

## Galileo E6B/C 信号接收机设计\*

何旭蕾<sup>1,2</sup>, 刘成<sup>3</sup>, 王威<sup>3</sup>, 李健<sup>1</sup>, 刘学勇<sup>1</sup>, 杨颖<sup>1</sup>, 巴晓辉<sup>1,2</sup>, 陈杰<sup>1</sup>

(1.中国科学院微电子研究所,北京 100029;2.中国科学院大学,北京 100049;3.中国卫星导航工程中心,北京 100094)

**摘要:** Galileo 系统通过 E6B/C 信号提供精密单点定位服务和身份验证服务。2019 年 1 月欧盟公布了 Galileo 系统 E6B/C 信号的扩频码,参考欧盟发布文件,对 E6B/C 信号的载波频率、调制方式、主码、二级码、数据编码方案和电文结构进行了描述。设计了 E6B/C 信号捕获跟踪方案,通过短时相关结合 FFT 的方案对天空中的 Galileo 卫星 E6B/C 信号进行捕获,并用窄带宽功率比方法和矩方法估计 E6C 和 E6B 的载噪比。同时对当前卫星播发的 E6B 电文信息进行了分析,分析结果表明当前 Galileo 的 E6B 信号还未开始提供 PPP 服务。

**关键词:** E6B/C;接收机设计;短时相关结合 FFT;载噪比估计

中图分类号: TN911.6;P228.4

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200220

中文引用格式: 何旭蕾,刘成,王威,等. Galileo E6B/C 信号接收机设计[J].电子技术应用,2020,46(11):8-11,17.

英文引用格式: He Xulei, Liu Cheng, Wang Wei, et al. The design of Galileo E6B/C receiver[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11): 8-11, 17.

## The design of Galileo E6B/C receiver

He Xulei<sup>1,2</sup>, Liu Cheng<sup>3</sup>, Wang Wei<sup>3</sup>, Li Jian<sup>1</sup>, Liu Xueyong<sup>1</sup>, Yang Ying<sup>1</sup>, Ba Xiaohui<sup>1,2</sup>, Chen Jie<sup>1</sup>

(1.Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.China Satellite Navigation Office, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Galileo system provides commercial services including precise point positioning and authentication through E6B/C signals. In January 2019, the European Union announced the spreading code of the Galileo system's E6B/C signal. This article refers to the European Union's published document of the E6B/C signal and describes the carrier frequency, modulation scheme, primary codes, secondary codes, data coding scheme, and message structure. This article introduces the scheme of acquisition and tracking of the E6B/C signal, which acquires the E6B/C signals in the sky through the short-time correlation and FFT scheme, then uses the narrowband-wideband power ratio method and moments method to estimate the CNR of E6C and E6B. At the same time, this paper analyzes the current E6B message information that transmitted by current satellites. It shows that Galileo's E6B signal has not yet started to provide PPP services.

**Key words:** E6B/C; receiver design; short-time correlation and FFT; CNR estimation

## 0 引言

伽利略 (Galileo) 是由欧盟研制和建立的全球卫星导航系统,提供开放服务 (Open Service, OS)、商业服务 (Commercial Service, CS)、公共特许服务 (Public Regulated Service, PRS) 和搜寻救援服务 (Search and Rescue Service, SAR)。当前天空中有 26 颗中圆地球轨道卫星 (Medium Earth Orbit, MEO), 包括 22 颗 FOC (Full Operational Capability) 卫星和 4 颗 IOV (In-orbit Validation) 卫星, 目前 26 颗卫星中有 22 颗可用卫星和 4 颗不可用卫星<sup>[1]</sup>。表 1 列出了 Galileo 系统播发信号的基本情况。

Galileo 在 E6 频点提供三个信号,其中 E6A 信号提供公共特许服务, E6A 是宽带信号, 有较好的抗干扰能

力,能提供更好的服务连续性。E6A 信号是加密的,只允许特许用户使用<sup>[2]</sup>,公开信息比较少。Galileo 通过 E6B 信号提供高精度校正信息,接收机无需地面通信就可以实现几分米 (约 20 cm) 量级的精度。E6C 信号将被加密,可抵御欺骗攻击,将用于提供身份验证服务。

