

## Linux 下 GNSS 中频信号采集系统及接收机设计

杨宇, 杨长林, 胡建宇, 刘延飞

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

**摘要:** 针对 GNSS 中频信号数据量大、传统数据采集卡成本高昂的问题, 设计了 Linux 操作系统下基于 USB2.0 串行总线和 FPGA 的 GNSS 中频数据采集系统, 完成了相应的软硬件设计。利用状态机控制 CY7C68013A 各端点缓存的读写状态, 完成高速数据传输功能, 通过 FPGA 缓存中频数据有效提高系统数据传输带宽。编制了 Linux 下完整的 GNSS 软件接收机, 实现了基于 QT 的接收机用户界面软件和 Qwt 插件的数据图形化显示窗口。测试结果表明: 数据采集系统的传输速率可达 200 Mbit/s 以上, 在降低成本的同时有效解决了大量数据的传输问题, 软件接收机满足定位精度要求, 具有良好的灵活性和适应性, 而且易于扩展和升级算法。

**关键词:** 全球导航卫星系统; 现场可编程逻辑门阵列; Linux; USB; QT

**中图分类号:** V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0075-04

## Design of GNSS IF Signal Acquisition System and Receiver Based on Linux

YANG Yu, YANG Chang-lin, HU Jian-yu, LIU Yan-fei

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In view of the problem that GNSS intermediate frequency (IF) signal has a large amount of data and the traditional data acquisition card is expensive, a new GNSS IF data acquisition system based on USB2.0 serial bus and FPGA was designed under Linux operating system, and corresponding software and hardware design were accomplished. State machine was used for controlling the read-write status of each endpoint cache in CY7C68013A chip, to accomplish the high-speed data transmission. IF data was cached through FPGA to effectively improve the system data transmission bandwidth. A complete GNSS software receiver was realized under Linux, realizing the receiver user interface software based on QT and the data graphic display window based on Qwt plug-in. The test results show that the transmission rate of this data acquisition system can be up to more than 200 Mbit/s, which effectively solves the problem of mass data transmission while reducing the cost. The software receiver satisfies the requirement for positioning accuracy, with good flexibility and adaptability, and it's easy to expand and upgrade the algorithm.

**Key words:** Global Navigation Satellite System (GNSS); Field Programmable Gate Array (FPGA); Linux; USB; QT

### 0 引言

起源于软件定义的无线电 (SDR) 技术软件接收机相比传统硬件接收机有诸多优势, 近年来已经成为卫星导航领域的重要发展方向之一<sup>[1]</sup>, 而中频信号实时采集系统是软件接收机十分重要的数据来源。由于

全球导航卫星系统 (GNSS) 中频信号数据量比较大, 所以需要设计出高速数据采集系统以满足要求。目前, 成熟的高速数据采集系统以数据采集卡居多, 不仅价格昂贵, 而且需要配备专门的总线接口。文献[2]提出了一种基于新的前端 IC 的 GPS 中频信号采集系统设计方法; 文献[3]设计出了基于 FPGA + DSP 的 GNSS 中频信号采集系统, 但是其数据传输带宽受限, 成本也较高。本文综合利用 FPGA, USB 和 Linux 操作系统的优势设计了 GNSS 中频数据采集系统, 既降低成本又有效提升数据传输带宽。

收稿日期: 2014-06-10

修回日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金 (61201120)

作者简介: 杨宇 (1989—), 男, 湖南湘潭人, 硕士生, 研究方向为智能化仪器仪表。

### 1 GNSS 中频信号采集系统设计

本数据采集系统采用 RX3007 射频前端模块作为中频数据的来源,其参考时钟为 16.368 MHz,能输出 GPS 和 BD2 两路中频信号,数据位宽为 2 bit,中频频率为 4.092 MHz。从这些参数可以看出,就单一的信号体制而言,RX3007 射频前端模块 1 s 输出的中频数据就高达 32 Mbit 以上。

为使采集系统的数据带宽尽量高,本文从 Linux 操作系统、USB2.0 总线和 FPGA 控制和缓存 3 个方面加以考虑和选择。

1) 相比于其他操作系统, Linux 操作系统的稳定性和可靠性高,而且 Linux 内部 GCC 编译器编译链接的 C/C++ 代码具有更高的运行效率<sup>[4]</sup>。更重要的是,在同等硬件条件下, Linux 下能达到的数据采集系统带宽明显大于 Windows<sup>[5]</sup>。另外, Linux 下的 Qt creator 集成开发环境不仅能管理软件代码还能编制功能齐全的软件界面,其强大的跨平台特性亦备受青睐。最后, Qwt 插件提供丰富的图形显示功能,可以方便地显示数据采集系统以及软件接收机产生的中间数据。

