

卫星导航双频兼容互操作接收终端设计

田 湘¹, 朱银霞¹, 施 洋², 胡 婧¹

(1. 陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 31121 部队, 江苏 南京 210000)

摘 要: 由于全球卫星导航系统兼容互操作进程不断推进, 设计实现具有兼容互操作性能的卫星导航接收终端是接收机领域的又一方向。针对 CDMA 导航信号设计实现了一种双频兼容互操作接收终端, 利用终端控制软件设置终端参数, 以通用的数字前端模块、基于时域多通道并行捕获、多相位的相关器实现数字接收处理模块, 进一步实现定位解算。该终端具有通用性强、捕获速度快、定位精度高等特点, 为提高服务的连续性、完好性和可用性奠定了硬件基础。

关键词: 兼容; 互操作; 捕获; 相关器

中图分类号: TN96

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200792

中文引用格式: 田湘, 朱银霞, 施洋, 等. 卫星导航双频兼容互操作接收终端设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 12-17.

英文引用格式: Tian Xiang, Zhu Yinxia, Shi Yang, et al. Design of dual frequency compatible and interoperable terminal for GNSS[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11): 12-17.

Design of dual frequency compatible and interoperable terminal for GNSS

Tian Xiang¹, Zhu Yinxia¹, Shi Yang², Hu Jing¹

(1. College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

2. PLA 31121 Unit, Nanjing 210000, China)

Abstract: With the development of compatibility and interoperability of global navigation satellite system, the implementation of satellite navigation receiving terminal with compatibility and interoperability performance is very important. In this paper, a dual frequency compatible and interoperable terminal is designed and implemented for CDMA navigation signal. The terminal parameters are set by terminal control software. The digital processing module is realized by general digital front-end module, parallel multi-channel acquisition based on time-domain, and multi-phase correlator, and the positioning function is further realized. The terminal has the characteristics of strong universality and fast acquisition speed, which lays a hard ware foundation for improving the continuity, integrity and availability of services.

Key words: compatibility; interoperability; acquisition; correlator

0 引言

全球卫星导航系统包括美国的 GPS、欧洲的 Galileo、中国的 BDS 和俄罗斯的 GLONASS 等系统, 在导航、定位的优势有目共睹。各卫星导航系统为了更多地占有导航应用市场, 积极地进行系统间的兼容互操作进程。兼容与互操作已成为国际卫星导航委员会(ICG)的核心议题。

兼容是各系统提供服务时, 不干扰其他系统的服务和信号, 不形成恶意导航冲突。互操作是联合使用卫星导航系统提供的服务, 从而在用户层面提供较好的性能服务, 而不是依靠单一系统的服务或信号来获得服务^[1]。

在此种形势下, 导航终端的设计更多地考虑兼容互操作性能^[2-3], 而兼容互操作的前提是多系统导航信号的接收, 主要体现在优化捕获^[4-7]、跟踪^[8]设计上。在信号接收的基础上, 可以显著增加观测量, 大幅提高导航

性能, 并且有效地减弱导航盲区, 服务的连续性、完好性和可用性都将显著提高。

本文设计实现 L1 和 L5 两个频段的导航信号接收终端, 实现 GPS、Galileo、BDS 3 个主要导航星座卫星导航信号的接收处理。该模块同时兼容 QZSS 系统。

1 导航信号

L1 和 L5 频段, 中心频率分别为 1 575.42 MHz 和 1 176.45 MHz, 包括 GPS 的 L1 C/A、L1C、L5 信号, BDS 公开服务的 B1I、B1C、B2a 信号, 以及 Galileo 的 E10S、E5a 信号。具体信号参数如表 1 所示。

接收导航信号分量中 L1 频带的 L1 C/A、B1I 只有数据分量, 其余信号是包含导频信号和数据信号两个子信号的复信号。L1C 和 B1C 信号导频和数据采用了不同的调制方式。L5 频带的 B2a、L5、E5a 信号导频和数据采用相同的调制方式以及相同的主码长度。