文献[3]给出了 Galileo E6B/C 信号的调制方式和扩频码速率等信息,但没有公布 E6B/C 信号的扩频码。2019 年 1 月,欧盟公布了 Galileo E6B/C 的扩频码<sup>[4]</sup>。E6B/C 的扩频码主码采用 Memory Code 的方式提供, E6B 和 E6C 各给出 50 组主码; E6C 上调制有二级码,长 100 码片,对应时长 100 ms,文献[4]给出了 50 组二级码。文献[4]提到, E6C 将来会被加密以用于身份验证,因此文献[4]提到的 E6C 的形式只是临时的。对于非授权用户来说,当 E6C 被加密后,不可能将 E6C 信号用作

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (61601009)

表 1 Galileo 系统播发信号介绍

信号	频点/MHz	调制方式	服务类型	扩频码速率/(Mcps)	扩频码主码周期/ms
E1A		BOCcos(15,2.5)	PRS	2.557 5	N/A
E1B	1 575.42	CBOC(6,1,1/11,+)	OS,CS	1.023	4
E1C		CBOC(6,1,1/11,-)	--		
E5a	1 176.45	AltBOC(15,10)	OS		
E5b	1 207.14		OS,CS		
E6A	1 278.75	BOCcos(10,5)	PRS	5.115	N/A
E6B/C		BPSK(5)	CS		

导频分量。

Galileo 系统通过 E6B 信号提供精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)修正实现分米级定位。其他提供星基 PPP 服务的卫星信号还包括日本准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)的 L6 信号和中国北斗导航卫星系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)的 PPP-B2b 信号<sup>[5]</sup>。QZSS L6 信号包括 L6D 和 L6E, L6D 信号的服务范围是日本本土; BDS PPP-B2b 信号暂时服务中国及周边地区; Galileo E6 信号的服务范围是全球, 这也是 Galileo 的优势所在。

由于 E6C 信号今后可能被加密, 普通接收机无法使用, 文献[6]介绍一种使用非相干累加并结合卡尔曼滤波的方法跟踪 E6B 信号, 该方法有效地提高了 E6B 信号的跟踪灵敏度。

E6B/C 信号还可以用于给多频 PPP 算法提供观测量信息, 文献[7]给出了使用 E1、E5a、E5b、E5 和 E6 的五频 PPP 方案, 与单频或者双频 PPP 相比, 可以改善定位精度和缩短 PPP AR(Ambiguity Resolution)收敛时间。

接收机支持 E6B/C 信号, 一方面可以通过 E6B 信号得到 PPP 的校正信息, 另一方面可以获取观测量信息用于定位解算。本文对 E6B/C 信号进行了分析, 介绍了调制方式、扩频码、纠错编码和电文结构等信息以及 E6B/C 信号的接收机设计方案, 并对天空中的 E6B/C 信号进行了解析。

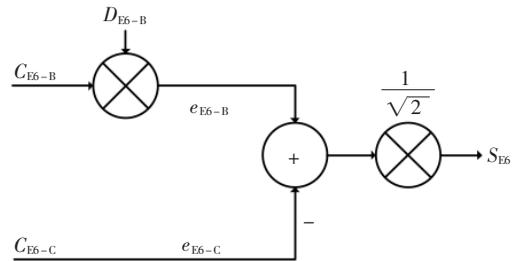
## 1 E6B/C 信号介绍

表 2 介绍了 Galileo E6B/C 信号的码特性, 其中 E6B 为数据通道, E6C 为导频通道。

表 2 Galileo E6B/C 信号特性

信号	调制方式	扩频码长	扩频码速率/(Mcps)	符号速率/(S/s)	二级码码长
E6B	BPSK(5)	5 115	5.115	1 000	N/A
E6C	BPSK(5)	5 115	5.115	No data	CS100 <sub>1-50</sub>

E6 信号的调制结构如图 1 所示, C/NAV 导航数据流  $D_{E6-B}$  调制扩频码  $C_{E6-B}$  得到数据分量  $e_{E6-B}$ , 导频分量  $e_{E6-C}$  直接由扩频码产生, 可得 E6 信号格式:

图 1 E6 信号调制结构<sup>[13]</sup>

$$S_{E6}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e_{E6-B}(t) - e_{E6-C}(t)] \quad (1)$$

E6B 信号调制有 C-NAV 电文格式的数据, 速率为 1 000 S/s, 每帧 1 000 符号, 因此每帧时长 1 s。每帧前 16 个符号位为帧同步头, 其值为“1011 0111 0111 0000”, 剩下的 984 个符号, 通过按列写、按行读的方式进行交织, 交织维度为 123 列×8 行。这 984 个符号是通过 492 bit 数据进行前向纠错(Forward Error Correction, FEC)编码得到的。编码方式为(2, 1, 7)卷积码, 结构如图 2 所示。

