

现代化 GNSS 导航电文设计分析

陈金平 王梦丽* 钱曙光

(北京环球信息应用开发中心 北京 100094)

摘 要: 导航电文是导航卫星信号的重要组成部分, 其设计优劣将直接影响系统的时效性、完整性、灵活性、可靠性、可扩展性等服务性能以及用户使用成本。该文分析比较了各种导航电文的设计以及现代化 GNSS(全球导航卫星系统)导航电文在数据内容、编码性能、编排结构以及播发方式等方面的改进措施。结果表明, 这些改进措施使系统服务性能得到进一步改善且更便于用户使用。借鉴现代化 GNSS 导航电文在纠错码、校验码以及交织码相结合的多重差错控制方案, 帧结构与数据块结构相结合的电文编排方式, 星间、频间电文交叉播发方式等方面的设计, 提出了我国 COMPASS 系统导航电文基本设计思路。

关键词: 导航电文; 符号速率; 编码; 电文结构

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0211-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00584

Analysis of Modernization GNSS Navigation Message's Designing

Chen Jin-ping Wang Meng-li Qian Shu-guang

(Beijing Global Information Center of Application and Exploitation, Beijing 100094, China)

Abstract: Navigation message is an important component of satellite signal. Its design will not only influence the system's performances including timeliness, integrality, flexibility, reliability, extendibility, etc., but also user's use-cost. The design of various navigation messages is analyzed and compared, especially in aspects of data content, coding performance, layout structure and broadcast style of modernization Global Navigation Satellite System (GNSS). It is indicated that the improvements in the design of navigation message will bring improvement of system performance and make the user easy to use. The navigation message design scheme of China COMPASS system is put forward by consulting the message design schemes of modernization GNSS, which are: multi-coding scheme basing error correcting code, checking code and interleaving code; message layout structure of frame and data block together; intercrossed broadcasting style between or among satellites and frequencies.

Key words: Navigation message; Symbol rate; Coding; Message structure

1 引言

导航卫星信号一般由 3 部分组成: 载波信号、伪随机噪声码(测距码)和数据码。其中, 数据码是卫星以二进制码流形式发送给用户的导航定位数据, 通常称为导航电文。GPS, GLONASS 等早期建成的卫星导航系统, 导航电文一般采用帧结构的编排格式并按照子帧或页面顺序播发导航电文^[1,2], 数据内容主要包括卫星星历、卫星钟差、电离层延迟改正参数、历书数据以及时间同步参数等。针对早期的导航电文设计在数据实效性、数据传输率和可靠性、通信资源利用率、可扩充性等方面存在的缺陷, 并结合现代化 GNSS 在兼容与互操作等方面

的发展需求, 现代化 GPS 中新增的民用信号以及建设中的 Galileo 等系统的导航电文设计在多个方面进行了一系列的改进, 并发布了新的接口规范^[1-6]。近年来, 针对导航电文的研究主要包括以下几个方面: GNSS 导航电文性能及设计要素分析^[7-13], GPS 导航电文应用及新增民用信号导航电文分析^[14-30], Galileo 开放服务信号导航电文设计情况及应用^[31-40], 另外还有针对 GLONASS、QZSS 等增强系统以及特殊应用等的导航电文设计分析^[41-51]。

本文在对各种导航电文设计进行分析的基础上, 着重对现代化 GNSS 导航电文在数据内容、差错控制编码、编排结构以及播发方式等方面的改进设计进行分析和比较, 并对我国 COMPASS 系统导航电文提出设计建议。

2010-06-04 收到, 2010-11-02 改回

国家 863 计划项目(2009AA12Z328)资助课题

*通信作者: 王梦丽 compass2020@126.com

2 各种导航电文的设计

目前,世界上已经建成或正在建设中的全球卫星导航系统主要有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 以及我国的 COMPASS 等,另外还有 WAAS 等广域增强系统。不同系统的导航电文设计均有所不同,表 1 给出了不同卫星导航系统已知或已确定导航电文的基本设计方案^[1-6,46]。其中, GPS 系统的民用导航电文包括早期 L1 频点 C/A 码导航电文(也称为 NAV 电文)、现代化 GPS 在 L5 频点和 L2 频点 CM 码播发的导航电文(也称为 CNAV 电文)以及现代化 GPS 在 L1 频点 C 码播发的导航电文(也称为 CNAV-2 电文)^[1,3,4]; Galileo 系统的导航电文包括 E5a 信号播发的 F/NAV 电文以及 E5b 和 E1-B 信号提供的 I/NAV 电文, E6-B 信号提供商业服务的 C/NAV 电文具体内容尚未公开^[5],文献[6]专门给出了 Galileo Glove-A 的电文格式。从表 1 可以看到,各种导航电文的设计思想基本一致,但在数据内容、编码方案、数据结构以及播发方式等方面的设计存在一定

