Design and Implementation of a High-Precision Miniaturized GNSS Navigation Receiver*

WANG Hui[1], ZHANG Xinzhe[2*], BAO Aida[2], GUO Xin[2], CUI Jin[3]
(1.The First Military Representative Office of Naval Armament Department of PLAN in Shanghai, Shanghai 201913, China;
2.MOE Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;
3.Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030027, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high precision and high speed in the acquisition and tracking process of new B1C and B2a frequency points of Beidou-3 satellite, a design scheme of high-precision and miniaturized GNSS navigation receiver is proposed. By selecting the appropriate RF chip and baseband chip to build the core part of GNSS receiver, the overall design idea of GNSS receiver and the high dynamic acquisition and tracking algorithm of Beidou B1C and B2a frequency point are introduced in detail. Finally, the feasibility of this scheme is verified by simulating the Beidou B1C and B2a frequency point scene through the analogue signal source. The experimental results show that the receiver has the characteristics of small size, low power consumption and high precision, which can meet the needs of professional positioning.

Key words: GNSS navigation receiver; Beidou B1C/B2a frequency points; ZYNQ; high dynamic capture tracking; high accuracy
EEACC: 6330 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.008

一种高精度小型化 GNSS 导航接收机设计与实现*

王 晖[1], 张鑫哲[2*], 鲍爱达[2], 郭 鑫[2], 崔 兢[3]
(1.海军装备部驻上海地区第一军事代表室, 上海 201913; 2.中北大学微纳器件与系统教育部重点实验室, 山西 太原 030051; 3.晋西工业集团有限责任公司, 山西 太原 030027)

摘 要: 为了满足北斗三号卫星新增 B1C、B2a 频点捕获跟踪过程提出的高精度、低功耗的需求, 提出一种小型化高精度的导航接收系统设计方案; 选择合适的基带处理芯片与射频收发器搭建 GNSS 接收机的核心部分, 详细介绍 GNSS 接收机总体设计思路和北斗 B1C、B2a 频点高动态捕获跟踪算法, 最后, 通过模拟信号源模拟北斗 B1C、B2a 频点场景验证了所提方案的可行性, 试验结果表明, 该系统具有功耗低、体积小、精度高等特点, 能够满足专业领域定位需求。

关键词: GNSS 导航接收机; 北斗 B1C、B2a 频点; ZYNQ; 高动态捕获跟踪; 高精度
中图分类号: TN927+.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0534-07

截至 2020 年 6 月 23 日, 北斗卫星导航系统成功发射最新的北斗卫星, 我国的北斗卫星导航系统可以为向全世界用户提供定位服务[1], 随着北斗采用新增频点 B1C、B2a 信号, 其信号在结构复杂性、技术先进性、测距码和导航电文等方面进行了升级设计[2]。因为卫星和用户机两者之间会产生互相关运动, 并且用户机自身也存在的时钟偏差, 这些因素都将使得接收到的卫星信号有一定程度的频偏, 同时高动态环境下大范围的多普勒补偿会影响捕获跟踪难度, 导致指标精度降低、环路失锁、可能不能捕获卫星[3-4]。

现有背景下, 对多频点导航接收机小型化和高精度的研究具有重要的理论和现实意义。传统的 GNSS 接收机的硬件实现均采用 FPGA+DSP 芯片架构, 面临硬件成本高、高功耗、体积大的问题, 同时关于导航信号的捕获和跟踪算法, 文献[5]采用惯性导航辅助卫星导航的方法; 关于环路跟踪设计方面, 文献[6]采用一阶锁频环辅助二阶锁相环的方法在信号波动的情况下迅速锁定信号, 在信号锁定的情况下, 跟踪出精确相位和频率; 文献[7]则是基于循环码 FFT-IFFT 的相关算法实现卫星信号的捕获, 但捕获时间和捕获灵敏度指标不太理想。本文针对卫星高动态场景, 在捕获跟踪算法上采用改进后的 PMF-FFT 捕获算法和 FLL+PLL 跟踪算法, 有效地

项目来源: 国家自然科学基金项目(62204232); 山西省基础研究计划项目(202103021244198)
收稿日期: 2024-03-18 **修改日期**: 2024-04-02

改善捕获时间、捕获精度和捕获跟踪能力问题。

本文根据 GNSS 导航接收器特性,提出一种的高精度、高动态、小型化、低功耗,接收北斗 B1C、B2a 信号的 GNSS 导航接收机。系统采用 Zynq-7000 系列可编程的 SOC 作为主要芯片,着重研究了系统的总体设计方法、高动态下的捕获跟踪设计以及最后的算法仿真与硬件实物测试及 FPGA 信号的代码功能仿真验证等内容。

