV	50(L2C) 100(L5)	基本定位信息, 星历星钟改正参数 (Clock& Ephemeris differential corrections, CDC&EDC), UTC, 系统时间偏移参数 (GPS/GNSS time offset, GGTO), 历书, 地球定向参数 (Earth oriented parameters, EOP), 文本信息	数据块结构: 基于信息类型; 数据块为 600 sps	顺序+随机发播: 最大间隔内随机发播
GPS CNAV-2	100	基本定位信息, CDC&EDC, UTC, GGTO, 历书, EOP, 文本信息	混合帧结构: 具有 3 个长度不同的子帧(页面); 主帧为 1 800 sps, 子帧 1 为 52 sps, 子帧 2 为 1 200 sps, 子帧 3 为 548 sps	顺序+随机发播: 前 2 个子帧按照固定顺序发播, 第 3 子帧根据系统需求随机发播
GLONASS	50	基本定位信息, 历书, 与 UTC/GPS 时间转换	固定帧结构: 基于串、帧和超帧的帧结构; 超帧为 750 sps, 帧 150 sps, 串 100 sps	顺序发播: 按照帧号/串号发播
Galileo F/NAV	50	基本定位信息, 与 UTC/GPS 时间转换, 历书, GGTO, 完好性	固定帧结构: 基于页面、子帧和主帧; 主帧 30 000 sps, 子帧 2 500 sps, 页面为 500 sps	顺序+星间交叉发播: 历书按照卫星号交叉发播
Galileo I/NAV	250	基本定位信息, 与 UTC/GPS 时间转换, GGTO, 历书, 完好性, 搜救服务数据 <sup>②</sup>	固定帧结构: 基于页面、子帧和主帧; 主帧 90 000 sps, 子帧 3 750 sps, 页面为 250 sps	顺序+频间交叉发播: 频间奇偶页面交叉发播
北斗 D1	50	基本定位信息, 与其他卫导系统时间转换, 历书	固定帧结构: 基于子帧、主帧和超帧; 超帧为 36 000 sps, 主帧为 1 500 sps, 子帧为 300 sps	顺序发播: 按照子帧号/主帧号顺序发播

续表 1  
Table 1 Continued

电文种类	符号速率 /sps	数据内容	编排结构	发播方式
北斗 D2	1 000	基本定位信息,与其他卫导系统时间转换,历书,北斗系统完好性及差分信息,格网点电离层信息	固定帧结构:基于页面、子帧和超帧 超帧为 180 000 sps,主帧为 1 500 sps,子帧为 300 sps	顺序发播:以页面为单位,按照页面号、子帧号在每颗卫星上顺序发播
增强系统(WAAS, EGNOS 等)	500	快变、慢变改正数,完好性,位置等信息	数据块结构:基于信息类型; 数据块为 500 sps	随机发播:最大发播间隔内随机发播

注:①基本定位信息包括广播星历、系统时、星钟、测距精度指示、电离层、健康信息等;②搜救服务数据只在 E1-B 信号上的 I/NAV 导航电文上发播。

## 2.1 数据内容

导航电文内容包括基本定位信息和辅助信息,早期导航电文的辅助信息仅包括 UTC(Coordinated universal time)以及历书等参数。现代 GNSS 导航电文改善了基本定位信息并增加了部分辅助信息,主要体现在:

(1) 改进广播星历参数模型。广播星历 18 参数模型延续了开普勒轨道参数外加摄动系数确定卫星位置的基本原理,但是改进了原有广播星历 16 参数中的轨道半长轴、轨道平均角速率和升交点赤经变化率的描述方法<sup>[68]</sup>。同时,提高部分参数的比特数,以更精确地描述卫星运动。

(2) 增加地球定向参数。建立地心地固(Earth-centered earth-fixed, ECEF)坐标系下的卫星天线相位中心位置与向地心惯性(Earth centered inertial, ECI)坐标系之间的转换。

(3) 增加系统间时间偏差参数。支持多系统兼容与互操作。

(4) 增加钟差和星历改正参数。提供更高精度的钟偏、频偏、开普勒轨道根数改正数等。

(5) 增加两种新的历书数据。采用中等精度历书和简化历书取代原有的高精度历书。

(6) 改进测距精度指示参数。分区间描述非径向测距精度( $URA_{\text{NED}}$ )、径向测距精度模型( $URA_{\text{ED}}$ ,  $URA_{\text{ED1}}$ ,  $URA_{\text{ED2}}$ )参数,将  $URA_{\text{NED}}$  和  $URA_{\text{ED}}$  在  $[0, 2.4]$  m 的区间细分为 16 个区间,并增加用户差分测距精度指示及其变化率参数。

