

# 基于 SoC 的 GNSS 信号采集回放系统设计

于嘉杰<sup>1</sup> 宋剑鹏<sup>1</sup> 夏文龙<sup>1</sup> 郭庆功<sup>1\*</sup>  
YU Jiajie SONG Jianpeng XIA Wenlong GUO Qinggong

## 摘要

为满足高精度导航接收机测试及算法验证对卫星信号采集与复现能力的需求, 文章设计了一种基于 SoC 的全球导航卫星系统信号采集与回放系统。系统通过直接射频采样和数字信号处理技术, 不依赖传统的模拟中频结构, 在宽带条件下实现了对多种卫星信号的同时采集与高保真回放, 并在可编程数字域中灵活完成下变频和信号处理。实验测试表明, 该系统能够稳定完成 GPS L1CA 和 BDS B1I 等典型导航信号的采集与回放任务, 模拟真实导航信号环境, 配合 Pocket SDR 软件接收机可实现采集信号解调与米级定位精度。

## 关键词

射频直采; Pocket SDR; 信号采集回放; 以太网; SDCARD

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.014

## 0 引言

现代全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)不仅具有军事战略意义, 也带来了显著的社会经济效益, 推动各国加快自主导航系统建设<sup>[1]</sup>。随着导航系统应用的不断扩大, 导航终端种类增多、规模提升, 对其功能与性能的测试变得至关重要。导航终端测试已成为导航应用的核心技术, 对推动产品标准化和提升经济效益具有重要意义。

在实际环境中, GNSS 信号常受到射频干扰、电离层扰动和多径效应等因素影响, 具有随机性和时变性, 难以实现

信号传播条件的完全复现。为了能够在可控环境下对导航接收机进行系统性测试与性能评估, 亟需一种能够记录并复现实际信号的手段。GNSS 信号采集与回放系统正是在此背景下发挥关键作用: 该系统可采集实际环境中的信号并保存为数据文件, 反复回放真实射频场景, 为接收机提供稳定、可控的测试输入, 同时也便于对接收机算法进行对比与验证, 提升其准确性与可靠性<sup>[2]</sup>。

近年来, GNSS 信号采集与回放系统因其在导航接收机测试与算法验证中的重要作用, 逐渐成为国内外研究的热点方向。现有系统在架构设计上主要可分为基于传统超外差结构的中频采样方式<sup>[3-7]</sup>和基于新型高速数据转换器的直接射频采样方式<sup>[8-12]</sup>。2012 年, Di 等<sup>[3]</sup>基于 USRP-N210 主板与配对的 RFX 子板, 设计了一款低成本、便携且灵活的 GNSS 信号采集与回放系统。2023 年, 于得水<sup>[7]</sup>利用 AD9361 与

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610021

[基金项目] 电信科学技术第五研究所项目“分布式时空基准测试设备 WBZB01”(Y23-Z-S81-1)

## 参考文献:

- [1] 杨超城, 严宣辉, 陈容均, 等. 融合双重注意力机制的时间序列异常检测模型[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(3):740-754.
- [2] 蔡美玲, 汪家喜, 刘金平, 等. 基于 Transformer GAN 架构的多变量时间序列异常检测[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(5): 972-992.
- [3] 衡红军, 刘静. 基于混合方法的多维时间序列驾驶异常点检测[J]. 计算机工程, 2020, 46(3):99-104.
- [4] 王苏杭, 王一棠, 庞勇, 等. 面向盾构机实测数据的滑动窗口分层异常值检测及修正方法[J]. 仪表技术与传感器,

2023(9): 93-99.

- [5] 王志坚. 一种 GARCH 模型异常值的稳健检测法及其应用[J]. 统计与决策, 2020, 36(10):41-44.

## 【作者简介】

石蓉(1976—), 女, 陕西安康人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电力营销。

尹璐(1990—), 女, 山西灵石人, 本科, 工程师, 研究方向: 负荷管理。

(收稿日期: 2025-07-07 修回日期: 2025-12-16)

ZYNQ 平台构建了中频信号采集器, 并通过千兆以太网将数据保存至电脑, 并用软件接收机进行信号处理与性能评估。上述 GNSS 信号采集回放系统采用传统超外差中频采样方式, 需要通过混频器和振荡器等模拟电路将射频信号下变频至 ADC 可采样范围。这类模拟方案设计复杂、灵活性差, 特别在处理超宽带信号时, 对器件和设计要求较高。随着高速数据转换器的发展, 直接射频采样技术成为可行方案<sup>[8]</sup>。该技术可跳过传统的模拟变频环节, 直接对射频信号进行数字采样, 并在数字域完成后续的变频和处理, 具有结构更简单、干扰更小、功耗更低、成本更优等优势<sup>[9]</sup>。2011 年, 杨亮等<sup>[10]</sup>使用该技术多通道采集 B1、B2 和 B3 信号, 并通过对 B1 信号进行捕获验证采集系统的有效性, 但该工作并未基于片上系统 (system on chip, SoC) 平台且仅针对 B1 信号进行了捕获, 未实现定位解算。2016 年, 许磊等<sup>[11]</sup>使用该技术直接采样 MATLAB 仿真的 GPS L1CA 信号, 进行抽取滤波和多相混频后成功进行捕获, 但实现对多个 GNSS 信号同时采样且不具备回放功能。2024 年, 李献斌等<sup>[12]</sup>使用基于 SoC 的直接射频采样技术实现了超宽带射频信号的收发, 但也只是通过频谱验证采集回放功能的有效性, 未涉及对采集回放信号的其他处理。