1　系统总体方案设计

为了实现接收机小型化、低功耗的设计需求,同时考虑到软件的可维护性,首先针对核心器件进行选型,并依次完成各部分的硬件设计。

1.1　硬件平台

本方案中的射频芯片选用广州润芯公司的 RX3701 芯片,可接收频率范围为 1.15 GHz~1.65 GHz 的信号,涵盖当前所有导航信号频点,RDSS 支持接收工作频率范围为 2.483 GHz~2.5 GHz,发射工作频率覆盖 1.61 GHz~1.68 GHz。该芯片集成度很高,同时具有优异的射频性能。内部集成包含低噪声放大器、下变频混频器、可编程放大器、ADC 和锁相环等的整个接收链路器件,以及中频滤波器、上变频混频器、功率放大器在内的完整发射链路器件。凭借不同的导航信号体制,通过控制内部寄存器可对各模块进行调整。

本项目中基带解算芯片选择赛灵思公司的 Zynq-7000 系列的 XC7Z010 芯片作为基带处理模块和定位解算模块的主芯片。芯片内部集成一个双核 ARM Cortex-A9 的处理器系统(Processing System,PS)和 28 nm 的 FPGA 可编程逻辑器件(Programmable Logic,PL)。PS 部分为处理器系统,其内部有两个高速的 ARM 并行处理器,每个内核处理速度可以达到 2.5 DMIPS/MHz,工作主频是 667 MHz;PL 部分为高性能的 Xilinx-7 系列系列的 FPGA,可以处理多路高速并行信号,具有 85 k 逻辑单元、220 个 DPS 单元、16 个全局时钟网络和 256 Mb 的 DDR3 DRAM 等资源[8],该芯片可以完全替代以前 FPGA+DSP 架构的所有功能,同时可以将设备的器件功耗控制在 2.5 W 左右。这些资源可以完全满足导航信号基带处理和定位结算的全部功能。

1.2　系统原理

小型化导航接收机系统总体设计方案如图 1 所示。接收天线接收来自北斗系统的 B1C、B2a 频点载波卫星信号,并将其送入到 RF 芯片,完成模拟信号下变频、AD 转换,输出的数字中频信号传输到基带解算芯片进行基带信号处理定位解算。

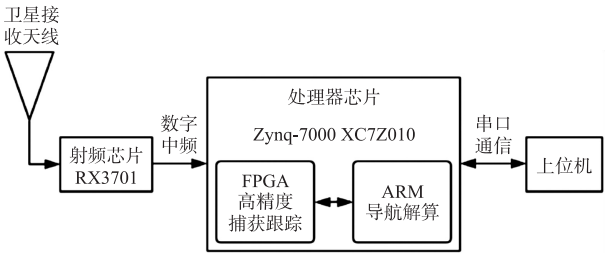


图 1　系统原理框图

Zynq 芯片的 PL 部分 FPGA 主要用于实现捕获和跟踪卫星信号功能,并解码出导航电文、伪距观测量和载波相位观测量。PS 部分的 ARM 内核根据从 PL 部分输出的导航电文、相关观测量解析出卫星的星历参数,并根据原始观测量数据解算出卫星的 PVT(位置、速度和时间)、伪距和多普勒频率等参数信息。因为定位解算过程中星历数据量较大,芯片外围通过外挂 Flash 存储器对各种数据进行存储。可以使用最小二乘法[9]通过卫星的伪距和相对位置来计算时钟偏差和用户接收机的位置。用户机的速度和时钟漂移[10-11]可以使用卫星速度和多普勒频率来计算。最后,通过时钟偏差和时钟漂移参数进行时间校正。上位机的通信部分通过 PL 端串行端口芯片将定位信息输出到外部设备。处理器模块的硬件电路如图 2 所示。

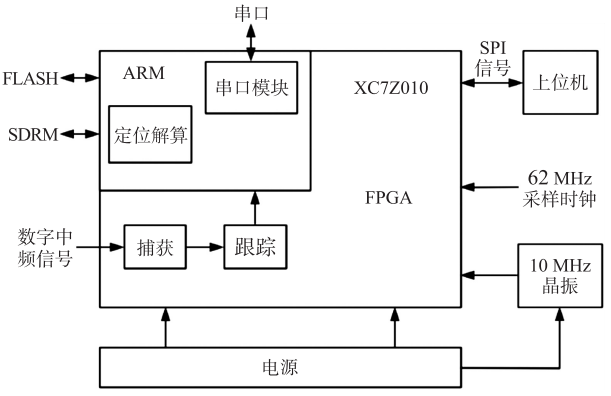


图 2　处理器模块的硬件架构

2　关键技术分析

针对高动态场景下大范围的多普勒补偿会影响捕获跟踪难度,本文采用改进的 PMF-FFT 捕获算法和 FLL+PLL 环路跟踪算法,可以有效改善在低载噪比、高动态场景下卫星的捕获跟踪精度。

2.1　部分匹配滤波+FFT 捕获算法

部分匹配滤波-快速傅里叶变换[12](Partial Matched Filters combined with FFT,PMF-FFT)是目前常见的一种快速捕获方法。本文将预采样积分处