(7) 增加文本信息类型。支持发播控制指令及其他信息等。

数据内容的改进主要是为了满足现代化卫星导航技术的发展对精度、完好性、系统服务性能、兼容与互操作性等的需求。

## 2.2 编排结构

在现代导航电文编排结构方面也做出了重大改进。

(1) 早期的导航电文均采用固定帧结构。子帧(页面、串)、帧和超帧与系统时严格对应,便于用户接收使用数据。鉴于固定帧结构存在空白数据段占用通信资源的问题, GPS CNAV 采用数据块格式。按照不同类型的发播内容组成了 14 种<sup>[2]</sup>数据块,每个数据块为 300 bit。系统功能扩展可通过定义新的数据块类型来实现,具有很好的灵活性<sup>[67,68]</sup>。

(2) 在固定帧和数据块编排结构的基础上, CNAV-2 采用优化的混合帧结构。3 个长度不同的子帧组成数据帧。子帧 1 发播时间间隔信息;子帧 2 发播广播星历、星钟信息;子帧 3 为随机发播的辅助信息。这种固定帧和数据块结合的编排方式,同时具备了二者的优势,满足了数据内容的可扩充性和发播的灵活性。

### 2.3 发播方式

导航电文的发播涉及每颗卫星上导航电文的绝对发播顺序和星间、频间导航电文的相对发播顺序两个方面。

(1) 单颗卫星导航电文的绝对发播顺序:混合帧结构为代表的现代化导航电文结构固定各子帧的发播顺序,随机进行子帧 3 页面的发播。既能保证基本定位信息的固定发播周期,又能满足其他信息的可变发播周期。

(2) 星间和频间导航电文的相对发播顺序:通常导航电文在不同卫星、频点上发播的时间起点相同,当导航电文数据内容相同时用户接收机存在数据冗余问题。GalileoF/NAV, I/NAV 导航电文分别采用星间和频间交叉发播的方式进行了优化。

星间交叉发播将每颗卫星并行发播相同历书,改进为多组卫星并行发播不同历书,从而减少用户端冗余数据、缩短接收一组历书的时间<sup>[27,69]</sup>。频间交叉发播主要体现在 E5b 频点播奇数页时 E1-B 频点播偶数页, E5b 频点播偶数页时 E1-B 频点播奇数页。同时, E5b-I 顺序发播 1-36 号卫星的历书;而 E1-B 先发播 19-36 号卫星的历书,后发播 1-18 号卫星的历书。这使双频用户能够在 1s 内就可收到一次完好性告警信息,并且在半个帧内收齐一组星座的历书数据。可见,星间和频间导航电文内容的交叉发播能灵活满足数据内容的时效性需求,对温启动下信号捕获、完好性等性能提升有重要意义。

### 2.4 GNSS 导航电文的发展特点与趋势

通过比较分析 GPS, GLONASS, Galileo、北斗和增强系统等导航电文的特点,可得到现代化 GNSS 导航电文的发展过程具有以下特点与趋势。

(1) 系统时、广播星历、星钟、历书是导航电文数据内容的主要部分,随着导航系统的进一步发展,数据类型逐渐丰富,已经或将会包含完好性、差分改正等其他服务的数据内容。

(2) 固定帧结构是导航电文结构的主流,即使是灵活的 CNAV 和 CNAV-2 也是在相对固定的框架下,实现部分内容的灵活发播。

(3) GNSS 系统民用导航服务,将采用多频点信号设计,能校正电离层延迟,便于快速解算载波的整周模糊度,增强系统健壮性以及满足不同接收机用户需求。

(4) 导航电文的星间和频间交叉发播是未来的一种趋势,可以有效提高发播效率,缩短定位时间。

总之,丰富的数据内容、可扩充的编排结构、多频点多星交叉、灵活的发播方式将是现代化导航电文的发展趋势。

## 3 GNSS 导航电文设计与评估研究的不足

GNSS 导航电文设计与评估工作一直以来都未受到广泛关注,当前已有的研究成果仅主要限于各种 ICD 文件。针对 GNSS 导航电文数据内容、结构设计、评估方法和已有导航电文优化等方面的研究,作者认为还存在以下一些不足。