2) USB2.0 是目前计算机主流的高速串行接口,具有传输速度快,支持即插即用等特性<sup>[6-7]</sup>,其 480 Mbit/s 的最高传输速度能够轻松满足高速中频信号实时采集的需求;CY7C68013A 是 Cypress 公司主流 USB2.0 接口控制芯片,应用广泛。

3) FPGA 在数字电路设计方面极具灵活性,内部含有丰富的逻辑单元和存储电路,其工作主频也完全满足一般中频信号采集的需求。

在既定的操作系统和硬件条件下,本系统需要固件程序、FPGA 内部数字电路以及 Linux 上位机用户应用程序三大模块相互协调配合才能保证高速数据传输的实现。

#### 1.1 FPGA 内部电路设计

FPGA 内部电路设计的目的是让 CY7C68013A 接口芯片与 FPGA 协调工作,关键在于 FPGA 的数据缓存和逻辑控制功能,以确保在一定时间段内上位机软件因其他原因不能及时读取数据时将数据缓存起来,这样能有效提高数据采集系统的整体带宽。

在 FPGA 内部,中频数据在参考时钟的驱动下,8 个采样数据串转并组合成一个 16 位数据,然后传入定制 FIFO 进行缓存,FIFO 深度足够满足传输要求,并且设置半满标志以检测数据采集过程中是否存在溢出。由于 CY7C68013A 在固件设计时被设定为 slave fifo 工作模式,因此,满足数据采集系统需求的同时也大大简化 FPGA 的控制电路设计,采用带 3 个状态的状态机,

根据 FX2 芯片端点缓存的空满标志来推动状态之间的转换,就可以完成从 FPGA FIFO 到 FX2 的数据传输。图 1 为 FPGA 电路顶层模块原理图。

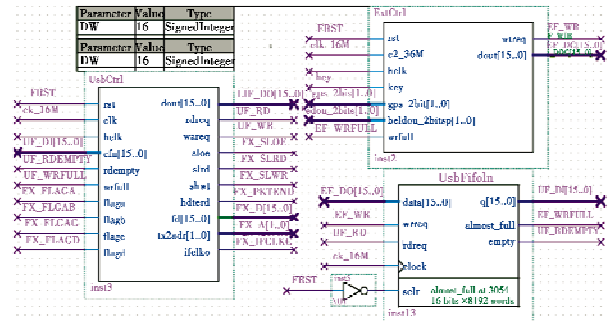


图1 FPGA 顶层模块原理图

Fig.1 Schematic diagram of top-level module in FPGA

图 2 为实际数据采集过程中用 SignalTap II 观察 FPGA 内部信号时得到的结果,empty 为 FX2 芯片端点缓存空满标志,其中,FPGA FIFO 半满标志 almost\_full 一直为低,说明采集过程中没有数据溢出,保证了信号的完整性。

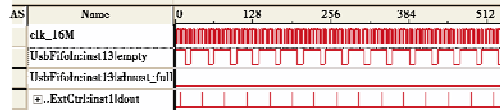


图2 SignalTap II 逻辑分析仪结果图

Fig.2 Results of SignalTap II logic analyzer

#### 1.2 USB 驱动以及 Linux 上位机软件

为满足实际需求必须更改固件框架程序。另外,利用 Linux 集成的 USB 驱动以及 Cypress 提供的 USB2.0 主控芯片固件下载和数据传输 API 开发上位机软件,完成固件下载和高速数据传输功能,其中, Cyusb\_download\_fx2() 完成固件下载功能, cyusb\_bulk\_transfer() 完成数据的块传输。由于数据传输属于 I/O 操作,为此,在进程内部开辟线程专门接收 USB 传来的数据,并且需要在 Linux 的内存空间申请足够大的缓存以尽可能提升数据传输带宽。上位机软件关键代码如下。

```
#include "cyusb.h"
#include <pthread>
static void * reader (void * arg1) {
    r = cyusb_bulk_transfer(...);
}
int main(int argc, char ** argv)
{
    .....
    r = cyusb_open();
    h1 = cyusb_gethandle(0);
    r = cyusb_download_fx2(h1, .....);
    r = cyusb_kernel_driver_active(h1, 0);
    r = cyusb_claim_interface(h1, 0);
    r = pthread_create(...);
}
```