综上所述, 本文基于 SoC 设计了多频多模 GNSS 信号采集回放系统, 该系统采用直接射频采样技术同时实现对 GPS L1CA 和 BDS B1I 信号的高速采样、存储和回放, 并对采集的 GNSS 信号进行捕获、跟踪和 PVT 解算。其回放的信号可对导航终端性能进行测试, 同时其保存的信号数据为信号捕获与跟踪算法的研究提供了可靠的原始数据, 为研制高性能、低价位的导航接收机奠定了基础。

## 1 系统硬件设计

### 1.1 整体架构

本系统结构整体分为射频前端、数字主控板 IW-RFSoc-47DR-SYN (47DR 主控板) 和上位机三大部分组成, 组成结构与连接关系如图 1 所示。

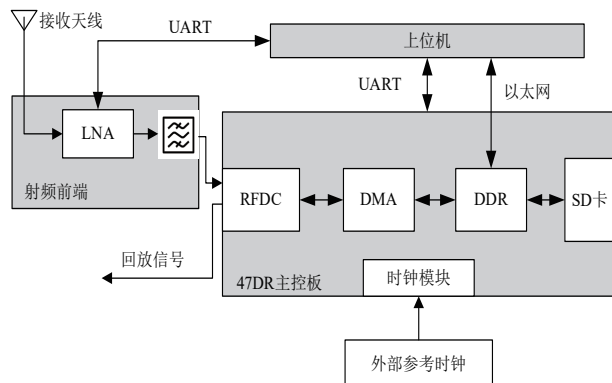


图 1 系统硬件平台整体架构

射频前端的主要任务是接收并预处理 GNSS 信号。由于 GNSS 信号落地功率很低, 通常低于热噪声底, 为了便于后续的数字信号处理, 通过低噪声功率放大器 (low noise amplifier, LNA) 和带通滤波器提高 GNSS 信号信噪比。

47DR 主控板是系统的核心单元, 由射频数据转换器 (radio frequency data converter, RFDC)、直接存储器访问 (direct memory access, DMA) 单元、安全数字卡 (secure digital card, SDCARD) 和以太网网口四部分组成。其中, RFDC 负责信号的 AD/DA 转换, 数据抽取/插值等功能; DMA 单元建立 RFDC 与第四代双倍速率同步动态随机存储器 (double data rate fourth synchronous dynamic random access memory, DDR4) 间的数据传输桥梁, 使用 DDR4 作为数据缓冲; 以太网网口和 SDCARD 负责将 DDR4 中的数据通过以太网传输到上位机或者存在 SDCARD 中, 对于难以直接进入进行采集 GNSS 信号的区域, 可通过无人机搭载采集回放系统等无人自主平台实现高效、低风险的到达与作业, 此时可使用 SDCARD 存储 GNSS 信号数据。

上位机获取采集到的数据, 利用 Pocket SDR 软件接收机对采集存储的 GNSS 信号进行捕获、跟踪、位置、速度和时间 (position velocity time, PVT) 解算以及定位精度分析, 验证系统的采集功能。另外, 上位机还会通过串口配置时钟、RFDC 采样率以及存储数据大小等, 动态调整系统的采集功能。

### 1.2 射频前端

射频前端包括低噪放和带通滤波器, 如图 1 所示。连接射频前端的天线负责接收来自卫星的 GNSS 信号, 选用能够接收 GPS L1CA 以及 BDS B1I 信号的有源天线, 内置一个 LNA, 增益 38 dB 左右。天线接收的信号输入到射频前端, 射频前端具有 0~65 dB 增益的 LNA, 可通过上位机控制其增益, LNA 也可将当前增益反馈给上位机。LNA 负责对接收到的微弱信号进行放大, 同时最大限度降低自身引入的噪声, 提高信噪比, 确保信号质量在后续处理环节中的有效性。带通滤波器负责滤除信号中的带外干扰, 确保只保留目标 GNSS 频段内的有效信号。

### 1.3 数字主控板 IW-RFSoc-47DR-SYN

IW-RFSoc-47DR-SYN 数模混合信号处理卡, 采用 Xilinx ZYNQ UltraScale + RFSoc ZU47DR 芯片, 8 个 ADC/DAC 端口和 4 GB DDR4 内存, 适用于各种不同的可编程应用, 其中 ADC 量化位数 16 位, 采样率最大为 5 GSPS, DAC 量化位数 16 位, 采样率 9.85 GSPS。