(1) 已有 GNSS 导航电文的数据内容、导航电文结构差别较大,不同导航电文关注的服务性能、可扩充性、应用范围、服务效率等也不尽相同,尚无公开文献研究导航电文设计依据、评估方法、合理性和最优性等问题。为了在系统建设初期尚无实际卫星信号支撑的条件下对导航电文的相关性能评估,需要对导航电文性能的综合评估方法展开研究。

(2) 已有 GNSS 导航电文中的广播星历参数都是对 MEO 卫星进行设计,而北斗全球卫星导航系统的星座是由 GEO, IGSO 和 MEO 卫星共同构成的混合星座,研究混合星座下广播星历参数的设计对北斗系统有重要的现实意义。

(3) GPS 现代化导航电文中,中等精度历书和简约历书取代了 NAV 导航电文中高精度历书,目前



得到了广泛应用,但是对3种历书的设计依据、性能评估标准、使用场合均缺乏研究。同时,Galileo和北斗一期的历书参数与GPS高精度历书参数的设计基本相同,因此,有必要对历书的作用进行定量评估,以满足对已有GNSS导航电文深入、全面评估的需求,同时也可用于指导北斗导航电文中历书参数的设计。

(4) GPS的建设过程中逐渐增加导航信号和导航电文,在每一个频点的用户接口控制文件形成过程中,仅考虑了该频点导航电文的数据内容和结构需求,较少综合考虑各频点信号之间的发播方式。而Galileo系统在设计初期已规划好各频点信号的用途,并对不同频点不同用途的导航电文,以及卫星间和频点间导航电文的发播方式进行了设计,从而达到较优的导航性能。同样,对北斗全球导航系统,也需要深入分析各频点需求,探索导航电文数据和结构的优化发播方案。

(5) 缺乏有针对性的导航电文性能综合验证软件和仿真测试平台,难以对导航电文性能进行深入、全面的试验测试。国外GPS和GLONASS系统没有公开进行导航电文的试验评估工作。Galileo系统以试验星的实际数据验证分析了导航电文的性能,而理论、仿真方面的研究相对不足。导航电文属于系统顶层的组成要素,需要在没有实际系统支持的条件下进行导航电文的设计、评估和迭代优化改进。通常的卫星导航模拟器往往着眼于对接收机系统性能的测试,忽略了对系统导航电文的正确性、合理性与可行性等方面的测试与验证能力。研制导航电文设计与评估综合验证软件和仿真测试平台,对北斗全球卫星导航系统导航电文的设计和应用有重要的现实意义。

## 4 结束语

本文以GNSS导航电文设计与评估技术为出发点,讨论了GNSS导航电文的发展历程、技术现状、星历和历书的设计评估,从数据内容、编排结构、发播方式等方面比较分析了现有GNSS导航电文的差异,给出了电文设计未来发展的特点和趋势,指出了导航电文在评估方法和测试验证方面的不足。中国北斗全球卫星导航系统在设计初期,需要考虑与北斗一期导航电文的平滑过渡,且需考虑与其他GNSS系统的导航电文的兼容和互操作,因此急需对导航电文性能展开系统的、定量的评估,以指导中国北斗全球卫星导航系统导航电文的设计和应用。关于北斗全球卫星导航系统混合星座广播星历参数的设计评估没有涉及到广播星历参数模型选择、用户算法设计和参数接口定义等的综合影响,没有从面向用户需求的角度进行广播星历、星钟参数的系统化设计,缺乏一种适合北斗全球卫星导航系统混合星座的广播星历、星钟参数的设计方法。同时北斗全球定位系统导航电文的历书设计过程中,仍然需要深入研究GPS3种历书参数的特点和性能差异,从而提出适合北斗全球卫星导航系统的历书参数模型和接口定义。导航电文设计的好坏,直接关系到导航系统的总体服务性能和接收机用户的定位性能,会影响到中国北斗导航系统的未来竞争力与推广应用,希望本文的工作能够对中国卫星导航技术与系统的发展提供借鉴与帮助。

## 参考文献:

- [1] The Navstar GPS Wing. ICD-GPS-200, Navstar GPS space segment/Navigation user interfaces [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision C, 1993.
- [2] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-705, Navstar GPS space segment/User segment L5 interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), 2003.
- [3] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-200, Navstar GPS space segment/Navigation user interfaces [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision D, 2004.
- [4] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-800, Navstar GPS space segment/user segment L1C interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), 2008.
- [5] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-200, Navstar GPS space segment/Navigation user interfaces [S]. Space and Missile Sys-

tems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision E, 2010.