表 1 卫星导航信号基本参数

频带	信号	射频 中心频率/MHz	射频 带宽/MHz	调制 方式	主码长
L1	C/A	1 575.42	2	BPSK(1)	1 023
	L1C_d	1 575.42	8/16	BOC(1,1)	10 230
	L1C_p	1 575.42	8/16	TMBOC(6,1,4/33)	10 230
	E10S	1 575.42	8/16	CBOC(6,1,1/11)	4 092
	B1I	1 561.098	4	BPSK(2)	2 046
	B1C_d	1 575.42	8/16	BOC(1,1)	10 230
L5	B1C_p	1 575.42	8/16	TMBOC(6,1,4/33)	10 230
	B2a/L5/E5a	1 176.45	20/30	BPSK(10)	10 230

2 系统总体构架

卫星导航接收终端的基本结构如图 1 所示。第一部分天线、射频模块及模数转换,将射频模拟信号转为中频或基带数字信号;第二部分数字接收处理模块,产生复现码和复现载波实现接收数字信号的捕获和通道处理;第三部分是进行跟踪及定位解算。

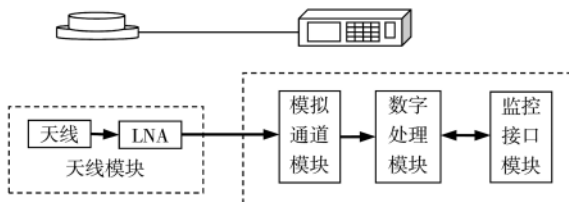


图 1 双频兼容接收终端结构框图

天线模块包含双频无源天线、低噪声放大器及滤波器,实现双频点信号接收、放大,将信号进行复用并输入至电缆。无源天线有两个,一个中心频率为1 575.42 MHz,用于接收 L1 频段的信号;另一个中心频率为1 176.45 MHz,用于接收 L5 频段的信号。

模拟通道模块向天线模块馈电,接收来自天线模块的射频信号,完成分路、滤波,对各频点信号进行正交下变频,并进行模数转换。

数字处理模块由“FPGA+DSP”的形式实现,FPGA 部分接收来自模拟通道数字信号,根据 DSP 指令及辅助信息完成信号的捕获、跟踪、测量以及导航信息解调与译码,并将指令执行结果与数据上报 DSP。DSP 发起信号捕获,向 FPGA 提供必要的辅助信息,接收 FPGA 的状态与数据信息,完成必要的控制功能与 PVT 解算。监控接口模块由 ARM 实现。

监控接口模块接受操作人员指令或自动执行预设操作流程,与信息处理模块交互,控制其执行指令操作、接收其上报数据与状态进行显示与存储。

3 模拟通道主要硬件电路

3.1 正交下变频

正交下变频的基本原理是以本振频率为 f_0

的一对正交载波与射频信号相乘,再抑制高频分量,可得到中频复信号。

设射频信号为:

$$S_{RF}(t) = a(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式中 f_c 为射频载波频率。

射频信号与本地载波相乘后两支路信号分别为:

$$\begin{cases} S_{IF,I}(t) = S_{RF}(t) \cos(2\pi f_0 t) \\ S_{IF,Q}(t) = S_{RF}(t) \sin(2\pi f_0 t) \end{cases} \quad (2)$$

抑制高频分量后,中频信号则为:

$$S_{IF}(t) = \frac{1}{2} a(t) e^{-j2\pi(f_c - f_0)t} \quad (3)$$

中频信号的中心频率为:

$$f_{IF} = f_c - f_0 \quad (4)$$

正交下变频不存在频谱混叠,可以更灵活地选择中频频率。

该部分电路采用的是 ADI 公司的 AD8347 芯片。该芯片可以实现 800 MHz 至 2.7 GHz 射频/中频正交解调器。由于信号存在 2 个频带,因此使用两个同样的芯片,其外部基本电路设计相同,主要引脚外部设计如图 2 所示。