差异。导致这种差异的原因除了系统体制差异外,还存在导航电文的合理性和最优性设计问题。

3 导航电文改进设计分析

现代化 GPS, Galileo 等针对数据传输率、通信资源利用率、电文播发的可扩充性和灵活性等方面,对导航电文做了改进设计,这些改进必将使系统在服务性能、可扩展性、应用范围、服务效率等方面得到进一步改善。以下对现代化 GNSS 导航电文在数据内容、编码性能、编排结构以及播发方式等 4 个方面的改进设计进行详细分析。

3.1 数据内容的改进

导航电文内容通常包括基本导航信息, UTC 参数以及历书数据等,其中,基本导航信息包括时间信息(周计数和周内秒)、星钟参数、星历数据、电离层参数、健康信息以及测距精度指示等。在现代化 GPS 导航电文 CNAV, CNAV-2 中,增加了部分数据内容或对已有的数据内容进行了改善,主要体现在以下几方面:

表 1 各种导航电文的设计

导航电文	符号速率	数据内容	信道编码	数据结构	播发顺序
GPSNAV	50 sps	基本导航信息*, UTC 参数, 历书	扩展汉明码 (32, 26)	基于子帧(页面)、主帧和超帧的帧结构, 每个子帧为 300 symbol	以子帧为单位, 按照子帧号和页面号在每颗卫星上顺序播发
GPSCNAV	50 sps(L2C) 100 sps(L5)	基本导航信息, UTC 参数, 历书, EOP, CDC & EDC, GGTO, 文本信息	CRC 码+卷积码 (600, 300)	基于信息类型的数据块结构, 每个数据块为 600 symbol	以数据块为单位, 在规定的最长播发间隔内或根据用户需求随机播发
GPSCNAV-2	100 sps	基本导航信息, UTC 参数, 历书, EOP, CDC&EDC, GGTO, 文本信息	BCH 码(51, 8), CRC 码+LDPC 码+交织码(46×38)	基于 3 个长度不同的子帧组成的数据帧, 每帧数据为 1800 symbol	以数据帧为单位按照固定的周期播发, 子帧 3 的不同页面根据用户需求随机播发
GPSWAAS	500 sps	快变改正数, 完好性信息, GEO 位置信息, 电离层格网改正数等	CRC 码+卷积码 (500, 250)	基于信息类型的数据块结构, 每个数据块为 500 symbol	以数据块为单位, 在规定的最长播发间隔内播发
GLONASS	50 sps	卫星的轨道根数, 卫星工作状态参数, 时间系统参数, 历书	汉明码(84,76)	基于串、帧和超帧的帧结构, 每个串为 115 symbol	以串为单位, 按照串号和帧号在每颗卫星上顺序播发
GalileoF/NAV	50 sps	基本导航信息, GST 与 UTC/GPS 时间转换参数, 历书	CRC 码+卷积码(488, 244)+交织码(61×8)	基于页面、子帧和帧的帧结构, 每个页面为 500symbol	通过将不同卫星在同一历元播发的子帧数交叉, 使不同卫星的历书数据在不同卫星上交叉播发
GalileoI/NAV	250 sps	基本导航信息, GST 与 UTC/GPS 时间转换参数, 历书, SAR 数据**	CRC 码+卷积码(240, 120)+交织码(30×8)	基于页面、子帧和帧的帧结构, 每个页面为 500 symbol	E5b-I 和 E1-B 采用同样的页面规划, 频间奇偶页面交叉播发

注: *基本导航信息包括时间信息、星钟参数、星历、电离层参数、健康信息等。

**搜救服务(SAR)数据只在 E1-B 信号提供的 I/NAV 电文上播发。

(1)增加地球定向参数(EOP), 包括参考时刻 X, Y 方向的极移值和极移率以及 UT1 与 UTC 间的转换参数, 用于建立地心地固(ECEF)坐标系向地心惯性(ECI)坐标系的转换。通过导航电文播发 EOP 参数便于用户将利用星历数据计算的 ECEF 坐标系下的卫星天线相位中心(APC)位置转换为 ECI 坐标系下的 APC 位置^[18]。