- [6] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-200, Navstar GPS space segment/Navigation user interfaces [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision F, 2011.
- [7] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-200, Navstar GPS space segment/Navigation user interfaces [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision G, 2012.
- [8] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-705, Navstar GPS space segment/user segment L5 Interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision A, 2010.
- [9] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-705, Navstar GPS space segment/User segment L5 interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision B, 2011.
- [10] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-705, Navstar GPS space segment/User segment L5 interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision C, 2012.
- [11] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-800, Navstar GPS space segment/User segment L1C interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision A, 2010.
- [12] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-800, Navstar GPS space segment/User segment L1C interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision B, 2011.
- [13] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-800, Navstar GPS space segment/User segment L1C interface [S]. Space and Missile Systems Center (SMC)/Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP), Revision C, 2012.
- [14] 陈大香. 卫星导航产业的现状及发展趋势[J]. 测绘信息与工程, 2012, 37(3): 40-43.  
Chen Daxiang. Present status and development trend of satellite navigation industry[J]. Journal of Geomatics, 2012, 37(3): 40-43.
- [15] Navigation center. GPS constellation status [EB/OL]. [http://www.navcen.uscg.gov/Do=constellation Status,2014-04-01](http://www.navcen.uscg.gov/Do=constellation+Status,2014-04-01).
- [16] 刘春保. 美国 GPS 现代化的进展与未来发展[J]. 国际太空, 2007, (5): 13-16.  
Liu Chunbao. The progress and future development of GPS modernization in the United States [J]. Space International, 2007, (5): 13-16.
- [17] Russian Institute of Space Device Engineering. GLONASS interface control document[EB/OL]. <http://gauss.gge.unb.ca/GLONASS.ICD-98.pdf,1998-5-1>.
- [18] Russian Institute of Space Device Engineering. Global navigation satellite system GLONASS interface control document (Version 5.1) [R]. Russian Institute of Space Device Engineering, 2008.
- [19] 张献州,熊永良. GLONASS 的现状与发展[J]. 四川测绘, 1999, 22(3): 106-109.  
Zhang Xianzhou, Xiong Yongliang. The current status of GLONASS and its development[J]. Surveying and Mapping of Sichuan, 1999, 22(3): 106-109.
- [20] GPS world staff. New structure for GLONASS NAV message [EB/OL]. <http://gpsworld.com/new-structure-for-ghlonass-nav-message,2013>.
- [21] Falcone M, Lugert M, Malik M, et al. GIOVE-A in orbit testing results[C]//Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2006). Tex, USA: [s. n.], 2001: 1535-1546.
- [22] Simsky A, Mertens D, Sleewaegen J M, et al. Experimental results for the multipath performance of Galileo signals transmitted by GIOVE-A satellite[J]. International Journal of Navigation and Observation, 2008: 13.
- [23] Steigenberger P, Hugentobler U, Montenbruck O, et al. Precise orbit determination of GIOVE-B based on the CONGO network[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(6): 357-365.
- [24] Simsky A, Mertens D, Sleewaegen J M, et al. Multipath and tracking performance of Galileo ranging signals transmitted by GIOVE-B[C]//ION GNSS Conference. Savannah, Georgia, USA: [s. n.], 2008: 16-19.
- [25] Navigation. Latest news [EB/OL]. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation,2015](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation,2015).
- [26] European Commission. European GNSS (Galileo) open service signal in space interface control document (OS SIS ICD) issue 1[EB/OL]. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/galileo/files/galileo\\_os\\_sis\\_icd\\_revised\\_2\\_en.pdf,2010](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/galileo/files/galileo_os_sis_icd_revised_2_en.pdf,2010).
- [27] European Space Agency/Galileo Joint Undertaking. Galileo open service signal in space interface control document (OS SIS ICD) [R]. European Space Agency/Galileo Joint Undertaking, 2010.
- [28] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗全球卫星导航系统空间信号接口控制文件: 公共服务信号 B1I(1.0)[EB/OL]. <http://www.北斗.gov.cn/attach/2012/12/27/2012122755318f7eabbe451aa6d052f829f92e50.pdf,2012>.  
China Satellite Navigation Office. Beidou navigation satellite system signal in space interface control document[EB/OL]. <http://www.北斗.gov.cn/attach/2012/12/27/2012122755318f7eabbe451aa6d052f829f92e50.pdf,2012>.

