

基于开源 SDR 软硬件的 GPS 信号接收系统

康书毓

香港科技大学 (HKUST) 香港 999077

摘要: 本文设计了一种基于开源 SDR (软件定义无线电) 技术的低成本 GPS 信号接收系统, 采用 RTL-SDR 硬件和 GNURadio 软件平台, 实现了 GPS L1 频段信号的捕获、跟踪与定位。该系统通过模块化设计, 实现了信号同步、导航电文解析和位置解算等关键环节, 在开阔地带可实现民用导航级别的定位精度。实验结果表明, 该方案具有成本低、灵活性高的特点, 适用于科研教学及民用导航领域。

关键词: 软件定义无线电 (SDR); GPS 信号接收; RTL-SDR; GNURadio; 低成本定位

引言

传统 GPS 接收技术主要依赖于专用硬件架构实现信号的捕获、跟踪与定位。其核心流程包括: 通过天线单元接收 L1 频段 (1575.42 MHz) 的卫星信号, 经射频前端下变频至中频后, 由专用集成电路完成 C/A 码的串行搜索捕获和载波剥离, 再通过延迟锁定环 (DLL) 和锁相环 (PLL) 实现伪码相位与多普勒频移的精确跟踪, 最终解调导航电文并计算伪距^[1]。这种固定硬件设计虽能保证定位功能, 但存在灵活性差、多系统兼容性不足的缺陷。软件定义无线电 (Software Defined Radio, SDR) 是以计算机技术为依托的无线通信系统, 主要通过软件进行信号处理和通信功能的切换。SDR 使用软件实现硬件的功能, 使得设备的通信不再受制于硬件的发展。与传统的通信方案相比, SDR 具有灵活性强, 开放性强的特点, 可将功能单一的系统转变为通用型系统。因为其捕获和跟踪算法可以通过通用处理器编程实现^[2]。图 1 展示了 SDR 接收机的工作流程, 其中的数字信号处理的部分相比于传统接收机实现了扩大化, 以软件形式完成了模拟电路的诸多功能。本文开发了一套基于开源 SDR 软件 GNURadio 和 RTL-SDR 硬件的 GPS 信号接收系统, 旨在以低成本 SDR 设备实现 GPS 定位功能。

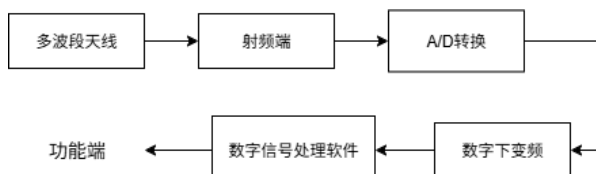


图 1 SDR 接收机工作流程

1 硬件平台 RTL-SDR

RTL-SDR (Realtek Software Defined Radio) 是一款基于 R820T2 调谐器和 Realtek RTL2832U 芯片的低成本软件定义无线电设备^[4], 该设备的 RTL2832U 芯片能够直接输出原始 I/Q 采样数据, 配合开源驱动程序可将其转变为功能完整的 SDR 接收机。图 2 是 RTL-SDR 内部框图, 其工作频率范围覆盖 25MHz 至 1.75GHz, 支持最高 3.2MS/s 的采样率, 并可通过 8 位 ADC 实现信号数字化处理^[5]。作为全球最受欢迎的入门级 SDR 设备, RTL-SDR 凭借不足 20 美元的价格和丰富的生态支持, 广泛应用于业余无线电监听、航空 ADS-B 信号追踪、气象卫星图像接收、短波通信等场景。本文中采用的 RTL-SDR Blog V4 还集成了 TCXO 温补晶振、偏置供电 (Bias-Tee) 等优化设计以提升性能。

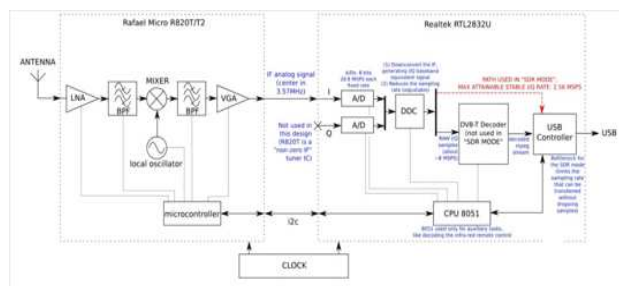


图 2 RTL-SDR 内部框图

2 基于 GNURadio 的 GPS 信号接收平台设计

GNU Radio 是一款自由开源软件定义无线电 (SDR) 平台, 现已成为构建灵活、模块化无线通信系统的核心框架。其核心功能是通过图形化流程图设计工具 (GNU Radio Companion, GRC) 或 Python/C++ API, 将信号源、处理模块和接收器连接成完整的信号处理链路, 支持从基带模拟到实