(2)增加 GPS/GNSS 时间偏移参数(GGTO), 包括 GPS 系统与 Galileo, GLONASS 以及其它全球导航卫星系统间的时间偏移参数。多系统兼容与互操作将比单一系统提供更好的服务能力, 是现代化 GNSS 系统的发展趋势, 其中 GNSS 系统时的统一是实现兼容与互操作的内容之一。通过导航电文播发 GGTO 参数便于用户端实现不同 GNSS 系统时的转换。

(3)增加星钟和星历改正参数(CDC & EDC), 包括星钟钟差及其变化率的改正数、开普勒轨道根数改正数、用户差分测距精度 UDRA 及其变化率。CDC&EDC 可以使普通用户获得更高精度的星历和星钟参数, 从而提高导航定位精度。

(4)提高星历的精度, 包括将半长轴、平均角速度、轨道倾角等表示为参考时刻的变化值和变化率以及增加摄动参数的数据长度等, 星历数据精度的提高使用户能更精确的描述卫星运动。

(5)改进历书数据, 区分为中等精度历书(midi almanac)和简化历书(reduced almanac)两种。根据用户需求对中等精度历书数据内容与 NAV 电文的 10 个历书参数一致, 但各参数长度压缩了 1-8 bit, 使精度有所下降。简化历书包括半长轴变化量、参考时刻轨道升交点赤经、参考时刻升交角距以及健康信息 4 个参数。简化历书比中等精度历书的播发周期更短, 这样可以缩短启动状态或其它特殊场景用户对历书数据的收集时间, 更好地满足不同用户的需求^[29]。

(6)改进测距精度(URA)指示参数, 将过去的星历和星钟等效测距精度(URA)分为星历测距精度(URAOe)和星钟测距精度(URAOc), 并将 URAOc 以二阶项的形式给出。

(7)增加文本信息类型, 根据需要可以播发控制指令以及 ASCII 参数等。

以上数据内容的改进, 主要是基于扩大系统的应用范围、提高系统性能、便于用户使用等方面的考虑, 同时也考虑到了满足兼容与互操作等现代化卫星导航系统的需求。另外, Galileo 系统导航电文数据与 GPS 基本一致, 能够满足与 GPS 的互操作。

3.2 编码性能的提高

卫星导航系统通常采用前向纠错(FEC)方式对导航电文在信道传输中的随机错误和突发错误进行控制。GPS, GLONASS 等早期的导航电文编码常采用汉明码, BCH 码等线性分组码^[1,2]。近年来随着计算机和通信技术的发展, 现代化卫星导航系统导航电文的编码逐渐过渡到卷积码, LDPC 码等, 同时增加了对抗突发错误的 CRC 码, 交织码等^[3-5]。表 2 对几种常见的导航电文差错控制编码方案及其性能特点进行了比较^[22,52]。

从表 2 中可以看到, 导航电文中用于控制随机错误的码, 从以汉明码和 BCH 码为代表的分组码, 发展到卷积码和 LDPC 码, 编译码性能逐渐提高, 但实现复杂度也相对提高, 这也适应了目前微处理器的计算能力和系统对导航电文传输效率和可靠性不断提高的要求。而 CNAV-2 电文中采用的是多重差错控制方式, 先对电文进行 CRC 编码, 然后对各子帧、各页面单独进行 LDPC 编码, 最后将编码后的子帧或页面进行交织。这种方式能有效控制导航电文传输中的随机错误和突发错误, 是一种值得借鉴的编码方案。