47DR 主控板上的 ZU47DR 芯片, 是基于 ZYNQ 的集成系统, 主要由处理系统 (processing system, PS) 和可编程逻辑

辑 (programmable logic, PL) 两大部分构成。通过 AXI 总线, 这两部分实现高效的通信和协作。数字主控板上采集存储架构如图 2 所示。数字主控板回放架构则是采集存储架构的逆过程。

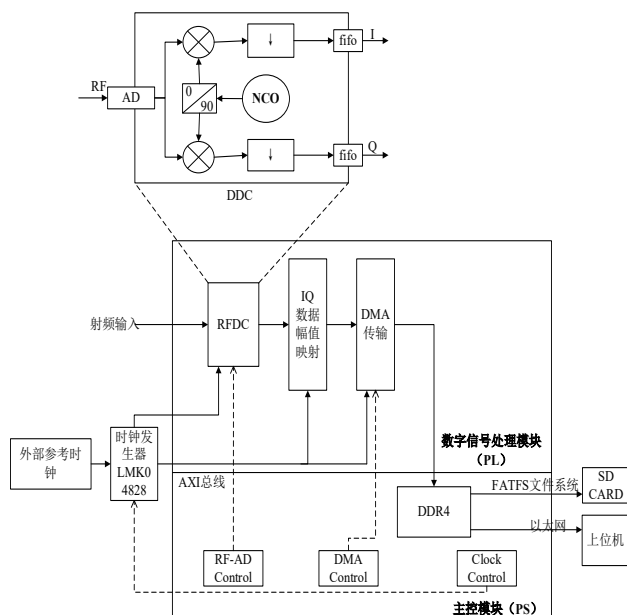


图 2 47DR 主控板采集存储架构

### 1.3.1 FPGA 模块

FPGA 模块是整个系统的数据处理核心, 即图 2 中的数字信号处理模块 (PL), 根据功能大致分为三个部分: RFDC 单元、IQ 数据幅值映射单元以及 DMA 传输单元。

RFDC 单元直接对 GNSS 信号进行 AD/DA 转换, 并对数字信号进行处理, 如: 上下变频、插值或抽取。数字变频器是软件无线电数字前端中的关键组成部分<sup>[13]</sup>。数字下变频器通过对数字信号进行数字混频, 混频到 3 MHz 中频, 再进行抽值, 降低其采样率, 从而将高采样率的数字射频信号转换为低采样率的数字基带信号。数字变频器则是将低采样率的数字基带信号转换为高采样率的数字射频信号<sup>[14]</sup>。

信号采集时, 在进行 DMA 传输之前, 首先根据公式 (1) 将 RFDC 输出的 16 bit 数据线性映射成 8 bit (保留 1 位符号位和 7 位数值位), 然后通过 DMA 传输存储到 PS 端的 DDR4 中。

$$\text{data\_8 bit} = (\text{data\_16 bit} + 32768) / 256 - 128 \quad (1)$$

在信号回放时, DMA 读取 DDR4 中的数据, 进行幅值映射处理, 根据式 (2) 将读取的 8 bit 数据线性映射成 16 bit (保留 1 位符号位和 15 位数值位), 然后送入 RFDC 将 GNSS 信号发射出去。

$$\text{data\_16 bit} = (\text{data\_8 bit} + 128) / 256 - 32768 \quad (2)$$

在采集过程中, DMA 单元负责 RFDC 输出的数字基带

信号存储到 PS 端的 DDR4 中, DMA 每传输一次数据, 就通过 FAT 文件系统模块 (fat file system module, FATFS) 写入到 SDCARD 中或者使用轻量级 IP 协议栈 (lightweight IP, LWIP) 通过以太网传输到上位机。回放过程则与采集过程相反, 预先存储的数据从 SD 卡或上位机读取到 PS 端 DDR4 中, 通过 DMA 传输至 PL 端, 在 RFDC 中进行数字上变频和 DAC 转换发射出去, 实现对真实 GNSS 信号环境的模拟回放。在 GNSS 信号回放时, 使用司南 K823 接收机对信号进行 PVT 解算, PC 端接收来自接收机 UART 打印信息, 确定回放的 GNSS 信号是否正常。

### 1.3.2 ARM 模块

ARM 模块即图 2 中的主控模块 (PS), 其中的硬核存储控制器可控制一个 4 GB, 64 bit 位宽的 DDR4 内存系统, 主要实现时钟、RFDC 和 DMA 控制、使用 FATFS 将 DDR4 的数据写入 SDCARD 以及使用 LWIP 通过以太网上传至上位机功能。ARM 模块作为主控模块, 控制整个采集回放系统流程<sup>[15]</sup>。在 GNSS 信号采集回放过程中, 首先通过 SPI 总线和 GPIO 控制时钟模块中的 LMK04828 时钟发生器产生 FPGA 模块所需的时钟, 如: ADC/DAC 时钟和 FPGA 模块基带时钟。其次通过 AXI 总线控制 RFDC 的启动和关闭。紧接着通过 API 函数控制 DMA 进行数据存储和回放。ARM 模块还可以通过 UART 打印相关信息在 PC 端, 如: 存储时间和存储容量等。图 3 为 ARM 模块与其他部分的连接关系图。