2 个频带使用的本振频率不同,L1 频带使用的本振频率为 1 575 MHz,L5 频带使用的本振频率为 1 176 MHz。因此经过正交下变频通道输出的模拟基带信号中,B1I 信号变频后载波频率为 -13.092 MHz,L1 频段其他信号变频后中频载波频率为 0.42 MHz,L5 频段信号变频后中频载波频率为 0.45 MHz。

3.2 模数转换

模数转换采用的是美信公司的 MAX19516 双通道模数转换器(ADC)。具体连接如图 3 所示。

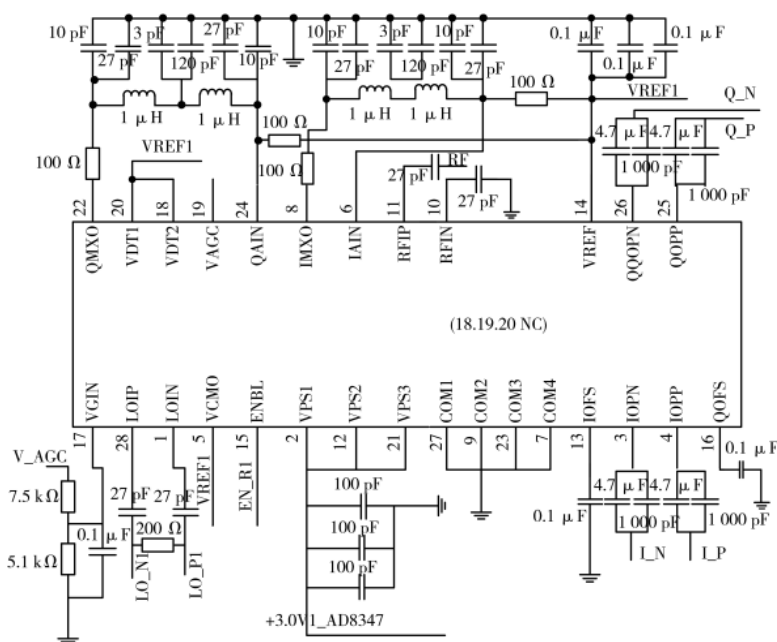


图 2 射频正交下变频模块电路图

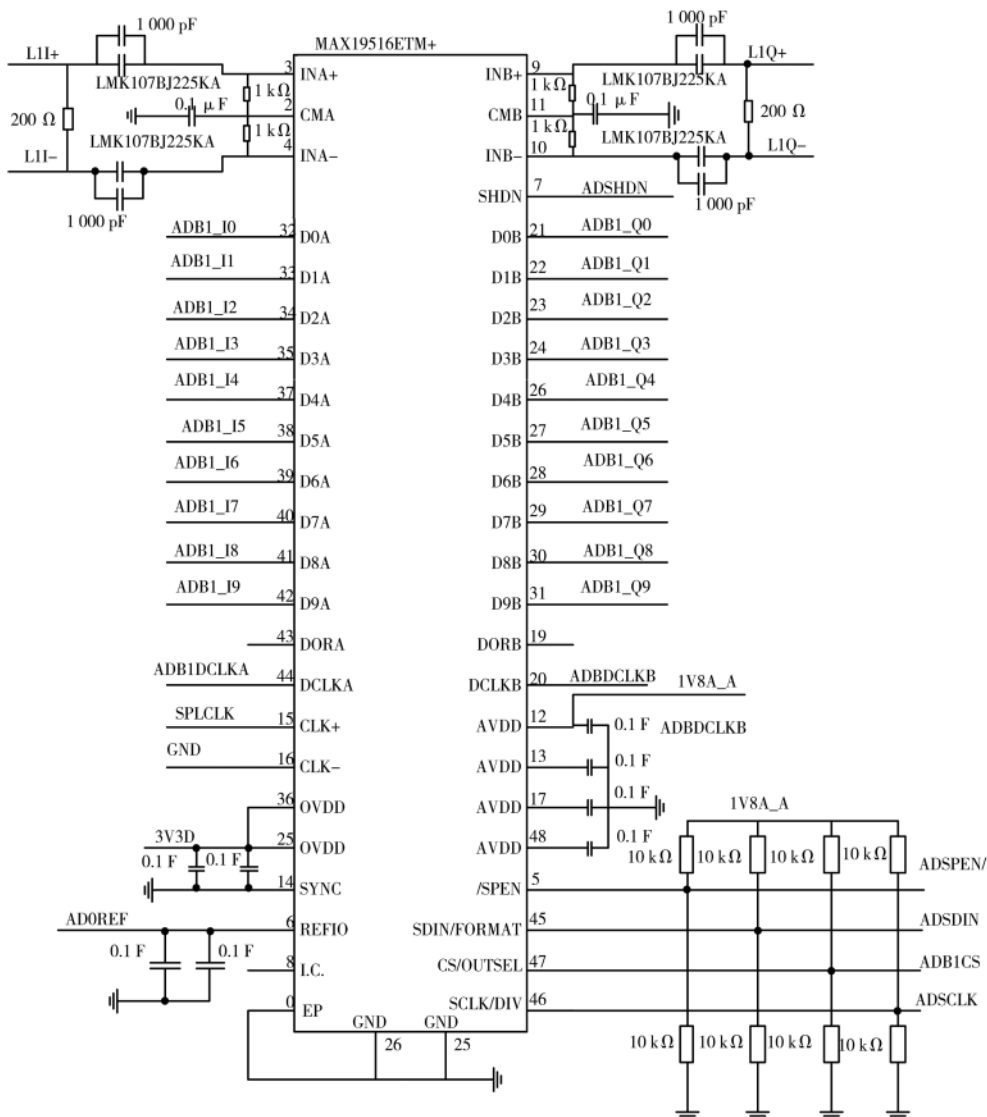


图3 模数转换模块电路图

该芯片可提供 10 位的分辨率,最大采样速率为 100 MS/s。模拟输入可接受 0.4 V 至 1.4 V 的宽输入共模电压范围。在基带至超过 400 MHz 的输入频率范围内,MAX19516 具有优异的动态性能,非常适合零中频(ZIF)和高中频(IF)采样应用。

4 数字处理关键技术

4.1 数字前端

数字前端模块包括数字 AGC 与滤波器模块。考虑到简化设计,采用 AGC 置于滤波器前的实现。单个频点信号带宽的限制在数字接收通道中实现,设计灵活,而且性能更好。

输入的信号样点包括了两个频点上的 8 种信号,对不同信号依据配置采用不同的滤波器设计。