3.3 编排结构的改进

早期的导航电文均采用基于子帧(页面、串)、

表 2 各种导航电文中常用差错控制编码方案的比较

编码方案	应用实例	特点
汉明码	NAV 电文 GLONASS 电文	汉明码属于线性分组码, 编译码时必须把整个信息码组存储起来, 码元数越多延时越大, 编译码均易实现。能纠正有限的随机错误, 抗突发错误能力差。
CRC 码+卷积码	CNAV 电文 WAAS 电文	CRC 校验码能够检测突发的连续错误序列; 卷积码编码设计存在记忆性, 编码性能和译码延时优于线性分组码, 但编码效率低。CRC 码与卷积码的组合能够检测突发错误, 纠正随机错误, 但不能纠正突发错误, 编码效率较低。
CRC 码+卷积码+交织码	F/NAV 电文 I/NAV 电文	在 CRC 校验码和卷积码的基础上增加交织编码, 使突发错误最大限度离散为随机错误, 提高抗突发错误的能力。CRC 码、卷积码与交织码的组合能够检测和抵抗突发错误, 纠正随机错误, 但编码效率较低。
CRC 码+ LDPC 码+交织码	CNAV-2 电文	LDPC 码基于奇偶校验矩阵的线性分组码, 具有非常接近香农理论极限的纠错能力, 编码增益高、纠错能力强, 性能优于卷积码, 但编译码实现较复杂。CRC 码、LDPC 码与交织码的组合能够检测和抵抗突发错误, 纠正随机错误, 但编译码实现较复杂。

帧和超帧或与此类似的帧结构。由子帧、帧、超帧构成的导航电文固定编排格式使数据内容在电文中位置固定,而每个字、子帧、帧、超帧与系统时严格对应,用户可根据时间信息正确解析接收到的电文数据,这有利于用户接收和使用数据。而为了给系统升级改进留有余地,需要在导航电文中保留一定的空白数据段。空白数据段在固定的帧格式中播发,要占用一定的通信资源。

鉴于导航电文帧结构编排格式存在的问题,在现代化 GPS 的 CNAV 电文中,对电文编排结构进

行了改进,摒弃了以前基于子帧、帧和超帧的固定格式,采用如图 1 所示的基于信息类型的数据块格式^[1,3]。CNAV 电文按照播发内容构成不同类型的数据块,每个数据块长度为 300 bit。CNAV 一共可以定义 64 种不同类型的数据块,目前已定义 14 种,留有很大扩展余地。一旦在系统功能扩展需要增添新的数据类型时,可以通过定义一个新的数据块类型来解决。与帧结构电文格式相比,数据块结构编排的导航电文在系统功能扩展和增强方面具有很好的灵活性^[9,23,26]。



图 1 CNAV 电文数据块结构示意图

在帧结构和数据块结构编排格式的基础上,CNAV-2 对电文编排结构作了进一步优化。如图 2 所示,CNAV-2 电文以数据帧为基本格式,每个数据帧由 3 个长度不同的子帧组成,分别用来发播时间间隔信息(TOI),固定周期播发的信息和随机播发的信息^[4,28]。这种基于帧结构与数据块结构相结合的编排方式,同时具备了帧结构和数据块结构编排的优势,满足数据内容扩充的灵活性和播发的随机性。

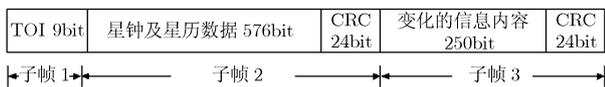


图 2 CNAV-2 电文结构示意图

3.4 播发方式的改进

导航电文的播发涉及两个方面的问题,一是每颗卫星上导航电文播发顺序的设计,这与导航电文的编排结构有很大关系;二是星间和频间导航电文相对播发顺序的设计。

(1)导航电文的播发顺序 帧结构编排的导航电文一般是以子帧为单位,按照子帧号、页面号顺序播发。前面已经指出,帧结构编排的数据播发方式使数据播发周期和顺序固定,便于用户的处理。但重复播发预留的空白数据段势必造成通信资源的浪费并使有用信息的播发周期延长。

数据块结构编排的导航电文以数据块为单位在各种信息类型规定的最长播发间隔内播发;同时可根据用户需求随机播发相关数据块,而预留数据块不需要播发。可见,数据块结构灵活的编排方式也

带来了灵活的播发方式。

帧结构和数据块结构相结合的编排格式,综合了两种电文结构下播发方式的优势,一方面固定子帧播发顺序,另一方面允许不同页面的播发顺序随机。这既能确保时间信息、星钟和星历数据等重要参数的播发周期固定,又满足了随机播发信息的要求。

(2)星间和频间导航电文的相对播发顺序 通常,导航电文在每颗卫星、每个频点上的播发是基于相同时间起点进行的,即在不考虑接收端处理顺序和时延的前提下,同一时间用户收到的来自不同卫星或不同频点的导航电文类型是一致的,当数据内容相同时(如历书数据)将存在冗余。针对这个问题,Galileo 系统 F/NAV 和 I/NAV 电文采用交叉播发的方式对星间和频间电文相对播发顺序进行了优化^[5,34,37]。