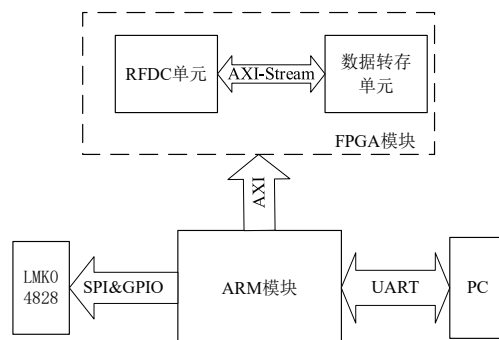


图 3 ARM 模块与其他部分的连接关系图

### 1.3.3 时钟模块

时钟模块设计如图 4 所示, 支持外部参考时钟和板载晶振两种时钟源输入方式, 可通过电路进行时钟切换。ARM 模块通过配置时钟发生器 LMK04828 相关参数实现不同频率的时钟输出。本系统使用外部参考时钟作为 LMK04828 芯片的时钟源, 选用同相科技公司生产的 STM-Rb-N 系列高性能铷原子钟。其短期稳定度可达到  $3 \times 10^{-12}/s$ , 开机 300 s 后频率准确度优于  $5 \times 10^{-11}$ , 可以输出稳定的 10 MHz 频率和 1 PPS, 确保了 GNSS 信号采集和回放信号的质量。本系统 LMK04828

输入铷原子钟产生的 10 MHz 时钟，输出 150 MHz 时钟到 PL 端。

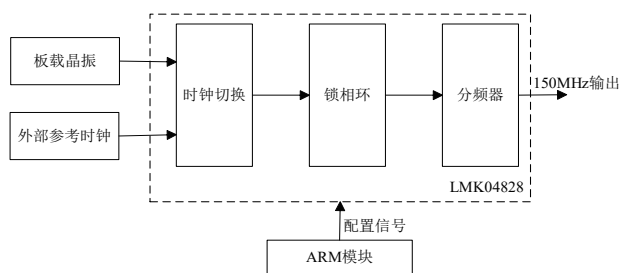


图 4 时钟模块

## 2 软件接收机设计

### 2.1 Pocket SDR 软件接收机简介

Pocket SDR 是一种基于开源 GNSS 接收器软件定义无线电技术。它支持几乎所有的 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 信号捕获、跟踪和 PVT 解算，并且 Pocket SDR 还提供 API 函数，用于显示采集数据的功率谱密度、搜索 GNSS 信号、跟踪 GNSS 信号、解码导航数据以及生成 PVT 解算，使 GNSS 信号处理过程更加简单直观。

### 2.2 捕获与跟踪

卫星信号的捕获是接收机识别某颗卫星信号是否存在，并粗略估计其码相位偏移和多普勒频移的过程。接收机通过生成本地的伪随机噪声（pseudo-random noise, PRN）码，依次与接收到的信号在不同码相位和频率偏移下进行相关运算，搜索出相关峰值，从而确定该卫星信号粗略的码相位和多普勒频移，并为后续的精跟踪做好准备。卫星信号的跟踪是在完成捕获之后，对信号进行精确锁定和持续跟踪的过程，其目的是实时提取码相位和载波相位，从而获取准确的伪距和载波相位观测值。接收机利用本地产生的伪随机码和载波信号，通过码跟踪环和载波跟踪环对接收信号进行连续比较和调整，使本地信号与卫星信号始终保持同步。跟踪过程不仅能精确测量信号传播时间，还能解调导航电文，是实现定位和高精度测量的关键步骤。

Pocket SDR 采用并行码相位的捕获算法。卫星信号的并行码相位捕获算法是一种高效的捕获方法，通过将整个伪码周期内所有可能的码相位同时进行相关计算，大大加快了捕获速度。该算法通常基于快速傅里叶变换（fast fourier transform, FFT）实现，将接收到的信号和本地产生的伪码分别进行 FFT，然后在频域内执行乘法操作，相当于时域的相关运算，最后通过反 FFT 得到所有码相位的相关结果。通过在多个载波频率偏移下重复这一过程，可以构建出完整的“频率-码相位”二维搜索图，从中找到最大相关峰值的位置，即可判断目标卫星是否存在，并估计其初始载波频率和码相位。

Pocket SDR 采用载波环+码环的跟踪环路。Pocket SDR 的跟踪环路中：载波环采用二阶锁频环（frequency locked loop, FLL）辅助二阶锁相环（phase-locked loop, PLL），输出多普勒频移、积分多普勒、载波相位及导航电文比特；码环为二阶延迟锁定环路（delay lock loop, DLL），用于精准估计伪码偏移并输出伪距。该环路将码跟踪获得的码相位误差作为参考，提供对载波环（如锁相环 PLL）的支持，尤其在信号较弱或动态条件剧烈变化时更加有效。由于伪码的变化速率远低于载波相位，码环对信号路径的变化更敏感，因此其跟踪结果可以用来抑制载波环中的抖动和漂移，提高整体跟踪的鲁棒性和精度。该方法广泛应用于复杂环境下的 GNSS 接收机，能实现更稳定的导航信号锁定和观测数据提取。