- [29] Van Dierendonck A J, Russel S S, and Kopitzke E R, et al. The GPS navigation message [J]. *Journal of Navigation*, 1978, 25(2):147-165.
- [30] 陈南. 卫星导航系统导航电文结构的性能评估[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2008, 33(5):512-515.  
Chen Nan. Performance evaluation of the structure of GNSS navigation message[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(5):512-515.
- [31] 郝金明. 利用地面测轨资料拟合 GPS 广播星历[D]. 郑州:解放军测绘学院, 1989.  
Hao Jinming. The fitting of GPS ephemeris with tracking data[D]. *Journal of the PLA institute of Surveying and Mapping*, 1989.
- [32] 帅平, 陈定昌, 江涌. GPS 广播星历误差及其对导航定位精度的影响[J]. *数据采集与处理*, 2004, 19(1):107-110.  
Shua Ping, Chen Dingchang, Jiang Yong. Errors of GPS broadcast ephemerides and their effects on navigation and positioning accuracy[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*. 2004, 19(1):107-110.
- [33] 崔先强, 焦文海, 贾小林, 等. GPS 广播星历参数拟合算法[J]. *测绘学院学报*, 2004, 21(4):244-246.  
Cui Xianqiang, Jiao Wenhai, Jia Xiaolin. The fitting algorithm of GPS broadcast ephemeris parameters[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2004, 21(4):244-246.
- [34] 朱俊, 文援兰, 廖琰. 一类适用于各种轨道类型的导航卫星广播星历研究[J]. *航天控制*, 2005, 23(6):9-11, 21.  
Zhu Jun, Wen Yuanlan, Liao Ying. Research on the broadcast ephemeris adapted to all kinds of orbits[J]. *Aerospace Control*, 2005, 23(6):9-11, 21.
- [35] 黄勇, 胡小工, 王小亚, 等. 中高轨卫星广播星历精度分析[J]. *天文学进展*, 2006, 24(1):81-88.  
Huang Yong, Hu Xiaogong, Wang Xiaoya. Precision analysis of broadcast ephemeris for medium and high orbit satellites[J]. *Progress in Astronomy*, 2006, 24(1):81-88.
- [36] 崔先强, 焦文海, 贾小林, 等. 两种 GPS 广播星历参数算法的比较[J]. *空间科学学报*, 2006, 26(5):382-387.  
Cui Xianqiang, Jiao Wenhai, Jia Xiaolin. Comparisons of two kinds of GPS broadcast ephemeris parameter algorithms[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, 26(5):382-387.
- [37] 吴显兵. GPS 星历精度分析[J]. *军事测绘*, 2005(2):24-26.  
Wu Xianbing. The precision analysis of GPS ephemeris[J]. *Military Surveying and Mapping*, 2005(2):24-26.
- [38] 崔先强, 陈南, 贾小林. GPS 星历参数比例因子的确定研究[J]. *全球定位系统*, 2007, 32(2):1-3, 24.  
Cui Xianqiang, Chen Nan, Jia Xiaolin. Determination of the scale factors of GPS ephemeris parameters[J]. *GNSS World of China*, 2007, 32(2):1-3, 24.
- [39] 高玉东, 郝晓宁, 王威. GEO 导航星广播星历拟合改进算法设计[J]. *国防科技大学学报*, 2007, 29(5):18-22.  
Gao Yudong, Xi Xiaoning, Wang Wei. An improved fitting algorithm design of broadcast ephemeris for GEO satellite[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(5):18-22.
- [40] 席博, 王威, 郝晓宁. 混合星座导航卫星广播星历相关问题研究[J]. *中国空间科学技术*, 2008, 28(4):7-12.  
Xi Bo, Wang Wei, Hao Xiaoning. Study on the problem of broadcast ephemeris for hybrid-constellation navigation satellite [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2008, 28(4):7-12.
- [41] 陈刘成, 胡小工, 常志巧, 等. 高轨导航卫星星历设计[J]. *中国科学:物理学力学天文学*, 2010, 40(5):608-615.  
Chen Liucheng, Hu Xiaogong, Chang Zhiqiao, et al. The broadcast ephemeris parameters design of high orbit navigation satellite[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, 40(5):608-615.
- [42] 陈刘成, 李静, 马瑞, 等. 工程化广播星历参数拟合算法与接口问题[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2011, 36(1):18-23.  
Chen Liucheng, Li Jing, Ma Rui, et al. The engineering design for broadcast ephemeris parameters fitting arithmetic and their interfaces[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(1):18-23.
- [43] 胡彩波, 赵金贤, 李莘. 提高导航电文注入及更新频度对系统服务性能影响分析[C]//第三届中国卫星导航学术年会电子文集. 广州:[s. n.], 2012.  
Hu Caibo, Zhao Jinxian, Li Xin. The influence analyse of improve the frequency of data injecting and update to the service performance of system[C]//The Third China Satellite Navigation Academic Annual Meeting. Guangzhou:[s. n.], 2012.
- [44] Fu X F, Wu M P. Optimal design of broadcast ephemeris parameters for a navigation satellite system [J]. *GPS Solution*, 2012, 16(4):439-448.
- [45] Du L, Zhang Z K, Zhang J, et al. An 18-element GEO broadcast ephemeris based on non-singular elements [J]. *GPS Solution*, 2015, 19(1):49-59.
- [46] 胡松杰. GPS 和 GLONASS 广播星历参数分析及算法[J]. *飞行器测控学报*, 2005, 24(3):37-42.  
Hu Songjie. The analysis and arithmetic of GPS and GLONASS broadcast ephemeris parameters[J]. *Journal of Measurement and Control of Aircraft*, 2005, 24(3):37-42.