理和非相干累加法融入到 PMT-FFT 捕获算法,可以有效地提高捕获时间以及捕获灵敏度。

射频信号经过射频芯片处理后下变频转换成中频信号,得到数字信号的采样数据,信号模型用式(1)表示:

$$r(t)=\sqrt{2P_S}d(t)c(t+\tau)\cos(\omega_0 t+\omega_d t+\varphi) \quad (1)$$

式中:P_S 为信号接收功率,$d(t)$ 为调制数据,$c(t+\tau)$ 为带时延的伪码,ω_0 是中频载波频率,ω_d 是载波多普勒频移,φ 是载波初始随机相位,信号接收时的未知相位偏移。

首先设完整的预检测积分时间为 T_{ent},分为 n 段,每段积分时间 $T_{\text{par}}=T_{\text{ent}}/n$,设采样频率为 f_s,第 m 段匹配滤波器 PMF_m 的 I、Q 支路输出结果用式(2)和式(3)表示:

$$I(m)=\frac{\sqrt{2P_S}}{2}R_m(\tau)\frac{\sin(\pi f_d T_p)}{\sin(\pi f_d T_s)}\cos(n\omega_d T_p+\phi)+N_t(m),m=0,\cdots,n-1 \quad (2)$$

$$Q(m)=\frac{\sqrt{2P_S}}{2}R_m(\tau)\frac{\sin(\pi f_d T_p)}{\sin(\pi f_d T_s)}\sin(n\omega_d T_p+\phi)+N_t(m),m=0,\cdots,n-1 \quad (3)$$

式中:T_s 是采样间隔,$R_m(\tau)$ 是码相关时间,式(4)和式(5)对 m 段的 PMF_m 进行 n 点 FFT,对多普勒频偏进行并行搜索可得:

$$\text{FFT}(k)=\sum_{m=0}^{N-1}Z(m)\exp(-\text{j}2\pi mk/N) \quad (4)$$

$$Z(m)=I(m)+\text{j}Q(m),k=0,\cdots,n-1 \quad (5)$$

由以上公式可得 FFT 的实部和虚部分别如式(6)和式(7)所示:

$$I(k)=\frac{U_P}{2}X(k,\omega_d)R_m(\tau)\cos(\psi)+N_I(k) \quad (6)$$

$$Q(k)=-\frac{U_P}{2}X(k,\omega_d)R_m(\tau)\sin(\psi)+N_Q(k)$$

$$K=0,\cdots,n-1 \quad (7)$$

式中:

$$X(k,\omega_d)=\frac{\sin\left(\frac{\omega_d T_p}{2}\right)\sin\left(\frac{\omega_d T_p n}{2}-\frac{k\pi n}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_d T_s}{2}\right)\sin\left(\frac{\omega_d T_s}{2}-\frac{k\pi}{N}\right)} \quad (8)$$

$$\psi=\phi'+\left(\frac{\omega_d T_p}{T_s}-\frac{2\pi k}{N}\right)(N-1) \quad (9)$$

在完成匹配和 FFT 计算后,检测判断模块最终将非相干累加输出的模糊结果与决策阈值进行比较。如果超过判定阈值,则证明捕获的信号是成功的。如果数据向后移位则再次执行 PMF-FFT 捕获计算输出以确保准确性,相干累积时间设为 2 ms,PRM 模块生成的伪码序列以 2 ms 为同步周期,输入时间则是 2 ms 的整数倍,改进的捕获算法如图 3 所示。

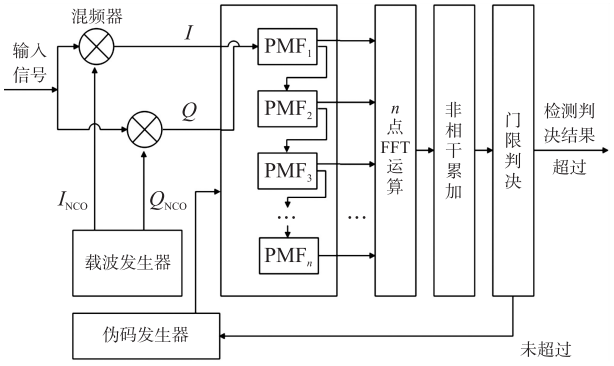


图 3 改进 PMF-FFT 捕获算法

2.2 高动态跟踪算法

关于北斗 B1C、B2a 信号在导航定位过程中,卫星与接收机之间的相对运动使得相互的速度与加速度都会产生相对范围变化,这将导致多普勒频移变化,因此接收机通道需要设计合适的载波频率以及相位跟踪环路,以此保证高动态环境信号稳定动态跟踪和频率、相位跟踪精度。针对载波频率和码相位的大幅度变化引起卫星信号跟踪失锁[13],本文提出图 4 所示的锁频环加锁相环(FLL+PLL)的混合载波跟踪方案。