### 2.3 PVT 解算

Pocket SDR 的 PVT 解算过程基于开源的 GNSS 数据处理库 RTKLIB，采用了单频标准单点定位（single point positioning, SPP）的模型。在该方法中，接收机通过提取各颗卫星的导航电文信息，结合测得的伪距观测值，构建出非线性的定位方程组。随后利用牛顿迭代法结合最小二乘法对方程组进行迭代求解，从而获得采集系统在三维空间中的坐标。

在完成坐标解算后，系统会将计算得到的位置结果与事先司南 K823 接收机得到的参考坐标进行对比，评估两者之间的误差。该误差作为一种定位精度的衡量指标，可以反映出实际环境、误差建模及 Pocket SDR 性能等多种因素对定位结果的影响。通过这一流程，Pocket SDR 不仅完成了位置的估计，还为系统性能分析与误差校正提供了基础依据。

## 3 系统验证与数据分析

首先对采集系统进行功能验证，为了验证采集到的数据的有效性，基于前文的系统设计，对真实的卫星信号进行了采集、存储。主要从信号频谱、卫星捕获、捕获到的卫星跟踪结果以及 PVT 解算 4 个方面进行分析和验证。使用采集回放系统采集 GPS L1CA 和 BDS B1I 信号，时长为 5 min，在采集过程中利用网口将数据上传至 PC 端，采集完毕后利用 Pocket SDR 对采集的 GNSS 信号数据进行处理，画出其功率谱，进行捕获跟踪，PVT 解算以及定位精度分析，最后回放信号给司南 K823 接收机验证回放系统功能。

### 3.1 以太网传送数据可行性验证

实验测试中，对于 GPS L1CA 和 BDS B1I 信号，ADC 采样率设置为 1 200 MHz，按 40 倍抽取后经过 FIR 滤波，线性映射成 8 bit 量化，输出数据速率约为 240 Mbit/s，由于是 IQ 采样，两路同时输出，总的的数据速率为 480 Mbit/s，千兆

以太网速率满足速率要求。

### 3.2 采集信号频谱

本文以 GPS L1C/A 信号为测试对象,对采集到的信号数据进行分析。首先对原始采集数据进行 FFT 处理,画出其功率谱密度,用于评估信号频域分布情况及频谱完整性,并据此判断射频前端链路是否正常工作。随后,为进一步分析信号强度特征,对基带采样数据的幅值进行统计,绘制幅值分布的直方图,以观察其整体幅度范围、动态范围及噪声分布特性,结果如图 5 所示。

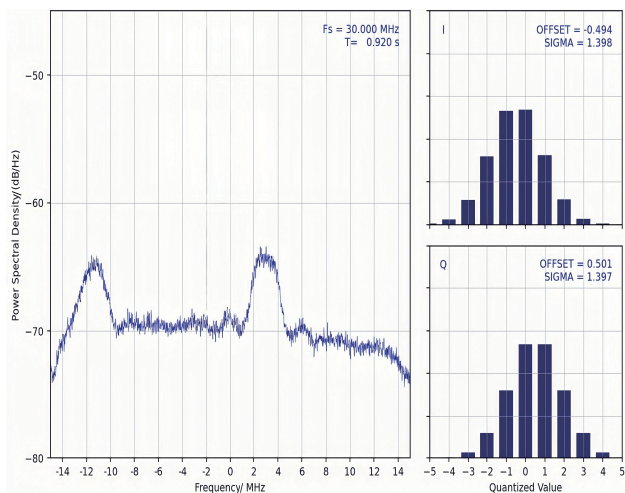


图 5 GPS L1C/A 信号功率谱

采集信号 GPS L1C/A 信号为 3 MHz 中频, IQ 采集, 采样率为 30 MHz。由于射频前端带通滤波器的范围为 1 515 MHz 到 1 640 MHz, 此范围含有 GPS L1C/A 和 BDS B1I, 两个信号中心频点理论相差 14.322 MHz, 因此, 图 5 中左边的一个峰为 BDS B1I 信号, 中心频率为 -11.322 MHz, 从图 5 中也可以看出两者相距约为 14 MHz。在采集完毕后, 可通过后续数字滤波保留所需的 GNSS 信号, 提高其信噪比, 再使用 Pocket SDR 进行处理, 也可以直接改变 Pocket SDR 中频参数, 对不同 GNSS 信号进行处理。

此外, 由于式 (1) 将 ADC 量化位数为 16 位的数据线性映射成量化位数为 8 位的数据, 加上卫星信号本身就很微弱, 因此, I 路和 Q 路的数据分布集中在 -5~+5 区间, 同时满足正态分布。

### 3.3 捕获与跟踪结果

设置捕获阶段相关参数, 其中多普勒搜索步进为 500 Hz, 捕获最大多普勒频移设置为 5 000 Hz, 相关积分时长为 2 ms, 捕获载噪比门限值为 37 dB-Hz。图 6 为各卫星的捕获状态。从图 6 可以看出, PRN 号为 5、6、11、12、17、19 和 20 的卫星被成功捕获, 其中 6、11、12、19 以及 20 号卫星信号质量比较好, 载噪比超过 42 dB-Hz。