所有的信号中,B1I 采用带通滤波器,单边带宽和射频带宽相同为 4 MHz,其余信号均采用低通滤波器,单边带宽为射频带宽的一半。根据表 1 的射频带宽,接收

信号部分信号带宽固定,部分为可选变带宽。选择通过外部控制字实现。同时,可以将滤波器分为 4 大类,即 L5 信号、B1C/L1C/E10S、L1 C/A 和 B1I。

滤波器的实现结构采用转置式 FIR 结构,不同的信号乘法的滤波器系数不同。利用 MATLAB 的滤波器函数,输入滤波器阶数、带宽和汉明窗型,以 8 位有符号数表示。具体数值如表 2、表 3 所示。

表 2 滤波器系数(b0~b7)

信号	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
L1C 类	-2	-2	-3	-4	-4	-2	2	10
L1 C/A	8	9	12	18	26	35	46	58
B1I	0	-3	-5	2	15	14	-16	-45
L5	0	-1	1	-1	1	4	-6	4

虽然各信号滤波器的类型和带宽有所差异,但转置式 FIR 结构在 FPGA 实现上是一致的。本设计采用了 30

表3 滤波器系数(b8~b15)

信号	b8	b9	b10	b11	b12	b13	b14	b15
L1C 类	23	39	58	78	-97	113	123	127
L1 C/A	71	83	12	106	115	121	126	127
B1I	-17	55	-5	-5	-104	-82	49	127
L5	-5	-16	2	-7	27	72	112	127