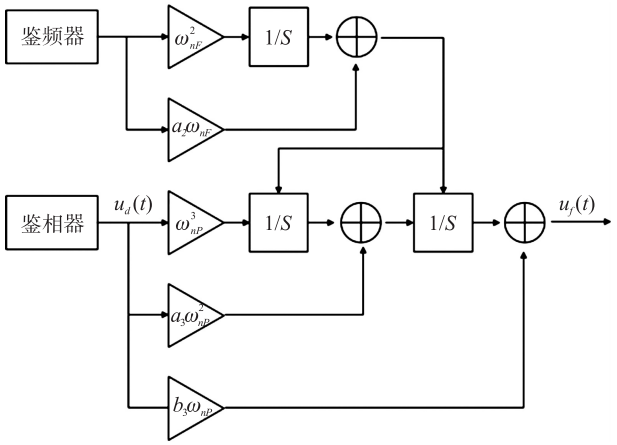


图 4 PLL+FLL 组合环路滤波器框图

方法优势在于混合载波环应用锁频环即保证高动态要求,锁相环的应用又保证高精度要求;载波辅助二阶延迟锁相环技术利用载波环路的多普勒测量值辅助码环的数字振荡器输出码速率的快慢,基本可以全部抵消码环的动态应力[14],从而通过较小的带宽跟踪,码环便于减小其他原因所造成的码相位误差,载波跟踪算法如图 5 所示

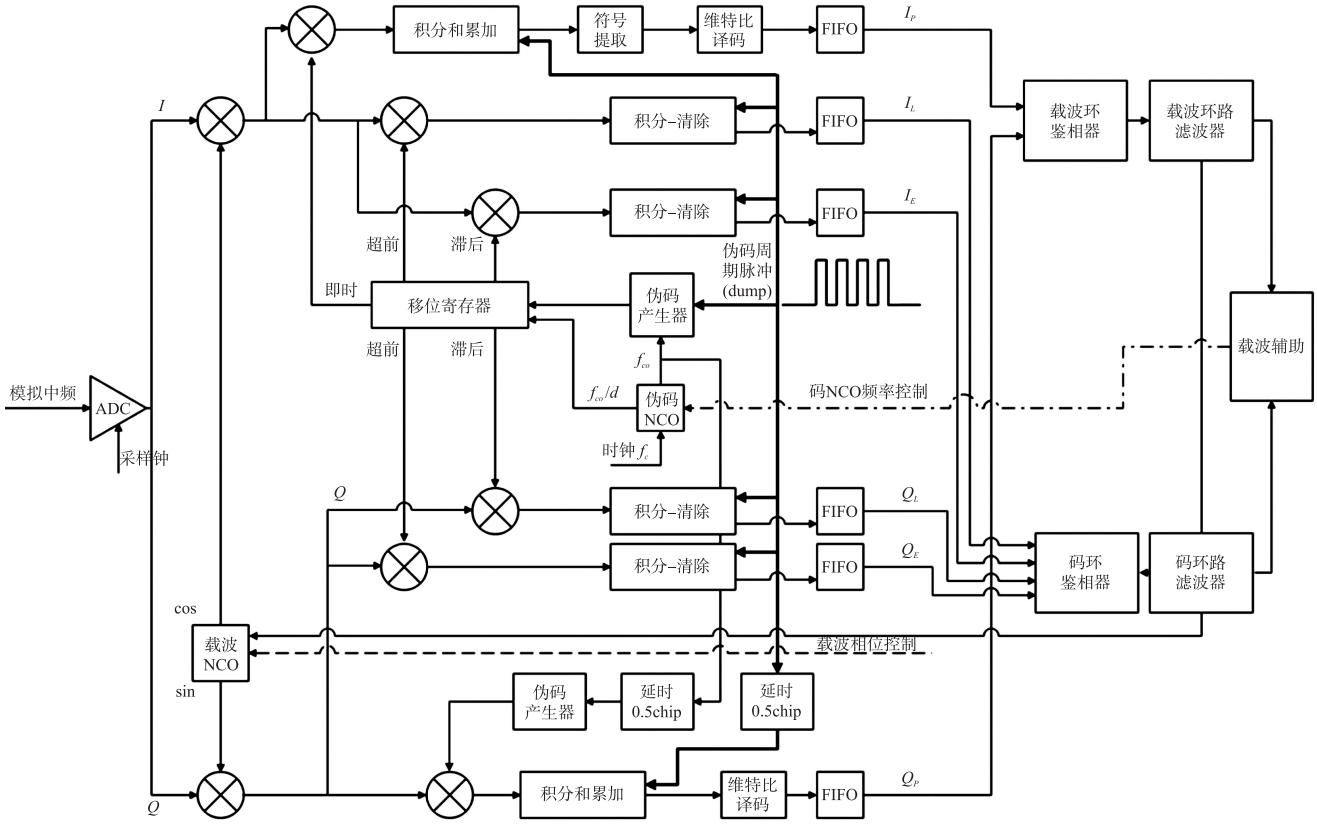


图 5　改进 PLL+FLL 环路滤波器的载波跟踪算法

载波跟踪环路中载波检测积分时间适应载体应力应当较短,并希望锁频环带宽尽可能大,但为提高跟踪精度,预检测积分时间应该适当长,并希望锁相环带宽尽可能地小,根据仿真验证,锁频环带宽设为 20 Hz,锁相环带宽设为 10 Hz,延迟锁相环设为 5 Hz,可以适应不同动态环境,保持对信号的准确跟踪。