以 F/NAV 电文为例,一帧电文包括 12 个子帧,每个子帧完成 1.5 颗卫星历书的播发,在每颗卫星上利用 2 帧电文经 20 min 完成 36 颗卫星历书的播发。为了便于用户在更短的时间内收齐历书数据,F/NAV 电文将历书在不同卫星上的播发顺序与 GST 时进行了协调。假设起始历元为 t_0 , $t=t_0+\Delta t$ 时刻播发的子帧号(sub-frame ID)与卫星号(SVID)的对应关系为: sub-frame ID=(SVID+ $\Delta t/50$)模 12。这种星间导航电文的交叉播发方式将历书数据从多颗卫星上对相同历书内容的并行播发改进为从多颗卫星上对不同历书内容的并行播发,这将使用户端减少冗余数据、缩短用户收齐所有历书数据的时间。在此基础上,还可以考虑将相同区域内可见

星间的电文交叉播发的可行性。

I/NAV 电文在 E5b 和 E1-B 信号上播发, 两个频点采用同样的电文结构规划: 每帧由 24 个子帧组成, 每个子帧包括 15 个页面, 每个页面播发时间为 2 s, 其中页面 1-6 播发基本导航信息和 GST 与 UTC/GPS 时间转换参数, 页面 7-10 播发历书数据。I/NAV 电文采用频间交叉的播发方式。一方面, 对于每个子帧 1-6 页面的基本导航信息和时间转换参数, 在 E5b 频点上先播奇数页, 再播偶数页; 而在 E1-B 频点上则先播偶数页, 再播奇数页。这种奇偶页面交叉播发的方式使双频用户收齐基本导航信息的时间比单频用户减少一半。另一方面, 对于历书数据, E5b-I 的 1-24 子帧顺序播发 1-36 号卫星的历书数据; 而 E1-B 的 1-12 子帧播发 19-36 号卫星的历书数据, 13-24 子帧播发 1-18 号卫星的历书数据。这使双频用户在半个帧电文的播发时间内 (6 min) 收齐所有卫星的历书数据, 比单频用户节约一半时间。

可见, 采用星间、频间导航电文内容交叉播发的方式, 将在不增加系统建设成本的前提下有效提高导航电文的时效性, 在接收机启动状态下的快速卫星预报和信号捕获、减少首次定位时间等方面有重要意义。

4 结论和建议

我国 COMPASS 全球卫星导航系统作为现代化 GNSS 的一员, 为了适应系统体制变化、满足各类用户对系统性能和功能需求的提高以及与世界现代化 GNSS 兼容与互操作的需求等, 在研制建设中也将面临导航电文的设计和改进行问题^[43-45]。

COMPASS 系统导航电文的设计应综合借鉴 CNAV, CNAV-2, F/NAV 以及 I/NAV 等电文的先进设计经验并结合系统体制和特点, 充分考虑现代化卫星导航系统的发展趋势以及用户对系统需求的不断提高, 以提高系统服务性能、降低用户使用成本为出发点。针对不同的服务类型, 从精度、时效性、可靠性、完整性和可扩展性上, 对导航电文的数据速率、数据内容、差错控制编码、数据编排结构以及电文播发方式等方面进行精心、优化设计, 并尽量满足与其它 GNSS 系统的兼容与互操作需求。具体设计建议如下:

(1) 数据速率设计: 在满足各类信息播发周期需求的条件下尽量降低数据速率, 提高信号捕获和抗干扰性能。结合信号体制设计, 在充分论证各类信息的数据量和播发频度需求的基础上, 分析分通道播发更新周期较慢的数据 (如基本导航信息、历书数据等) 和更新周期较快的数据 (如差分信息、完好性

信息等) 的可行性和必要性, 考虑基于不同的需求设计不同信道的数据速率。

(2) 数据内容设计: 从扩大系统应用范围、提高系统性能、满足兼容与互操作需求、便于用户使用等方面, 进一步完善、精细化信息内容, 提高星历数据、星钟改正数等核心导航参数精度; 增加 EOP 参数, 便于相关用户完成 ECEF 与 ECI 坐标系的转换; 增加与 GPS, Galileo, GLONASS 等 GNSS 系统的时间偏移参数, 星历等参数设置以及用户端算法尽量与 GPS 等系统一致, 便于与这些 GNSS 系统的互操作; 结合系统差分体制设计, 考虑增加面向全球用户播发的星钟和星历改正参数 (CDC & EDC); 充分论证用户对历书精度的需求, 分析降低历书精度节约通信资源的必要性和可行性。另外, 通过充分调研各类用户需求, 分析其它需要在导航电文中补充的数据内容。