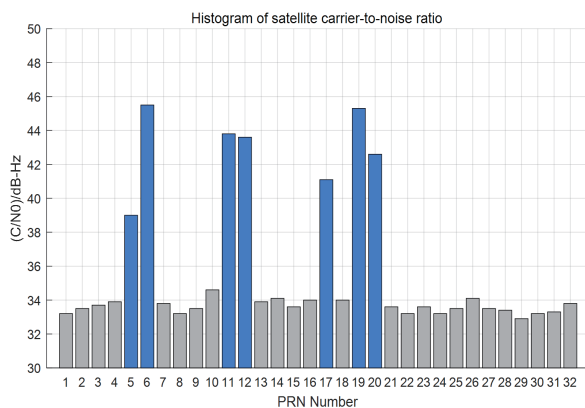


图 6 GPS L1C/A 信号卫星捕获结果

以 PRN 19 号卫星信号为例, 其捕获结果如图 7 所示。

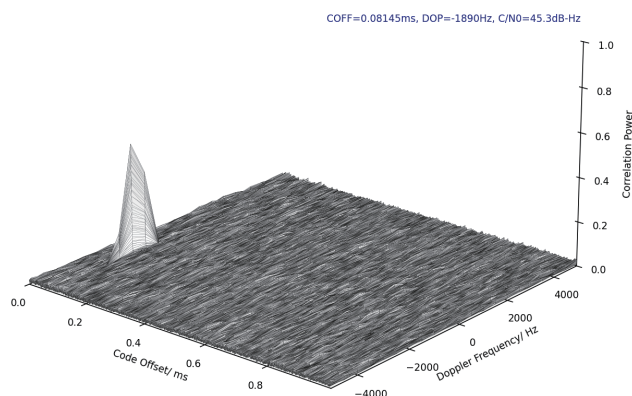


图 7 PRN 19 卫星捕获结果

图 7 清晰地展示了主峰位置, 且相关结果的噪声底部整体较为平坦, 未见明显伪峰或干扰。这表明 Pocket SDR 在信号提取和初步处理方面具有良好的性能, 能够有效识别并捕获卫星导航信号, 具备良好的抗噪能力和分辨能力, 验证了系统在实际信号环境下的捕获能力和稳定性。这也为后续的信号跟踪与解算奠定了可靠的基础。

在信号跟踪阶段, 系统对各个环路参数进行了合理配置, 以兼顾初始锁定速度与后期跟踪精度。载波跟踪部分中, 采用 FLL 与 PLL 联合跟踪结构, FLL 的噪声带宽  $B_{FLL}$  根据跟踪状态动态调整: 初始阶段设为 5 Hz, 以增强对频率偏差的响应, 加快锁定速度; 进入稳定跟踪后切换为 2 Hz, 以抑制噪声、提高精度与鲁棒性。PLL 的噪声带宽  $B_{PLL}$  固定为 5 Hz, 环路增益为 0.53, 采用二象限反正切法进行相位误差检测; FLL 则使用四象限反正切法进行频率误差检测, 系统阻尼系数设为  $\zeta=0.7$ , 实现响应速度与环路稳定性的平衡。在码跟踪部分, 码环噪声带宽  $B_{DLL}$  设置为 0.25 Hz, 环路增益为 1, 采用非相干超前-滞后幅值差分算法进行鉴码, 有效提升了系统在复杂信道条件下的码跟踪性能和载波锁定能力。在捕获到的卫星中, 选择 19 号卫星进行跟踪处理, 结果如图 8 所示。

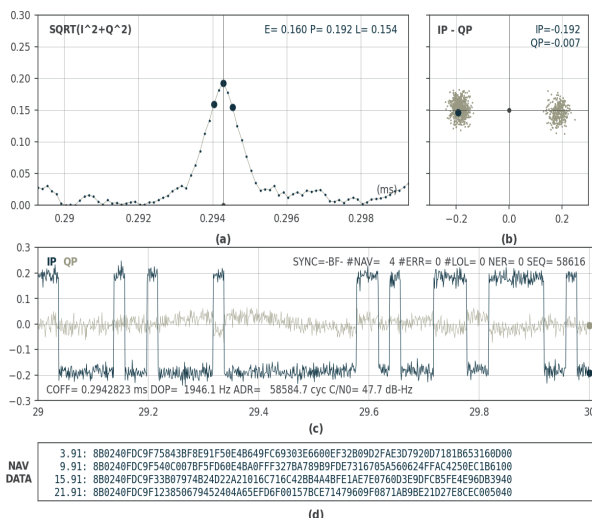


图 8 19 号卫星的跟踪处理结果

其中,图 8(a)为对同一 C/A 码相位延迟支路(如超前、即时或滞后支路)上的 I 路和 Q 路相干积分结果分别平方后相加开根号,得到的值即为该支路的 C/A 码自相关功率。从图中可以看出,中间一个点代表的即时支路的自相关功率最大。