3　试验测试验证

3.1　捕获跟踪算法仿真

针对上述提出的北斗 B1C、B2a 信号捕获跟踪系统设计方案,进行算法仿真验证,验证是否能够有效地捕获跟踪信号[15]。

经过 BPSK 调制的正交支路(*I* 路和 *Q* 路)进行捕获跟踪,*I* 路数据传输速率为 20.46 kbps,*Q* 路数据传输速率为 2 kbps,扩频码码速率 R_C 为 2.048 Mcps;码周期长为 1 ms,码片长为 10 230。模拟射频信号载波频率设置为 1 575 MHz(B1C 信号为例),采样率为 62 MHz;模拟卫星与接收机的高速相对运动状态,初始速度为 250 m/s,加速度为 96 m/s^2,PMF 组数为 64,每段长度为 160,FFT 点数为 64,相干累积时间设为 2 ms,以半个码元[16]的步进搜索,仿真时间为 3 s,捕获仿真结果输出如图 6 所示。

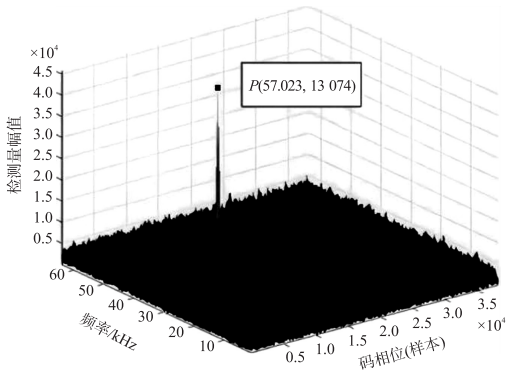


图 6　捕获结果仿真

由图 6 可以看出,在仿真时间内,改进后的 PMF-FFT 算法可以明显地捕获到多普勒频偏为 57.02 kHz、码相位为 13 074 Chip 的波峰信号。设置接收信号的总载噪比为 45.1 dB,锁频环带宽设为 20 Hz,锁相环带宽设为 10 Hz,延迟锁相环设为 5 Hz,跟踪仿真结果输出如图 7 所示。

由图 7 可以看出,信号载噪比持续维持在 40 dB 左右,跟踪环路的 *I* 路和 *Q* 路可以很快达到稳定跟踪状态,并且持续正常工作,码相位误差和载波相位误差都可以在很短时间内保持稳定,波动范围[17]较小,跟踪环路性能得到显著提高,较短时间内达到稳定跟踪状态。

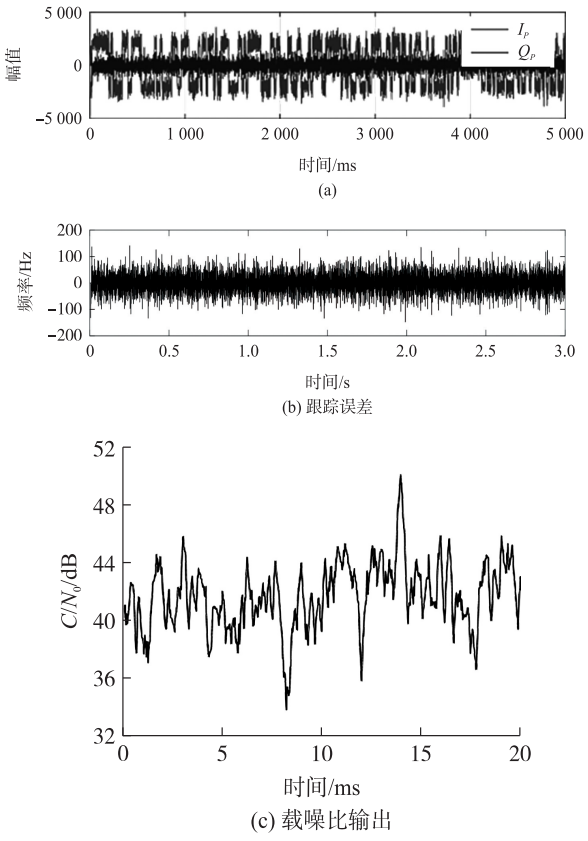


图 7 跟踪结果仿真

3.2 硬件测试与 FPGA 功能仿真

本系统进行实际的硬件上板验证,搭建实验测试平台,如图 8 所示,主要由接收机、上位机、微波模拟信号源、频谱仪、示波器等器件搭建,通过模拟信号源输出 B2a(1176.45 MHz)载波频点信号,通过频谱仪针对信号的模拟中频和数字中频 40.92 MHz、采样钟 62 MHz 进行硬件测试,信号平整无毛刺,信号波形及频谱如图 9 所示。