时射频通信的全流程开发^[7]。内置超过 300 个模块库，涵盖调制解调（如 QAM、PSK）、滤波（FIR/IIR）、频谱分析等数字信号处理功能，并可扩展至 5G、卫星通信等高级应用场景。通过通用软件无线电外设（如 RTL-SDR）等硬件接口，GNU Radio 能实现高达 16MHz 带宽的实时信号收发。其活跃的开源社区持续贡献第三方模块，同时提供详尽的官方文档和教程资源，使其成为教育、科研及商业通信系统开发的重要工具。以下为系统的具体实现过程。

2.1 GPS 信号接收系统软件主体设计

GPS 信号接收系统软件主体部分如图 3 所示，其主要由 osmocom Source 模块、Polyphase Channelizer 模块、sat 模块、Bit_Sync_PRN 模块、Subframe_Decoder_PRN 模块、Position Solver 模块以及 Ephemeris_DB 模块构成完整的 GPS 信号接收处理系统。其中，osmocom Source 模块作为射频前端，通过 RTL-SDR 设备以 2.048MS/s 采样率接收 1575.42MHz 的 L1 频段信号，经 Polyphase Channelizer 进行信道化分路后，四路输出分别接入对应的 sat 模块，随后通过 Bit_Sync_PRN 模块完成位同步，通过 10.24kHz 的比特率输出窗口对 GPS 导航电文进行精确对齐，随后同步后的数据流进入 Subframe_Decoder_PRN 模块解析导航电文，通过前导码检测器识别导航子帧起始位置，并依据帧结构逐字段解析星历参数。每个 Subframe_Decoder_PRN 模块均配置了 PRN 编号，其输出的星历数据通过 ephemeris_out 接口与 Ephemeris_DB 模块交互，最终由 Position Solver 模块结合四个卫星数据，通过伪距解算得到位置信息。

此外，系统还支持将 osmocom Source 模块实现的 RTL-SDR 接收机在线输入改为通过接收机预录制的 GPS 基带信号，或者使用 NASA 数据中心或武汉大学 IGS 数据中心的星历文件，通过 gps-sdr-sim 生成的 GPS 基带信号输入，以及伪卫星信号输入，进一步提高系统的应用范围。

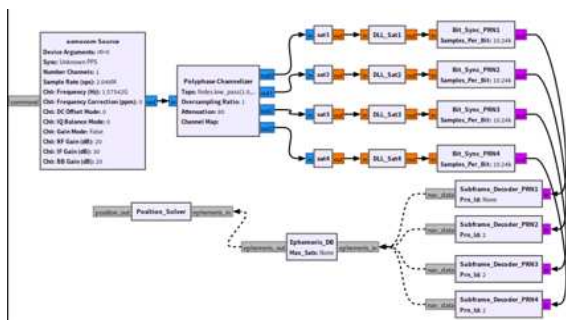


图 3 GPS 接收系统主体处理流程

2.2 同步解调模块 sat 的具体实现

同步解调 sat 模块是一个整合模块，其内部构造如图 4 所示。sat 模块具体由 Frequency Xlating FIR Filter（频率转换 FIR 滤波器）、Rational Resampler（有理重采样器）、Polyphase Clock Sync（多相时钟同步）、Costas Loop（科斯塔斯环）、AGC（自动增益控制）以及 Correlate Access Code - Tag（相关接入码标记器）构成。其中 FIR 滤波器通过混频和滤波实现频偏校正；Rational Resampler 完成采样率转换以适应后续处理；Polyphase Clock Sync 精确调整符号定时消除码间干扰；Costas Loop 采用 10Hz 环路带宽的二阶锁相环恢复载波相位；AGC 动态调节信号幅度保证处理稳定性；Correlate Access Code 通过相关检测标记有效数据帧起始位置；最终处理后的信号输出至后续位同步模块。总体而言，这个模块集成了卫星信号的载波同步、符号定时恢复、自动增益控制以及数据帧定位等功能，构成了 GPS 信号处理链路中从物理层信号调理到数据帧提取的关键环节。