阶 8 bit 系数量化实现,如图 4 所示。

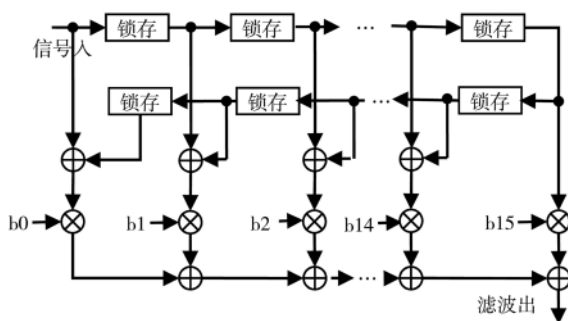


图4 30阶8bit系数量化滤波器实现结构

根据图4结构图,对输入信号进行了31次的锁存,对应的锁存值相加,输入信号和第31个锁存值相加,第1个锁存值和第30个锁存值相加,以此类推,将和与给定的滤波器系数相乘,最后再将这些相乘后的结果累加得到滤波器的输出。

4.2 信号捕获

捕获算法中,时域并行搜索法计算量最小,捕获时间短。时域并行搜索的基本过程是将由复现载波解调后的数字信号作傅里叶变换,与复现码的傅里叶变换共轭进行复乘后,将复乘结果作傅里叶反变换,再经由非相干积分和门限检测获得捕获结果。

L1CA 和 B1I 信号只有数据分量,采用单数据捕获。L1C 和 B1C 信号由于导频对数据的功率分配比为 3:1,因此采用单独导频信号捕获。L5 频段的信号导频和数据等功率,因此对导频和数据同时捕获。

FFT 的点数选择与扩频码的长度有关,不同的信号主码长度不同,但都是 1 023 的倍数,因此在这里以 1 023 码片块相关处理过程实现。对于主码段长度为 $N-1$ 023 的信号,将其分解为 N 个 1 023 段处理。基本工作过程如图 5 所示。整个过程以 1 023 为基数进行处理。根据 N 来进行相干累加,L1CA 为 1 段,B1I 为 2 段,L1C 为 10 段,L5 为 10 段,E1OS 为 4 段相干累加。



图5 捕获基本过程

整个捕获过程中,每个通道均执行多次扫描过程,每次扫描过程以一个参数控制块加以控制。

当捕获结束后,检测到过门限的相关值后将参数值传递给通道模块,进行通道累加跟踪。

4.3 信号跟踪

对于各个系统的 BPSK 信号、MBOC 信号等都采用传统的双环跟踪结构,即载波环和码环。基本结构如图 6 所示。图中的 ϕ_{ca} 和 ϕ_{co} 分别为载波相位与码相位。

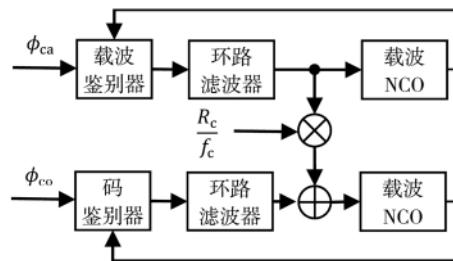


图6 双环路跟踪结构

载波与码鉴别、环路滤波和载波环对码环的辅助通过 DSP 软件实现,载波 NCO、码 NCO 以及用于两个鉴别器的相关数据运算,由 FPGA 完成。

对于不同的信号,码鉴别方法有所区别。设复现码超前、滞后支路的时间差为 D , E 、 P 、 L 分别为复现码超前、即时、滞后支路复现码与接收信号的相关值,可以根据相应的码鉴别的算法得到码相位 τ 。

BPSK 信号:

$$\tau_{\text{BPSK}} = \frac{1}{2} \frac{E-L}{E+L} \quad (5)$$

BOC 信号:

$$\tau_{\text{BOC}} = 0.169 \frac{E-L}{E+L} \quad (6)$$

TMBOC 信号:

单独导频鉴别:

$$\tau_{\text{TMBOC}_p} = (0.185 - \frac{D}{2}) \frac{E-L}{E+L} \quad (7)$$

导频数据联合鉴别:

$$\tau_{\text{TMBOC}_{pd}} = (0.190 - \frac{D}{2}) \frac{E-L}{E+L} \quad (8)$$

CBOC 信号:

单独导频鉴别:

$$\tau_{\text{CBOC}_p} = (0.186 - \frac{D}{2}) \frac{E-L}{E+L} \quad (9)$$

导频数据联合鉴别:

$$\tau_{\text{CBOC}_{pd}} = (0.206 - \frac{D}{2}) \frac{E-L}{E+L} \quad (10)$$

5 性能分析

FPGA 资源耗费根据软件综合后资源统计汇总。时间性能、灵敏度和定位精度均使用 GNSS 性能测试系统,进行了 100 次的测量,获得性能值。

5.1 资源

FPGA 是大规模逻辑处理单元,衡量设计的性能主要是资源耗费。FPGA 的资源用来衡量利用率的主要是触发器、查找表、块 RAM 以及全局时钟,每个 FPGA 这些资源都是固定的,随着数量的增加,价格也增加。

数据信号接收处理模块是 FPGA 实现的,其主要的资源部分为捕获和通道模块。捕获模块由于部分模块的公用性,因此固定为 10 个通道(20 个子通道)。通道模块以单个通道资源计算,按通道数量的增加资源相应增加。具体资源统计如表 4 所示。

表 4 资源使用

资源类型	捕获模块	单通道模块
Flip Flop	13 395	864
LUT	109 266	1 477
BRAM	258	1
BUFG	4	1
DSP48E1	390	0

捕获模块主要是由于采用了 FFT 处理,它是资源的具体体现。一个捕获子通道中使用了 2 个 2 048 点 FFT,1 个 2 048 点 IFFT 处理,均为 16 位,Radix2 形式,各占 DSP 3 个, RAM 3 个;同时含有 1 个复数乘模块占用 DSP 3 个。由于该过程中采用了乒乓处理存储累加数据占用块 RAM 2 个,因此基本使用块 RAM 为 5 块, DSP 为 12 个。20 个捕获子通道以此基数相乘,再加上共性单元。

采用此种兼容模式捕获,不需要固定设立模块特定信号,只要将信号的调制方式和主码长度的作为输入参数,虽然在一定程度上增加了逻辑模块进行译码处理,但是节约了系统总的资源。

5.2 时间性能

首次定位需要进行 4 颗卫星的捕获与跟踪,并且获取 3~5 帧的电文。因此首次定位时间很大程度上取决于信号的帧时长和卫星号的选取策略。首次定位时间最长为 E5a 信号,时间为 66 s,其余信号均小于 50 s, L1CA 时间最短为 34 s。

由于信号在一些情况下容易丢失,因此对失锁重捕时间也进行了测试。所有信号的失锁重捕时间均小于 2 s, B2a 最短, B1C 最长。

5.3 灵敏度

终端的灵敏度体现了能接收的最低信号,在一定程度上体现了对弱信号的捕获和接收能力,主要包括两个方面,一是捕获灵敏度,二是跟踪灵敏度。

在测试灵敏度时,信号源测试信号的信噪比从 -133 dBW 开始,以 1 dBW 为步进下载信号能量,当捕获概率低于 95%时记录该信噪比,即为捕获灵敏度。当静态定位精度低于 30 m 时,记录的信噪比为跟踪灵敏度。

从实际系统测试结果可得,该兼容互操作终端设计方法对所有信号均具有 -172 dBW 的捕获灵敏度,高于文献[2]中 -135 dBW 的灵敏度。跟踪灵敏度 B1I 信号达到 -178 dBW,其余信号均能达到 -188 dBW。