针对本系统设备进行 FPGA 功能仿真验证,仿真验证平台由仿真器、DUT 和 TB 文件组成(图 10),仿真验证工具为 ModelSim SE 软件,以 DUT 顶层设计为验证对象,在外部进行各种激励产生,模拟外部设备输入,从而进行 DUT 设计的 RTL 功能验证[18]。

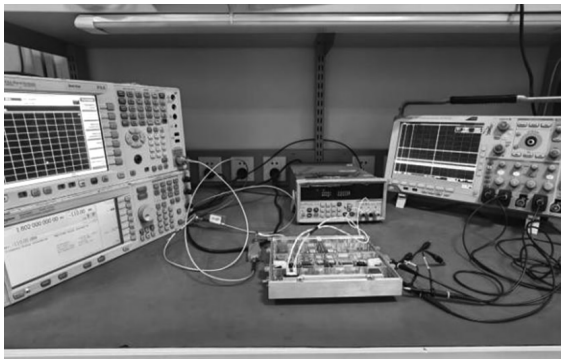


图 8 实验测试平台

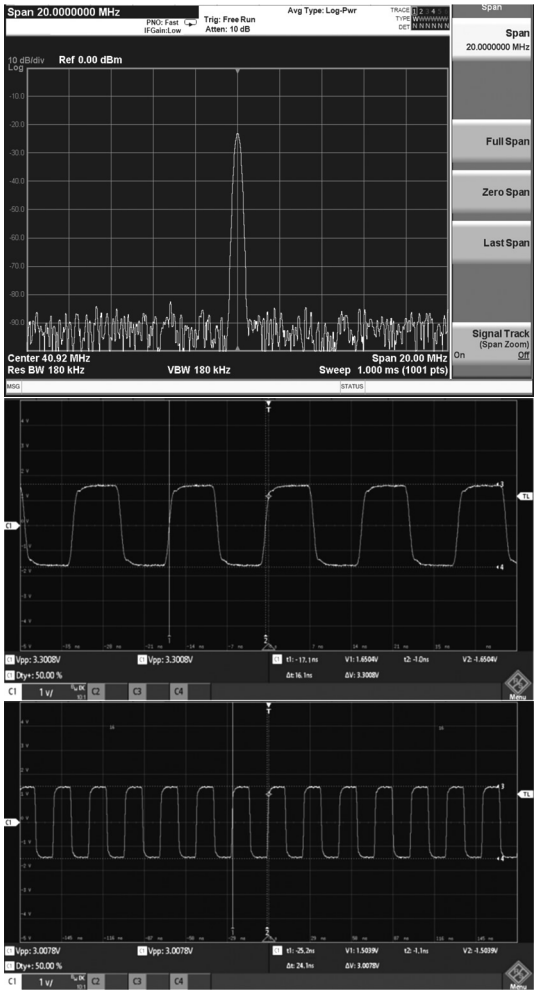


图 9 模拟中频信号频谱及数字、采样钟波形

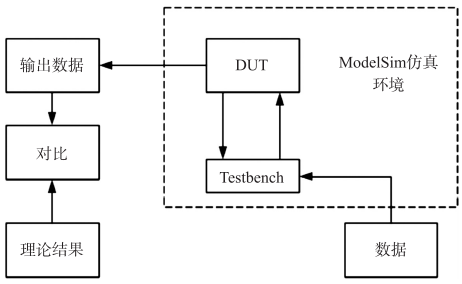


图 10 测试床示意图

通过 ModelSim SE 软件实时抓取板上信号[19],模拟多普勒频偏的中频数据激励数据输入,从而得到对整机快速捕获功能和跟踪解算功能的测试波形,对结果进行测试分析。测试波形如图 11 和图 12 所示。

由图 11 的捕获仿真波形可以得出,当复位信号 rst 置零时,通道输出信号和各寄存器都复位至初始值零,复位无效后,通道输出信号寄存器 signal_if 开始输出数据,复位后最大多普勒点信号 max_freq_dopp 输出结果与预期结果一致,经过多次测试,捕获时间均可保持在 T_{acq} = cnt_lms$_1$ − cnt_lms$_2$ = 258 − 53 =

205 ms 左右,对北斗 B1C、B2a 频点信号快捕功能正常;由图 12 的跟踪仿真波形可以得出,当 signal_select_cw 值为 00 时,选择第 1 通道 signal_if1 的数据作为输入,以此类推,码发生器产生超前(e_code)、即时(p_code)、滞后(l_code)三路伪码,通过与卫星信号进行相关匹配运算,解算卫星导航数据功能正常,当鉴频误差逐渐逼近于零且在零值上下波动,环路滤波器误差输出稳定趋近于零值,从输出 I 路和 Q 路波形可以看出,混频结果几乎趋近于直线,可见其频率趋近于零,即有效地分离了载波,跟踪环路锁定正常,满足系统正常功能要求。