(3) 差错控制编码设计: 根据系统体制及用户需求, 从编码效率、编码增益、编译码复杂度以及译码延时等方面, 对 BCH 码, 卷积码, Turbo 码, LDPC 码等前向纠错码进行深入分析和比较。结合系统体制和信号特点, 充分论证信道编码性能需求与实现能力间的约束关系。初步考虑采用编码性能更好的卷积码或 LDPC 码作为纠错码; 考虑采用纠错码、校验码以及交织码相结合的多重差错控制方案, 以有效控制电文传输中的随机错误和突发错误, 提高电文传输的可靠性和有效性。另外, 还可以考虑针对不同的服务类型需求, 分别设计编码方案。

(4) 编排结构设计: 根据导航电文播发内容及系统特点, 考虑采用数据块结构或帧结构与数据块结构相结合的编排方案, 在做到电文编排紧凑的同时, 尽量保留电文结构的可扩充性, 以满足系统升级、随机播发电文以及提高通信资源利用率等方面的需求。数据块结构的编排格式可以考虑基于星历数据、钟差和 EOP 数据、历书数据、UTC 参数等信息分类; 帧结构与数据块结构相结合的编排方式可以考虑基本导航信息固定周期播发, 其它数据根据需求随机播发。还可以考虑根据不同的信道资源, 构造不同的编排结构, 具体采用哪种编排方式, 需要结合不同的服务类型分析论证。

(5) 电文播发方式设计: 一方面, 结合导航电文编排方案和系统实际需求, 设计每颗卫星上导航电文的基本播发方式。另一方面, 考虑通过星间、频间电文内容交叉播发进一步提高数据的时效性。在此基础上, 还可以考虑相同服务区域内可见卫星间的导航电文内容交叉播发的可行性和有效性。