- [47] 贾小林, 吴显兵, 崔先强. GLONASS 广播星历的精密拟合[J]. 测绘科学与工程, 2005, 25(1): 34-36.  
Jia Xiaolin, Wu Xianbing, Cui Xianqiang. The precision fitting of GLONASS broadcast ephemeris[J]. *Surveying and Mapping Science and Engineering*, 2005, 25(1): 34-36.
- [48] 崔先强, 焦文海, 秦显平. GPS 广播星历参数拟合算法的探讨[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 25-26, 48.  
Cui Xianqiang, Jiao Wenhai, Qin Xianping. Discussion on the fitting of GPS broadcast ephemeris parameters[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(1): 25-26, 48.
- [49] 崔先强, 唐颖哲, 姬剑锋, 等. 用基于 Givens 变换的 QR 分解计算类 GPS 广播星历参数[J]. 测绘工程, 2006, 15(4): 5-8.  
Cui Xianqiang, Tang Yingzhe, Ji Jianfeng, et al. Solving similar GPS broadcast ephemeris parameters using Givens transformation[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2006, 15(4): 5-8.
- [50] 陈刘成, 贾小林, 莫中秋. 用切比雪夫曲线拟合导航卫星广播星历[J]. 天文学进展, 2006, 24(2): 167-173.  
Chen Liucheng, Jia Xiaolin, Mo Zhongqiu. Fitting the broadcast ephemeris of navigation satellites by Chebyshev approximation[J]. *Progress in Astronomy*, 2006, 24(2): 167-173.
- [51] 陈刘成, 韩春好, 唐波. GLONASS 卫星位置的动力学改进算法[J]. 测绘科学, 2007, 32(4): 8-9, 31, 192.  
Chen Liucheng, Han Chunhao, Tang Bo. The improved ephemeris calculation of GLONASS with recovered dynamic orbit[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(4): 8-9, 31, 192.
- [52] 陈刘成, 唐波. 参考系选择对 Kepler 广播星历参数拟合精度的影响[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(4): 19-25.  
Chen Liucheng, Tang Bo. The effect of choosing coordinate to the precision fitting of Kepler broadcast ephemeris[J]. *Journal of Measurement and Control of Aircraft*, 2006, 25(4): 19-25.
- [53] 陈刘成, 韩春好, 陈金平. 广播星历参数拟合算法研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 12-14, 192.  
Chen Liucheng, Han Chunhao, Chen Jinping. The research of satellites broadcast ephemeris parameters fitting arithmetic[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(3): 12-14, 192.
- [54] 马开锋, 张冰. 基于星历拟合的 GPS 广播星历参数评估[J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 30(6): 86-88.  
Ma Kaifeng, Zhang Bing. Evaluation analysis on GPS broadcast ephemeris parameters based on the ephemeris fitting[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2009, 30(6): 86-88.
- [55] 刘光明, 廖瑛, 文媛兰, 等. 导航卫星广播星历参数拟合算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(3): 100-104.  
Liu Guangming, Liao Ying, Wen Yuanlan. Research on the fitting algorithm of broadcast ephemeris parameters[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(3): 100-104.
- [56] 吕志伟, 易维勇, 曾志林. GPS 广播星历参数拟合算法及其分析[J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(2): 83-85.  
Lv Zhiwei, Yi Weiyong, Zeng Zhiling. Analysis of GPS satellite ephemeris parameters fitting algorithm[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2010, 27(2): 83-85.
- [57] 崔先强. 参数加权的 Givens 变换算法及其在导航卫星广播星历拟合中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3): 147-150, 159.  
Cui Xianqiang. Givens transformation with weighted parameter and its application in navigation satellite broadcast ephemeris fitting[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(3): 147-150, 159.
- [58] 崔先强, 杨元喜, 吴显兵. 轨道面旋转角对 GEO 卫星广播星历参数拟合的影响[J]. 宇航学报, 2012, 33(5): 590-596.  
Cui Xianqiang, Yang Yuanxi, Wu Xianbing. Influence of the orbital plane rotation angle on GEO satellite broadcast ephemeris parameter fitting[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(5): 590-596.
- [59] Pietilä S, Syrjärinne J. Improved method for satellite acquisition [C]// Institute of Navigation Global Positioning System 2000. Utah: Institute of Navigation, 2000: 1957-1961.
- [60] 陈南, 陈大恒, 贾小林. GPS 新民用导航电文简约历书的算法和性能分析[J]. 测绘工程, 2006, 15(6): 63-66.  
Chen Nan, Chen Daheng, Jia Xiaolin. The algorithm and performance analysis of the reduced almanac of GPS civil navigation message[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2006, 15(6): 63-66.
- [61] 王梦丽, 陈华明, 王飞雪. GPS 历书数据的有效龄期[J]. 遥测遥控, 2007, 28(3): 31-35.  
Wang Mengli, Chen Huaming, Wang Feixue. Effective age of GPS almanac data[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2007, 28(3): 31-35.
- [62] 莫中秋, 陈刘成, 董恩强, 等. 导航卫星历书拟合初值的选取与误差分析[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(2): 104-107.  
Mo Zhongqiu, Chen Liucheng, Dong Enqiang. Improvement on initial values selection and errors analysis of almanac fitting of navigation satellites[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(2): 104-107.
- [63] Henkel P, Guenther C. Method for transmitting satellite data [P]. United States Patent Application Publication, US 2009/0195451 A1.
- [64] Henkel P. Reduction and optimization of almanac transmission for GNSS satellites [C]// 53rd International Symposium EL-