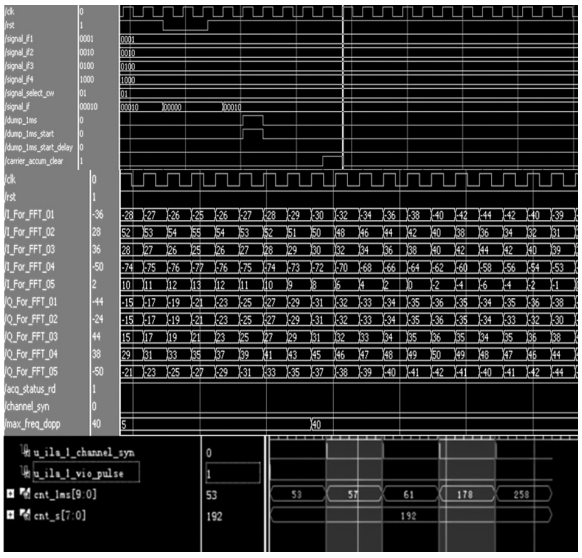


图 11　捕获功能波形

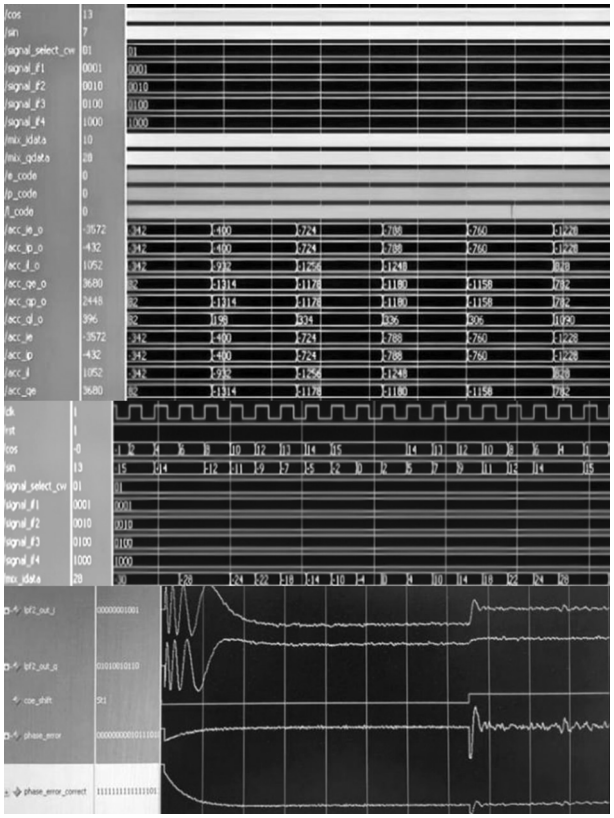


图 12　环路跟踪功能波形

3.3　低功耗性能测试

为验证接收机的低功耗性能,表 1 对比工作模式 1—遥测遥控通道全部正常工作和待机低功耗休眠各 5 min 和模式 2—遥测遥控通道正常工作 10 min 不同工作模式的功率损耗。

表 1　两种模式下功耗计算

工作模式	基带模块电源使能/mW	基带处理模块/mW	主控模块/mW	供电管理/mW	解算定位模块/mW	通信模块启动/mW	平均耗能/(mW·s)	工作时长/h
模式 1	1 400	67 892	13 554	21 099	12 000	13 420	569.75	10.6
模式 2	2 800	135 784	27 108	42 198	42 000	26 840	864.23	6.85

接收机的功耗由模式转换、基带处理、供电管理、定位与通信功能产生。工作模式切换包括全通道正常工作和低功耗休眠两部分,其中,正常模式的输出电流 $I_1 = 15.06$ mA,根据 $P = IV$,功耗为 $P_1 = 45.18$ mW;休眠模式的输出电流 $I_2 = 0.5$ mA,器件的静态功耗为 $P_2 = 1.65$ mW。由公式 $W = Pt$,可得模式 1 和模式 2 需要的能量 W_t 分别为 13 554 mW和 27 108 mW。同理,可计算出剩余供电管理模块和基带处理定位模块的能量损耗,其中定位模块启动时间为 20 μs,功耗为 2.5 W。

将两个工作方式下的能量各自相加可得电源消耗总能量 W_1,又因为电源转换效率 $\eta = 70\%$,则利用 $\eta = W_1/W$,可得出 10 min 内信标机消耗的总能量 W。在设计过程中,锂电池加入了冗余处理,冗余量为 $\alpha = 0.5$。由下式可得,电池可提供的总能量为 W_B,其中,电池电压 $V_B = 24$ V,电池额定容量 $C = 2\,650$ mAh。最终接收机的脱机工作时长可由式(10)和式(11)计算得出。其中 $\overline{W}$ 为平均消耗能量。

$$W_B = 3\,600 V_B C \alpha \tag{10}$$

$$t = \frac{W_B}{\overline{W}} \tag{11}$$

结果表明,接收机在模式 1 和模式 2 两种方式下的能量损耗和工作时长均有很大差别。双模式循环工作的能量损耗为持续工作方式的 64.7%;在单次工作时间为 10 min 的前提下,前者可工作 10.6 h,相较后者延长 3.75 h。