### 2 软件接收机设计

上文搭建的GNSS中频数据采集系统,为软件接收机提供了数据来源。本节介绍软件接收机的设计。以GPS为例,GNSS软件接收机信号处理的基本流程如图3所示。

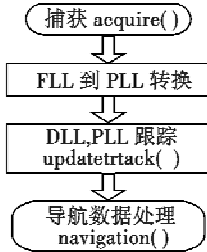


图3 接收机内部信号处理流程  
Fig.3 Signal processing in receiver

#### 2.1 捕获

采用标准并行码相位算法<sup>[8-9]</sup>,运用混合基FFT变换保证捕获结果的准确度,利用4ms数据进行相干捕获提高信号的捕获能力。考虑到中频信号只有2bit采样精度而且本地载波不需要十分精确,为了降低计算量提高计算速度,软件接收机内部不直接进行正余弦函数的计算,而是采用简单的±1相位方式,这样对累加后的相位执行判断指令即可近似地模拟本地载波。本地伪码预先存于内存当中,采用查找表的方式读取。在并行码相位算法给出的结果中计算最高峰值同平均值的比值,当比值大于阈值则可确定可见卫星。捕获结果如图4所示,当比值大于设定的阈值则可以确定可见星,此次捕获共确定9颗可见卫星。

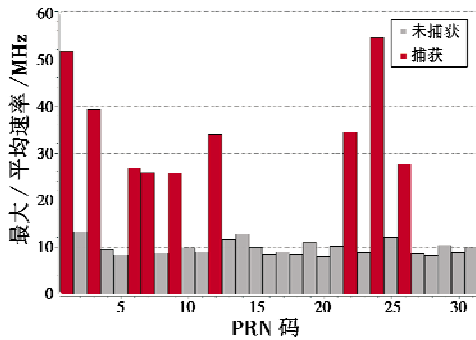


图4 捕获结果  
Fig.4 The acquisition result

#### 2.2 跟踪

捕获之后将各可见星的初始码相位和载波多普勒频率输入各通道,各通道开始对可见星信号进行跟踪。不同的输入信号,不同的跟踪方式,同一跟踪方式下不同的鉴别器设计都对信号跟踪性能有着非常大的影响。由于信号初始捕获精度不高,而且由于接收机和卫星之间相对运动的变化,导致输入信号具有一定的

动态性。因此,为了顺利解调出导航电文,必须对输入信号进行准确跟踪<sup>[10]</sup>。

本设计采用传统跟踪环路<sup>[11-12]</sup>,预检测积分时间为1ms,载波跟踪环路采用二阶FLL辅助二阶PLL的方式,FLL带宽为20Hz,四象限反正切鉴频器,PLL带宽为18Hz,采用二象限反正切鉴相器。码跟踪环路则采用载波辅助的方式以尽可能降低输入信号的动态特性带来的影响,DLL带宽确定为3Hz,内部低通滤波器阶数为2阶,采用超前减滞后码相位鉴别器。跟踪开始后,若连续时间段内信号相关值低于阈值则认为失锁。

### 3 系统整体验证

如图5所示,软件界面分为数据传输和软件接收机两部分,数据传输部分能显示USB设备号和设备描述符,能根据需要下载固件程序到FX2芯片内部RAM,具备高速数据传输功能,将GNSS中频信号采集到上位机存储到指定文件当中。实际测试表明该数据采集系统达到了200Mbit/s。软件接收机部分能通过文字的方式显示捕获到的可见卫星载波多普勒频移、初始码相位、分配的通道号,以及跟踪过程中导航比特的处理结果,又能在弹出的子界面中直观显示软件处理输入信号过程中得到的结果。

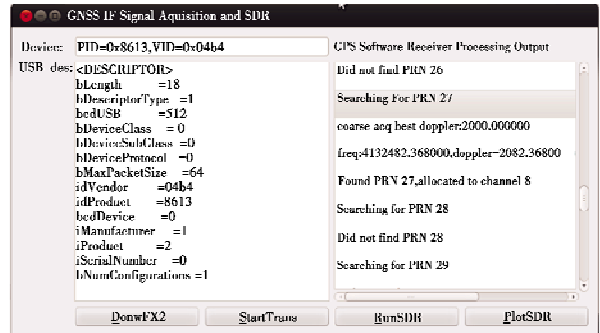


图5 软件界面整体设计

Fig.5 The software interface design

图6显示了单个通道内I支路跟踪即时相关峰,在跟踪开始的最初时间段内,捕获环节得到的载波多普勒频移还存在较大误差,这个阶段主要是FLL在工作。由于FLL对频率跟踪性能良好,载波多普勒频移的误差迅速减小。但是单纯FLL跟踪存在较大误差而难以解调出导航电文,随着频率误差逐渐缩小至零,FLL也因为输入接近于零而逐渐失去作用,因此后续更精确的相位跟踪主要由PLL进行。由图6中可以看出,FLL工作阶段导航数据信息很不清晰,顺利过渡到PLL之后,可以持续以较高精度对输入信号进行跟踪,解调得到了清晰的导航数据,说明本软件接收机的跟踪环路算法设计的正确性。