图 8(b)显示,跟踪稳定后,由于 I 路的积分结果包含了全部的信号能量及噪声,而 Q 路仅包含噪声,因此在二维平面上的散点图呈现为两个相互分离的圆形分布区域。

图 8(c)显示了 I/Q 分量随时间变化的趋势曲线,载波成功锁定时, I 路包含的是导航电文信息,而 Q 路包含的基本上可以看作噪声。因为 GPS L1 C/A 信号采用 BPSK 调制,仅将导航电文调制在同相分量(I 路)上,正交分量(Q 路)没有携带有用信息,因此在信号捕获跟踪后,只有 I 路能解出导航电文,而 Q 路仅含噪声。

图 8(d)所示为在成功完成信号捕获与跟踪后的导航电文比特流。该比特流清晰地呈现了来自 GPS 卫星的导航数据,表明接收系统不仅成功识别并锁定了卫星信号,还准确提取出了导航电文内容。这为后续的 PVT 解算提供了必要的数据基础,验证了前端信号处理链路的有效性。

### 3.4 PVT 解算

通过 Pocket SDR 系统中的译码模块,可成功提取出接收到的卫星导航信号中的导航电文内容,并在跟踪过程中同步获取伪距观测值。将这些关键信息作为观测数据输入到 RTKLIB 这一开源 GNSS 解算框架中,便可执行 SPP 计算。该过程不依赖参考站,仅基于单一接收机的伪距数据和广播星历进行处理,最终估算出接收机的三维坐标和时钟偏差。同时,司南 K823 接收机接收天线信号进行 RTK 定位,定位精度可达厘米级,将该位置作为天线的标定位置,与 Pocket SDR 解算出的定位位置作差,得出东北天坐标系下的定位误差曲线,如图 9 所示。

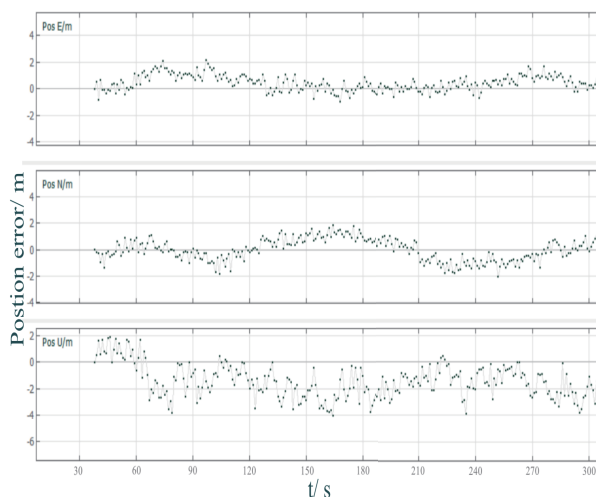


图 9 定位误差曲线

由于软件接收机在没有任何已知辅助信息的情况下启动,即冷启动,在前 30 s 内无法进行 PVT 解算。从图 9 可以看出,在第 35 s,软件接收机成功进行 PVT 解算,每秒输出一个定位位置,并与天线标定位置作差,得出定位误差。其中, U 方向的定位误差最大,均方根为 2.435 m; E 方向的定位误差最小,均方根为 1.038 m; N 方向的定位误差在 E 与 U 方向之间,均方根为 1.521 m。

### 3.5 信号回放

回放系统功能的验证中,首先从信号的频谱验证,使用频谱仪对回放信号进行分析,如图 10 所示。

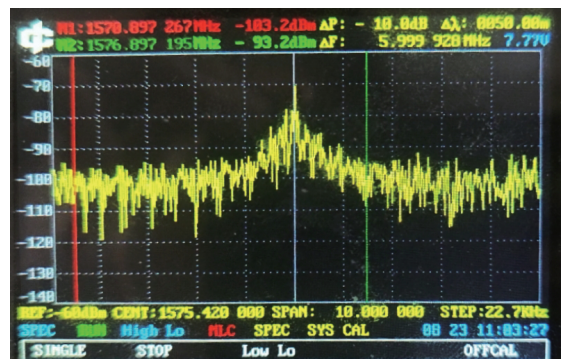


图 10 GPS L1CA 回放信号频谱分析

图 5 和图 10 对真实信号与回放信号分别进行了频谱分析。通过对比两者的频谱图可以看出, GPS L1CA 信号回放的频谱特性与真实信号基本一致,改变频谱仪的观察范围,同样也可以看到 BDS B1I 信号回放的频谱与图 5 真实信号基本一致,从而初步验证了回放系统在功能实现上的正确性。

将回放信号直接发送给司南 K823 接收机进行分析,司南 K823 接收机可以打印捕获到的卫星 PRN 号,经过对比,回放信号与采集信号捕获的卫星 PRN 号一致。使用司南 K823 接收机提取每颗捕获卫星的载噪比( $C/N_0$ )信息后,将原始信号与回放信号的载噪比绘制在图 11 中。