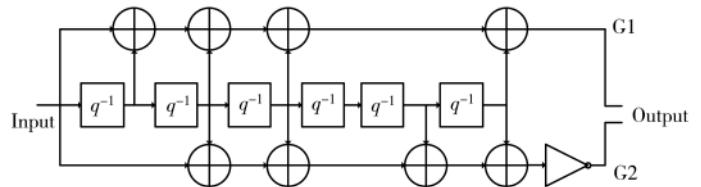


图 2 卷积编码方案

492 bit 的数据包括 14 bit 的页类型、448 bit 的商用数据、24 bit 的循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)和最后 6 bit 的零序列, 如图 3 所示。参与 CRC 校验的部分包括 14 bit 页类型和 448 bit 商业服务数据, 共计 462 bit。

## 2 E6B/C 信号接收机设计

### 2.1 捕获方案设计

对于 Galileo 双频或者多频接收机, 可以通过 E1 频点的信息辅助 E6B/C 信号的跟踪, 从而不需要考虑 E6B/C 的捕获问题。但若无法获得 E1/E5 频点的辅助信息, 就需要考虑对 E6B/C 信号的捕获。

本文采用短时相关(Short-Time Correlation, STC)结合

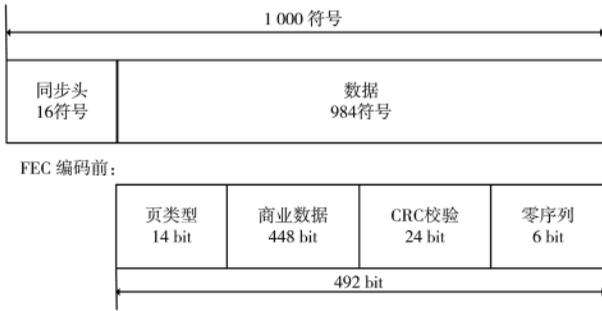
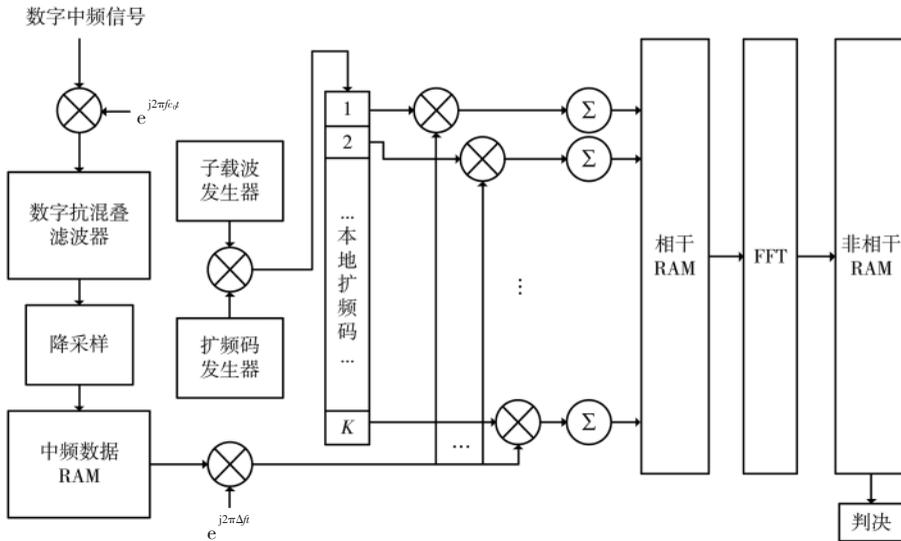


图3 E6B CNAV 电文格式

FFT的方法<sup>[8]</sup>捕获E6B/C信号。文献[8]中提到的STC结合FFT的捕获方法可以支持多种卫星导航信号,包括GPS L1C/A、L1C、L2C, BDS B1I, Galileo E1B/C和Glonass L1OF等,可实现时域和频域的二维并行搜索,捕获结构如图4所示。在文献[8]的基础上通过扩展可实现对E6B/C信号的捕获。

图4 捕获引擎结构<sup>[8]</sup>

由于E6B上调制有速率1 000 S/s的电文,E6C现在虽未加密,但也调制有周期100 bit的二级码,E6B和E6C都难以实现长时间的相干累加以提升捕获灵敏度。捕获的相干累加设为1 ms,进行若干次非相干累加。将总的预相干积分时间 $T_{PTT}$ 设为1 ms,平均分为 $L$ 段,每个短时相关时间为 $T_{coh}=T_{PTT}/L$ ,对短时相关结果进行 $N$ 点FFT运算,最后进行非相干累加和判决。操作时可采用E6B和E6C联合捕获的策略,即将E6B和E6C对应的非相干累加结果相加,再进行判决。