MAR-2011. Zadar, Croatia:[s. n.],2011,:329-332.

- [65] 王陆潇,黄智刚,赵昀.多类型历书对首次定位性能的影响研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2013,38(2):140-143.  
Wang Luxiao, Huang Zhigang, Zhao Yun. Two sets of GPS almanac on time-to-first-fix influence[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2):140-143.
- [66] Wang L X, Huang Z G, Zhao Y. Impact of GPS almanac broadcast strategy on the signal acquisition time [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2013,20(5):6-13.
- [67] 雷雄俊,刘光斌,张博. GPS CNAV 电文构成与应用分析[J]. 通信技术,2010(8):202-204.  
Lei Xiongjun, Liu Guangbin, Zhang Bo. Analysis of GPS CNAV message constitution and application[J]. Communications Technology, 2010(8):202-204.
- [68] 张冰. GPS L2C 信号仿真和分析研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.  
Zhang Bing. Research on simulation and analysis of GPS L2C signal[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [69] 陈金平,王梦丽,钱曙光. 现代化 GNSS 导航电文设计分析[J]. 电子与信息学报,2011,33(1):211-217.  
Chen Jinping, Wang Mengli, Qian Shuguang. Analysis of modernization GNSS navigation message's designing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011,33(1):211-217.

#### 作者简介:



**黄智刚**(1962-),男,教授,研究方向:卫星导航增强、高精度定位导航、卫星导航的仿真与验证、高速高精度信号采集与处理等, E-mail: baahzg@163.com。



**王陆潇**(1984-),女,博士研究生,研究方向:卫星导航电文的设计与评估。



**梁霄**(1991-),女,博士研究生,研究方向:卫星导航电文的设计、评估和卫星导航的定位定姿技术。