5.4 定位精度

利用 100 组数据分析三个导航系统水平、高程、定时三个方面精度,如图 7、图 8、图 9 所示。

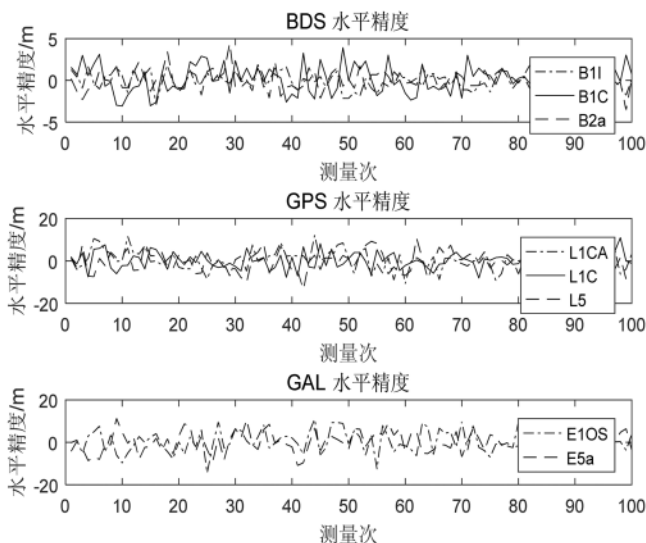


图 7 水平定位精度

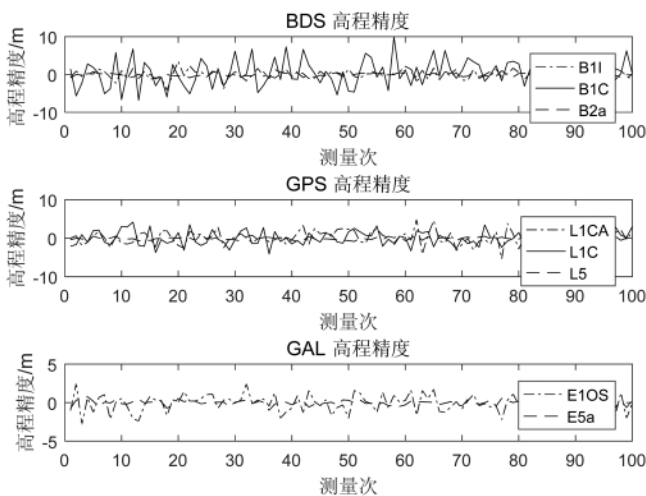


图 8 高程定位精度

如图 7 所示, L5 频段水平精度较 L1 频段低, 达 4.5 m, L1 频段水平精度为 1.6 m。

如图 8 所示, 高程精度均小于 3 m。

如图 9 所示, 定时精度均能达到 7.5 ns。

6 结论

本文针对 GPS、Galileo 和 BDS 现有播发信号, 实现了兼容互操作终端。该终端具有以下特点:

(1) 实现了 2 个频段 8 种信号的接收。

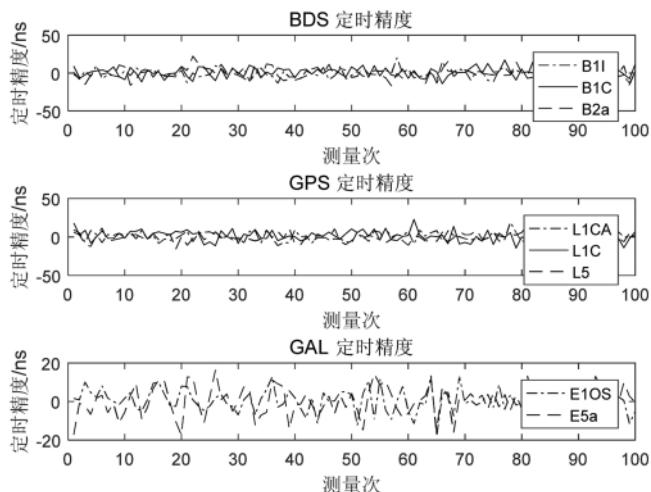


图9 定时精度

(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2 s,首次定位时间最长为E5a信号,时间为66 s,其余信号均小于50 s。

(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