4 结语

针对北斗 B1C、B2a 频点信号测控研究资源较少和高动态环境下大范围的多普勒补偿会影响捕获跟踪难度,本文设计并实现了一种高精度、小型化、低功耗的 GNSS 接收机,在硬件设计上选择 Zynq-7000 系列芯片,代替了传统的“FPGA+DSP”架构,有效地降低设备功耗,捕获跟踪算法上使用改进后的 PMF-FFT 算法和 FLL+PLL 混合载波算法设计,经过算法仿真有效地提高在高动态场景下捕获和跟踪精度,最后经过模拟源测试设备硬件主要测试项[20]和 FPGA 功能仿真验证,测试结果表明,模拟中频、数字中频和采样钟信号输出正确,捕获跟踪功能验证正确,捕获时间均可保持在 200 ms 左右,对北斗 B1C、B2a 频点信号快捕和环路跟踪功能正常,同时两种工作模式的切换使系统具备更持续的工作时长,具有较大的实用价值和应用前景。

参考文献:

[1] 谭述森.北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报,2008,29(2):391-396.

[2] 周兵,刘红军.国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评[J]. 电讯技术,2018,58(9):1108-1114.

[3] 谢岸宏.卫星通信抗截获波形设计与检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.

[4] Pashintsev V P,Peskov M V,Kiselev N V,et al. Analysis of Noise Immunity of Satellite Communications under Small-Scale Ionospheric Disturbances and Time-Selective Fading of Received Signals[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences,2023,26(4):1036-1045.

[5] 边朗,蒙艳松,王晓亮,等. 一种实时自主导航高灵敏星载接收机设计[J]. 空间电子技术,2016,13(6):19-22.

[6] 廖炳瑜. 星载双频软件 GPS 接收机研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心),2005.

[7] 赵雪强. 星载双模卫星导航接收机技术研究与实现[D]. 北京:北方工业大学,2016.

[8] Qiu T S,Wang X Y,Du Q F,et al. A Novel Fine Doppler Frequency Acquisition Algorithm for BDS-3 B1C Signal Based on an Adaptive Filter[J]. IET Radar,Sonar Navigation,2021,15(9):1073-1082.

[9] 王家明,孙晨,何勇,等. 基于 PMF-FFT 的星载扩频通信系统捕获算法[J]. 通信技术,2022,55(7):844-849.

[10] 贾茹尚. 卫星导航信号捕获算法基于 ZYNQ 平台的研究与实现[D]. 济南:山东大学,2022.

[11] 柳春. 基于 PMF-FFT 的高动态导航信号捕获设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2016.

[12] 胡婉如,王竹刚,梅如如,等. 高速并行 Gardner 算法设计与实现[J]. 国防科技大学学报,2023,45(2):95-104.

[13] 宋少杰. BOC 体制下导航信号捕获与跟踪算法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2022.

[14] 蔡文炳,陈美杉,张银辉,等. 一种北斗三号短报文终端的快速捕获算法[J]. 现代电子技术,2023,46(7):10-13.

[15] Wang D Z,Zuo J Z,Jin Y,et al. A High Dynamic Carrier Acquisition and Tracking Algorithm for Space Coherent Optical Communication[J]. Journal of Physics:Conference Series,2023,2670(1):021004.

[16] 都文杰. 低轨卫星高动态信号快速捕获与跟踪算法研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2022.

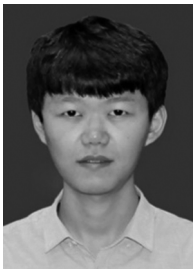
[17] 邱冬悦. BDS 基带信号跟踪算法的研究和 FPGA 实现[D]. 济南:山东大学,2022.

[18] Yang L,Sun D S,Ruan H T. Research on Acquisition and Tracking Algorithm of Global Satellite Positioning Receiver Based on UWB[J]. Wireless Communications Mobile Computing,2021,20-21.

[19] 李宏博,王雪,卢晓春. 高阶 BOC 信号的无模糊接收算法研究[J]. 时间频率学报,2018,41(2):130-141.

[20] 王家明,孙晨,何勇,等. 基于 PMF-FFT 的星载扩频通信系统捕获算法[J]. 通信技术,2022,55(7):844-849.

王 晖(1981—),男,河北滦南人,本科,主要从事舰船相关系统研制生产试验等方面的研究;



张鑫哲(1997—),男,山东菏泽人,硕士,主要从事电子动态测试、卫星导航收发通信、微系统集成等方向的研究,2081604028@qq.com。