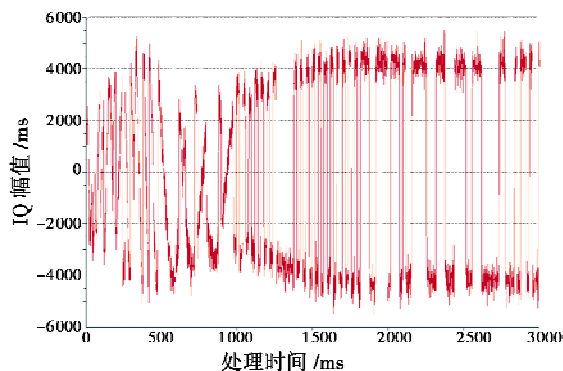


图6 跟踪结果图

Fig. 6 Tracking result

#### 4 结束语

在 Linux 操作系统下,本文完成了从实时中频数据采集到软件处理得到导航定位结果整个过程的软件设计,高速数据采集系统完全满足更大位宽更高采样率的设计需求,软件接收机的捕获和跟踪环路性能良好,而且中间数据能够直观显示。在原有数据采集硬件平台基础上,只需更新软件接收机的配置文件就可以完整采集和处理不同采样率不同位宽 GNSS 中频信号,这说明该系统具有更高的适应性,可扩展性和灵活性,而且纯软件的处理方式能为以后的算法升级以及验证提供可能性。这为下一步实现矢量跟踪型的 GNSS 软件接收机的开发验证打下基础。

#### 参考文献

[1] 贺小军,王绍举,金光. 小卫星平台的多系统 GNSS 软件接收机研究[J]. 空间科学学报,2009,29(1):130-134. (HE X J, WANG S J, JIN G. Research on multi-system software GNSS receiver of macro-satellite[J]. Journal of Space Science, 2009, 29(1):130-134.)

[2] 方琳,谭全福. GPS L1 信号的中频数据采集系统设计[J]. 测控技术,2011,30(11):40-43. (FANG L, TAN Q F. Design of intermediate frequency data acquisition system for GPS L1[J]. Measurement and Control Technology, 2011, 30(11):40-43.)

[3] 赵琳,王野,丁继成. 基于 FPGA 和 USB 的 GNSS 中频信号采集器设计[J]. 遥测遥控,2014,35(2):19-24. (ZHAO L, WANG Y, DING J C. Design of GNSS if signal collection platform based on FPGA and USB[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(2):19-24.)

[4] 范永开,杨爱林. Linux 应用开发技术详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2006. (FAN Y K, YANG A L. Linux application development technology[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006.)

[5] 路永坤. 基于 USB 接口的数据采集模块的设计与实现[J]. 自动化仪表,2005,26(2):35-37. (LU Y K. The design and realization of data acquisition module based on USB interface[J]. Automation Instrumentation, 2005, 26(2):35-37.)

[6] 石鹏. 基于 USB2.0 与 FPGA 的数据传输系统的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012. (SHI P. Research on data transmission system based on USB2.0 and FPGA [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.)

[7] 赵乐森. 基于 FPGA 与 USB2.0 的数据采集与实时处理系统的设计与实现[D]. 青岛:中国海洋大学,2012. (ZHAO L S. The design and implementation of data acquisition and real-time processing system of based on FPGA and USB2.0 [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.)

[8] 李晨,王巍,王珊珊. GPS 软件接收机关键技术研究及实现[J]. 电子设计工程,2012,20(11):47-50. (LI C, WANG W, WANG S S. Research and realization of the key technology of GPS software receiver[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(11):47-50.)

[9] 杨洋. GPS/SINS 深组合导航中的关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013. (YANG Y. Research on the key technology of GPS/SINS deep integration navigation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.)

[10] GLEASON S, GEBRE-EGZIABHER. GNSS applications and methods[M]. Norwood: Artech House, 2009.

[11] KAPLAN E D. Understanding GPS: principles and applications [M]. Norwood: Artech House, 1996.

[12] BORRE K, AKOS D M. A software-defined GPS and galileo receiver[M]. Cambridge: Birkhauser Boston, 2006.

(上接第 56 页)

[11] 张占昭. 大气衰减对激光雷达性能影响的蒙特卡罗模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010. (ZHANG Z Z. The Monte-Carlo simulation of the influences of the atmosphere attenuation for lidar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)

[12] LI X D, YANG H R, WU L, et al. Study of laser scattering effect on bubbles in ocean [C]//Proceedings of SPIE 6150, 2nd International Symposium on Advanced

Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, 2006:615054.

[13] HULST H C V. Light scattering by small particles[M]. New York: Dover Publications, 1981.

[14] 任小红. 激光在近地大气中水平传输特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007. (REN X H. Research on characteristic of laser propagation near earth in atmosphere [D]. Xi'an: Xidian University, 2007.)