参考文献

- [1] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-200, Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces [S]. Revision D, 2006.
- [2] Russian Space Agency Glonass Interface Control Document [S]. Ver 5.0, 2002.
- [3] The Navstar GPS Wing. ICD-GPS-705, Navstar GPS Space Segment / User Segment L5 Interfaces [S]. Revision 2, 2005.
- [4] The Navstar GPS Wing. IS-GPS-800, Navstar GPS Spaces Segment / User Segment L1C Interfaces [S]. Initial Release, 2008.
- [5] Galileo Project Office. European GNSS (Galileo) Open Service Signal in Space Interface Control Document [S]. Issue.1, 2010.
- [6] Galileo Project Office. Glove-A Navigation Signal-In-Space Interface Control Document [S]. First Issue, 2007.
- [7] Paul K. Next Generation Satellite Navigation Systems [M]. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2007: 9-17.
- [8] Muls A. Navigation signals in space. Http: // www. vrind. Be/ nl /docs /workshop080410/ KMS_vri2008slides. pdf, 2010, 6.
- [9] Misra P and Enge P. Global positioning system signals, measurements, and performance [M]. Second Edition, America: Ganga-Jamuna Press, 2006: 58-60.
- [10] Jose-Angel A R, Wallner S, and Hein G W, *et al.* A vision on new frequencies, signals and concepts for future GNSS systems [C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Texas, USA, Sept. 25-28, 2007: 517-534.
- [11] 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.
- [12] 陈南. 卫星导航系统导航信号与导航电文设计中的时间要素[J]. 测绘科学与工程, 2006, 26(2): 4-7.
Chen Nan. The time factor in design of navigation signal and navigation message of GNSS [J]. *Geomatic Science and Engineering*, 2006, 26(2): 4-7.
- [13] Bonhoure B, Vanschoenbeek I, and Boschetti M, *et al.* GPS-Galileo urban interoperability performance with the GPS-Galileo time offset [C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Georgia, USA, Sept. 16-19, 2008: 971-981.
- [14] De Agostino M, Piras M, and Porporato C. The new L2C GPS code: signal and positioning quality analysis[C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Georgia, USA, Sept. 16-19, 2008: 1649-1657.
- [15] Beyerle G, Ramatschi M, and Galas R, *et al.* A data archive of GPS navigation messages [J]. *GPS Solution*, 2009, 13(1): 35-41.
- [16] Cheng Xijun, Xu Jiangning, and Cao Kejin, *et al.* An authenticity verification scheme based on hidden messages for current civilian GPS signals [C]. International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, Seoul, Korea, 2009: 345-352.
- [17] Cheng Xijun, Cao Kejin, and Xu Jiangning, *et al.* Analysis on the feasibility of denial of service of GPS receivers based on hidden messages[C]. International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, Seoul, Korea, 2009: 363-368.
- [18] Abusali P A M, Tapley B D, and Schutz B E. Autonomous navigation of global positioning system satellites using cross-link measurements [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, 21(2): 321-327.
- [19] Mongrédien C. GPS L5 software receiver development for high-accuracy applications [D]. [Ph.D.dissertation]. University of Calgary, 2008.
- [20] Betz J W, Blanco M A, and Cahn C R, *et al.* Description of the L1C signal [C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Texas, USA, Sept. 26-29, 2006: 2080-2091.
- [21] Dafesh P A, Vallés E L, and Hsu J, *et al.* Data message performance for the future L1C GPS signal [C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Texas, USA, Sept. 25-28, 2007: 2519-2528.
- [22] 李志成, 刘基余. GPS L5 导航电文的编码仿真研究[J]. 导航, 2005, 41(3): 50-54.
Li Zhi-cheng and Liu Ji-yu. Encoding simulation of GPS L5 data structure [J]. *Navigation*, 2005, 41(3): 50-54.
- [23] 邱致和, 任志久. GPS L5 的信号设计与电文结构[J]. 导航, 2004, 40(3): 21-40.
Qiu Zhi-he and Ren Zhi-jiu. GPS L5 signal design and navigation message structure [J]. *Navigation*, 2004, 40(3): 21-40.
- [24] Kaplan E D and Hegarty C J. Understanding GPS principles and applications [M]. American, Artech House, 2006: 113-150.
- [25] 高玉平. GPS 导航电文中时间参数的变化特点[J]. 陕西天文台台刊, 2000, 23(2): 136-142.
Gao Yu-ping. The characteristics of time parameters in GPS navigation message [J]. *The Publication of Shanxi Astronomical Observatory*, 2000, 23(2): 136-142.
- [26] 陈南, 贾小林, 崔先强. GPS 民用导航电文 CNAV 的特点[J]. 全球定位系统, 2006, 31(1): 1-6.
Chen Nan, Jia Xiao-lin, and Cui Xian-qiang. Some features of the GPS civil navigation message [J]. *GNSS World of China*, 2006, 31(1): 1-6.
- [27] 陈小忠, 吴海涛, 卢晓春等. GPS 民用信号的改进与发展[J]. 全球定位系统, 2006, 31(5): 26-31.
Chen Xiao-zhong, Wu Hai-tao, and Lu Xiao-chun, *et al.* The improvement and development of GPS civil signal [J]. *GNSS World of China*, 2006, 31(5): 26-31.
- [28] Qaisar S U, Wu J, and Dempster A. Loud and clear: receiving the new GPS L2C and Galileo signals. http://www. gmat.