现阶段E6C信号还未加密,为提高捕获灵敏度,也可以使用剥离E6C信号上的二级码的方式,延长相干累加时间,但这也造成捕获复杂度的提升。本文中捕获引擎的相关参数设置如表3所示,其中第一行的配置设置相干累加时间1 ms,分段数为22段;第二行和第三行的配置可用于E6C信号的高灵敏度搜索,前提是考虑二

表3 Galileo E6B/C 信号捕获参数

$T_{coh}/ms$	$L$	$T_{PTT}/ms$	频率搜索范围/kHz	$N$
1/22	22	1	-11~11	64
1/11	55	5	-5.5~5.5	64
1/6	60	10	-3~3	64

级码的剥离。

## 2.2 跟踪和载噪比计算

采用图5所示的结构对E6B/C信号进行跟踪,两组码发生器分别生成E6B和E6C的扩频码,这两个码发生器通过一个码数控振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)控制生成新码,以保证E6B和E6C的扩频码严格同步。相关器阵列能得到E6B和E6C信号的解扩结果,送给载波鉴相器和码鉴相器进行操作。算法可以选择使用E6B或E6C的相关值,也可以联合使用E6B和E6C的相关值。由于当前E6C信号还未被加密,本文选择使用E6C的相关值,进行二级码剥离后,提供长时间的相干累加,以保障环路跟踪的稳定度和精度。

载噪比是1 Hz带宽内的信号功率与噪声功率之比,也是信噪比的一种归一化表示形式,每个跟踪通道的载噪比描述当前通道跟踪信号的强度,能够反映伪距与载波相位的估计精度。在本文中E6B信号采用矩方法(Moments Method, MM)估计载噪比,矩方法基于I、Q两路累加值的二阶矩和四阶矩估计<sup>[9]</sup>,公式为:

$$C/N_0(\text{dBHz}) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \frac{\sqrt{2M_2^2 - M_4}}{M_2 - \sqrt{2M_2^2 - M_4}} \right) \quad (2)$$

式中, $M_2$ 、 $M_4$ 依次为二阶矩和四阶矩:

$$M_2 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (I_k^2 + Q_k^2) \quad (3)$$

$$M_4 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (I_k^2 + Q_k^2)^2 \quad (4)$$

其中 $I_k$ 、 $Q_k$ 为每毫秒的相关器累加值, $T=0.001$  s。

E6C信号的载噪比估计可以使用矩方法也可以采用窄带宽功率比(Narrowband-Wideband Power Ratio, NWPR)方法,NWPR方法定义了带宽为 $1/MT$ 的窄带功率(a Narrow-Band Power,  $NBP_i$ )和带宽为 $1/T$ 的宽带功率(a Wide-Band Power,  $WBP_i$ )<sup>[10]</sup>:

$$WBP_i = \sum_{k=1}^M (I_k^2 + Q_k^2) \quad (5)$$

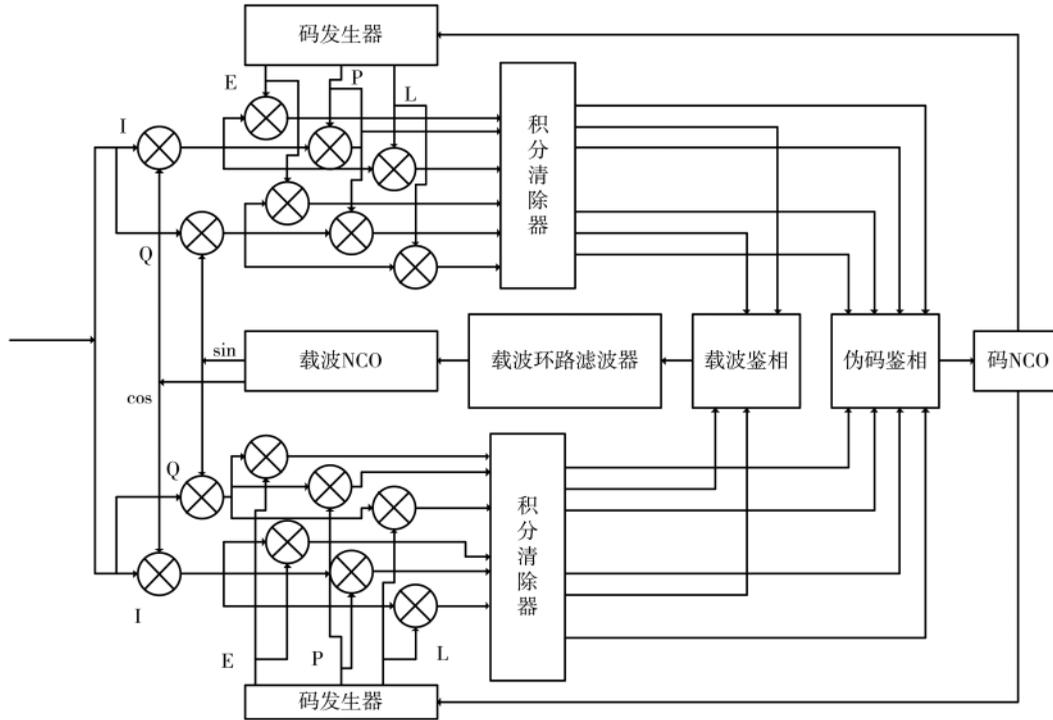


图5 接收机跟踪结构

$$NBP_i = (\sum_{k=1}^M I_k)^2 + (\sum_{k=1}^M Q_k)^2$$

通过式(7)计算载噪比。

$$C/N_0(\text{dBHz}) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \frac{\hat{\mu}_{NP} - 1}{M - \hat{\mu}_{NP}} \right)$$

式中,  $\hat{\mu}_{NP}$  表示码锁定指示器, 可以由下式得到。

$$\hat{\mu}_{NP} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K NP_i$$

$$NP_i = \frac{NBP_i}{WBP_i}$$

NWPR 方法需要先进行比特同步, 避免比特翻转造成的窄带功率错误估计, 而矩方法不需要进行比特同步, 强信号下可以快速准确估计信号强度。

### 3 E6B/C 信号测试

利用自主研发的接收机在 2019 年 12 月 30 日对天空中的 Galileo 卫星数据进行捕获跟踪, 天线位于中国科学院微电子研究所科研楼的楼顶。接收机捕获跟踪到五颗 Galileo 卫星, 扩频码编号分别是 E03、E05、E14、E24 和 E25。统计同一时间段各颗卫星 E1B、E1C、E5a、E5b、E6B 和 E6C 的载噪比情况, 计算平均值, 结果如表 4 所示, 可以看出 E6B 和 E6C 信号是等功率的。每颗卫星解调出 E6B 电文数据在解交织后都能通过 CRC 校验。这 5 颗卫星播发的 E6B 电文内容相同, 且每秒都重复同样的信息, 这说明 E6B 还未正式提供 PPP 服务。

### 4 结论

本文介绍了 Galileo E6B/C 信号的调制方式、扩频码

(6) 表 4 各 Galileo 卫星不同信号同一时间段平均载噪比情况

	(dBHz)							
	E1B	E1C	E5a-I	E5a-Q	E5b-I	E5b-Q	E6B	E6C
E03	41.035	40.821	45.070	44.902	47.629	47.218	46.859	46.462
E05	41.324	41.276	44.487	44.349	47.617	47.180	46.243	45.968
E14	43.200	42.864	46.563	46.563	48.470	47.916	46.694	46.249
E24	42.632	42.464	45.531	45.388	47.942	47.450	47.265	46.842
E25	43.152	42.779	45.863	45.732	48.364	47.857	46.953	46.597

特点和电文结构等信息, 并使用短时相关结合 FFT 算法对天空中的卫星 E6B/C 信号进行捕获, 分别用窄带宽带功率比方法和矩方法计算 E6C、E6B 载噪比情况, 并与同一时间段 Galileo 卫星的其他频点信号的载噪比进行了比较。对当前卫星播发的 E6B 电文信息进行了分析, 分析结果表明 Galileo 的 E6B 信号还未开始提供 PPP 服务。

### 参考文献

- [1] European GNSS Service Centre. Constellation Information[DB/OL].[2020-03-23]https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information.
- [2] RUEGAMER A, SUBERVIOLA I, FOERSTER F, et al. A bavarian initiative towards a robust Galileo PRS receiver[C]. Proceedings of ION GNSS 2011, 2011.
- [3] European GNSS(Galileo) Open Service. Signal-in-space interface control document, OS SIS ICD, issue 1.3[Z].2016.
- [4] European Union. E6-B/C codes technical note, issue 1[Z].