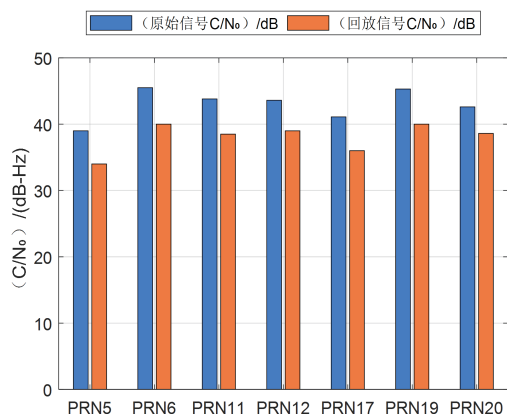


图 11 回放前后载噪比分析

图 11 展示了 GPS L1CA 原始信号与回放信号载噪比的对比情况。可以看出，回放信号相较于原始信号存在一定差距，每颗卫星的载噪比均有所下降。造成载噪比下降的原因包括回放过程数字变频、抽取、内插等环节引入的噪声或干扰。在此次 GPS L1CA 信号采集与回放实验中，采集所采用的参数为：采样率 30 MHz，3 MHz 中频，IQ 采样，载噪比损失约为 5 dB-Hz。

#### 4 结语

本文基于 SoC 芯片和直接射频采样技术，设计出 GNSS 信号采集与回放系统，提供了系统主要的软硬件平台结构设计方案以及数字信号处理的方法。实验结果表明，本系统可以实现对 GPS L1CA 和 BDS B1I 信号的采集回放，配合 Pocket SDR 软件接收机，完成了解调、译码和 PVT 解算，定位精度可达米级。本系统回放的信号在质量上满足导航接收机测试的各项要求，能够真实模拟卫星信号接收环境。同时，系统所保存的基带采样数据为后续的信号捕获与跟踪算法研究提供了高质量的参考样本，为开发高性能、低成本的导航接收机奠定了坚实的技术基础。

#### 参考文献：

- [1] 王海洲. 多星座 GNSS 信号采集与回放系统设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [2] 张涛. GNSS 信号录制与回放设备的研制及应用 [J]. 全球定位系统, 2018, 43(3): 45-50.
- [3] DI R H, PENG S L, TAYLOR S, et al. A USRP-based GNSS and interference signal generator and playback system[C]// Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Piscataway: IEEE, 2012: 470-478.
- [4] 伊国兴, 侯振环, 魏振楠. 基于 MAX2769B 的多系统兼容 GNSS 中频采样器设计与实现 [J]. 导航定位与授时, 2014, 1(3): 52-58.

- [5] CRISTODARO C, RUOTSALAINEN L, DOVIS F. Benefits and limitations of the record and replay approach for GNSS receiver performance assessment in harsh scenarios[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2189.
- [6] LIM C, YOON H, CHO A, et al. Dynamic performance evaluation of various GNSS receivers and positioning modes with only one flight test[J]. Electronics, 2019, 8(12): 1518.
- [7] 于得水. GNSS 中频信号采集器及信号处理平台设计 [D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [8] 彭庆尧, 吴旦昱, 周磊, 等. 一种用于直接射频采样 ADC 的多模式数字下变频器设计 [J]. 电子器件, 2021, 44(6): 1314-1321.
- [9] 蒋琪. 直接射频采样 AIS 信号接收处理技术的研究与实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [10] 杨亮, 郭佩, 秦红磊. 射频直接采样多频 GNSS 信号采集系统的实现 [J]. 电讯技术, 2011, 51(8): 51-55.
- [11] 许磊, 赵胜. 导航信号的射频直接采样方法与实现 [J]. 无线电工程, 2016, 46(6): 45-47.
- [12] 李献斌, 陈建云, 胡梅, 等. 基于 SoC 的软件定义宽带信号采集回放系统设计 [J]. 电子测量技术, 2024, 47(17): 108-114.
- [13] 李停, 郭里婷, 吴林煌. 基于软件无线电的数字上变频系统设计 [J]. 有线电视技术, 2015(3): 46-48.
- [14] 黄静月, 田克纯, 常博学. 一种基于 FPGA 的高效数字上变频的设计与实现 [J]. 电声技术, 2011, 35(9): 27-30.
- [15] 张婉明, 李琦, 李金海, 等. 基于 ARM 与 FPGA 的便携式 GNSS 信号采集回放系统设计 [J]. 电子技术应用, 2016, 42(10): 58-61.

#### 【作者简介】

于嘉杰 (2001—)，男，江西九江人，硕士研究生，研究方向：FPGA 信号处理，email: 121999542@qq.com。

宋剑鹏 (1999—)，男，四川绵阳人，硕士研究生，研究方向：卫星导航在无线时间同步中的应用，email: 3362265276@qq.com。

夏文龙 (1976—)，男，安徽桐城人，博士，副教授，研究方向：无线通信理论与技术，email: xwenlong@scu.edu.cn。

郭庆功 (1967—)，通信作者 (email: guoqingong@scu.edu.cn)，男，新疆伊犁人，博士，教授，研究方向：通信系统智能干扰与防护。

(收稿日期: 2025-07-19 修回日期: 2026-01-15)