- unsw.edu.au/snap/new/pdf/NewSignalsFev07.pdf. 2007.5.
- [29] 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(76): 63-66.
Chen Nan, Chen Da-heng, and Jia Xiao-lin. The algorithm and performance analysis of the reduced almanac of GPS civil navigation message [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2006, 15(76): 63-66.
- [30] Jonkman N and De Jong K. Integrity monitoring of IGEX-98 data-part III: broadcast navigation message validation [J]. *GPS Solutions*, 2000, 4(2): 45-53.
- [31] Veit O, Hans L T, and Krueger J, *et al.* Galileo system design & performance[C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Texas, USA, Sept. 26-29, 2006: 492-503.
- [32] 陈南, 杨力, 丁群. Galileo 开放服务导航电文特点分析[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(5): 329-335.
Chen Nan, Yang Li, and Ding Qun. Some features of Galileo OS SIS ICD navigation message [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(5): 229-335.
- [33] 高书亮, 杨东凯, 洪晟. Galileo 系统导航电文介绍[J]. 全球定位系统, 2007, 32(4): 21-25.
Gao Shu-liang, Yang Dong-kai, and Hong Sheng. Navigation message of Galileo system [J]. *GNSS Word of China*, 2007, 32(4): 21-25.
- [34] Piriz R, Fernández V, and Cueto M, *et al.* Towards a Galileo navigation message[C]. European Navigation Conference, Switzerland, May 29-June 1, 2007: 456-467.
- [35] Brown A. Quick look at Galileo ICD[J]. *GPS World*, 2006, 1: 6-7.
- [36] 汤莉, 黄伟志. 伽利略系统的频率结构与信号设计的研究[J]. 空间电子技术, 2005, 2(2): 10-14.
Tang Li and Huang Wei-zhi. The study of the Galileo frequency structure and signal design [J]. *Space Electronic Technology*, 2005, 2(2): 10-14.
- [37] Tossaint M, Binda S, and Hahn J, *et al.* Galileo validation: the navigation message. http://findarticles.com/p/articles/mi_m0BPW/is_2_19/ai_n24353299/. 2010.6.
- [38] Tossaint M, Binda S, and Hahn J, *et al.* Galileo initial validation step: GLOVE navigation message. <http://www.Giove.esa.int/images/userpage/GPCNavmsg.pdf>. 2010. 6.
- [39] Coen A and Roberts M. Realizing the Galileo service centre at IOV-A design and implementation overviews[C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Georgia, USA, Sept. 16-19, 2008: 2574-2582.
- [40] Jose-Angel Avila-Rodriguea, Wallner S, and Won Jong-Hoon, *et al.* Study on a Galileo signal and service plan for C-band[C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Georgia, USA, Sept. 16-19, 2008: 2515-2529.
- [41] 李建文, 李军正. GLONASS 导航电文介绍[J]. 全球定位系统, 2003, 28(3): 31-36.
Li Jian-wen and Li Jun-zheng. Navigation message of GLONASS [J]. *GNSS World of China*, 2003, 28(3): 31-36.
- [42] 李建文, 郝金明, 张建军等. GLONASS 卫星导航系统的导航电文[J]. 测绘学院学报, 2001, 18(增刊): 4-7.
Li Jian-wen, Hao Jin-ming, and Zhang Jian-jun, *et al.* Navigation message of GLONASS [J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2001, 18(Suppl.): 4-7.
- [43] Grelier T, Ghion A, and Dantepal J, *et al.* Compass signal structure and first measurements [C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Texas, USA, Sept. 25-28, 2007: 3015-3024.
- [44] 高玉东, 郝晓宁, 王威. 我国导航星广播星历参数算法研究进展[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(4): 79-84.
Gao Yu-dong, Xi Xiao-ning, and Wang Wei. Progress of navigation satellite broadcast ephemeris algorithms in China [J]. *Journal of Spacecraft EE & C Technology*, 2008, 27(4): 79-84.
- [45] 卢晓春, 吴海涛, 边玉敬等. 中国区域定位系统信号体制[J]. 中国科学 G 辑, 2008, 38(12): 1634-1647.
Lu Xiao-chun, Wu Hai-tao, Bian Yu-jing, *et al.* Signal of China area positioning system[J]. *Science in China (Part G)*, 2008, 38(12): 1634-1647.
- [46] RTCA Program Management Committee. Department of transportation federal aviation administration specification. Wide Area Augmentation System (WAAS) [S]. Revision B, Change 1, 1999.
- [47] Japan Aerospace Exploration Agency. Quasi-Zenith satellite system navigation service interface specification for QZSS (IS-QZSS) [S]. Draft V1.2, March, 2010.
- [48] Rho H and Langley R B. Evaluation of the new WAAS L5 signal [C]. ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division, Georgia, USA, Sept. 16-19, 2008: 1667-1678.
- [49] 符强, 艾丽蓉. CAPS 导航电文格式优化及其算法[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(11): 1602-1604.
Fu Qiang and Ai Li-rong. Optimization of CAPS navigation message structure and its algorithm [J]. *Computer Measurement & Control*, 2007, 15(11): 1602-1604.
- [50] Kim D, Park B, and Cho A, *et al.* Design of efficient navigation message format for UAV pseudolite navigation system [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(4): 1342-1355.
- [51] Soloviev A, Graas F V, Gunawardena S. Decoding navigation data messages from weak GPS signals [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 660-666.
- [52] Ziemer R E and Peterson R L. Introduction to Digital Communication [M]. Second Edition, America, Prentice Hall, 2005: 306-321.
- 陈金平: 男, 1971 年生, 高级工程师, 研究方向为卫星导航及增强技术。
王梦丽: 女, 1978 年生, 工程师, 研究方向为卫星导航技术。
钱曙光: 男, 1969 年生, 工程师, 研究方向为卫星导航技术。