(下转第 17 页)

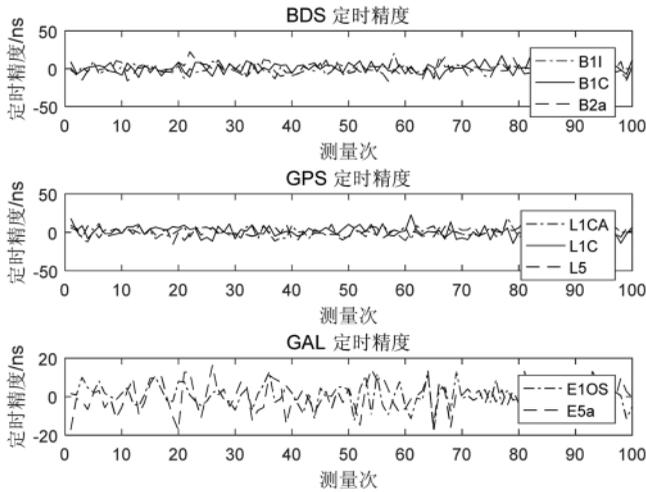


图9 定时精度

(2)捕获模块以多个硬件通道并行工作,具有较高的灵敏度,所有信号的失锁重捕时间均小于2s,首次定位时间最长为E5a信号,时间为66s,其余信号均小于50s。

(3)本终端实现了伪距、载波测量,可为测姿、多星座定位、精密定位等提供量测数据。

参考文献

[1] 刘天雄. 解读卫星导航系统的兼容与互操作[J]. 卫星与网络, 2017(12): 26-37.  
 [2] 洪冰清, 覃新贤. 多系统兼容卫星导航接收机关键技术概述[J]. 电子科技, 2017, 30(6): 150-153.

[3] 王浩, 丁文霞, 李鉴海, 等. GNSS多系统兼容互操作用户终端的制作方法: 中国, CN202600153U [P]. 2012-12-12.  
 [4] 袁进, 刘云飞. GNSS双频兼容互操作接收机信号捕获方法[J]. 全球定位系统, 2018, 43(4): 19-23.  
 [5] 徐冰艳, 郭承军. GNSS新体制信号多模捕获策略研究[J]. 中国卫星导航学术年会论文集-S03, 2018: 49-53.  
 [6] 杨颖, 巴晓辉. 北斗三号B1I、B1C和B2a信号兼容捕获算法[J]. 中国卫星导航学术年会论文集-S09, 2018: 31-35.  
 [7] 麻军伟, 王刚, 时永刚. 新旧体制兼容的卫导信号捕获方法研究[J]. 现代导航, 2017: 182-187.  
 [8] 林鑫晖. 卫星导航新体制信号跟踪技术研究与实现[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
 [9] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号B1I(3.0版)[Z]. 2019.  
 [10] 姚铮, 陆明泉. 新一代卫星导航系统信号设计原理与实现技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.

(收稿日期: 2020-07-31)

作者简介:

田湘(1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 卫星通信与导航。  
 朱银霞(1986-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 卫星射频前端。  
 施洋(1991-), 男, 学士, 助理工程师, 主要研究方向: 信息与通信工程。



(上接第11页)

2019.  
 [5] 何旭蕾, 刘成, 陈颖, 等. 北斗三号卫星B2b信号解析[J]. 电子技术应用, 2020, 46(3): 1-4, 13.  
 [6] MELANIA S, DANIELE B. Galileo E6-B tracking with non-coherent integration and Kalman filtering[C]. Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+2019), 2019: 3528-3542.  
 [7] Li Xingxing, Liu Gege, Li Xin, et al. Galileo PPP rapid ambiguity resolution with five-frequency observations[J]. GPS Solutions, 2020, 24(1): 24.  
 [8] 巴晓辉. GNSS接收机兼容型捕获引擎设计与实现[C]. 第八届中国卫星导航学术年会论文集——S09用户终端技

术, 2017: 47-51.  
 [9] 巴晓辉, 刘海洋, 郑睿, 等. 一种有效的GNSS接收机载噪比估计方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 457-460, 466.  
 [10] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.

(收稿日期: 2020-03-23)

作者简介:

何旭蕾(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: GNSS算法与接收机设计。  
 刘成(1987-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 卫星导航增强技术。  
 巴晓辉(1980-), 通信作者, 男, 研究员/博士生导师, 主要研究方向: 卫星导航、信号处理, E-mail: baxiaohui@ime.ac.cn。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所