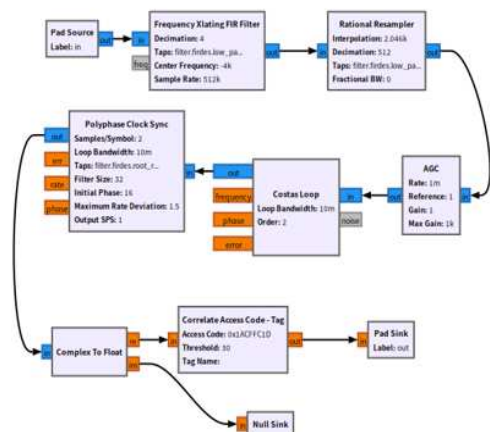


图 4 同步解调模块 sat

3 信号接收结果与测试

3.1 定位结果输出

GPS 基带信号的处理流程在 GNURadio 内部完成，最后通过 python 脚本进行结果输出。输出结果如图 5 所示。可以看到，坐标数值精确到小数点后 14 位，实际定位结果差异在亚米级别，三组坐标之间微小的数值差异反映了接收终端在 5 米范围内的位置，整套输出数据数值连续，满足高精度导航定位的应用需求。

```
latitude=34.20993926568057 longitude=108.90148759702423
latitude=34.21000698570879 longitude=108.90143648210260
latitude=34.20998779025497 longitude=108.90149321694950
```

图 5 输出结果

3.2 定位精度及移动测试

定位精度测试在某住宅区及附近开阔地带进行。在十米范围内取多点进行，将测得坐标与当前位置导入 google map 进行可视化展示如图 6 所示，并将不同环境下的误差结果进行对比如表 1 所示。结果显示，即使在有干扰情况下（如城市多径效应干扰），在多点测试中测量误差均在 10 米以内，符合民用导航定位的需求。

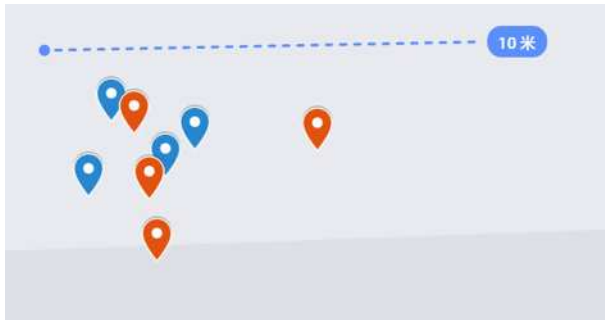


图 6 Google Map 测试结果

表 1 在不同地点的测试误差

	开阔地带	楼顶	城市道路
定位精度 (m)	3.7 ± 1.5	5.5 ± 3	15.3 ± 6.6
漂移误差 (m)	2.5 ± 0.9	6 ± 3.7	7 ± 2.5

4 结论

本文开发了一套基于开源 SDR 技术的低成本 GPS 信号接收系统，利用 RTL-SDR 硬件和 GNURadio 软件平台，实现了卫星信号的捕获、跟踪与定位等基础功能。该系统充分发挥了 RTL-SDR 的低成本、便携性优势，结合 GNURadio 的模块化设计以及可编程特性，构建了完整的 GPS 信号处理链路。测试结果表明，该系统在开阔地带可实现民用导航级别的精度，可满足定位需求。该方案不仅降低了传统 GPS 接收机的硬件成本，还具备良好的可扩展性，未来可适配多

种卫星导航信号。通过优化算法和增强硬件性能，该系统有望在低成本高精度定位、科研教学及多模导航融合等领域发挥更大作用。

参考文献：

[1] BORRE K, AKOS D M, BERTELSEN N, et al. Fundamentals of GPS receivers – a software approach[M]. New York: Springer, 2007.

[2] 刘宇娜, 田小平. 软件定义无线电的应用与发展 [J]. 电气电子教学学报, 2023, 45(3): 161–166.

[3] STEWART R W, CROCKETT L, ATKINSON D, et al. A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 64–71.

[4] VACHHANI K, MALLARI R A. Experimental study on wide band FM receiver using GNURadio and RTL-SDR[C]//2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). Kochi: IEEE, 2015: 1810–1814.

[5] GNU Radio 社区. GNU Radio 官方文档 [EB/OL]. (2023–01–15)[2023–12–01]. <https://www.gnuradio.org/>.

[6] 科创论坛. 多个 RTL2832 同步的可能性 [EB/OL]. (2022–08–10)[2023–12–01]. <https://www.kechuang.org/t/81981>.

[7] MCCASKEY M, FEYDT A, CORRIGAN R, et al. Implementation of a machine learning based modulation scheme in GNURadio for over-the-air packet communications[C]//36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2018). Niagara Falls: AIAA, 2018: 1–7.