

文章编号:1001-893X(2011)08-0051-05

射频直接采样多频 GNSS 信号采集系统的实现^{*}

杨 亮,郭 佩,秦红磊

(北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191)

摘 要:设计了一种多频信号采集系统。系统使用射频直接采样技术,不需混频,对多频信号同时采样。然后进行分路滤波,最后通过以太网对多路信号进行同步采集。该方法不仅使系统结构简单灵活,同时减少了由模拟组件引入的干扰。实验结果表明,系统能够连续地采集多个频带的数据,并通过对“北斗”系统(COMPASS)信号的捕获验证了系统的有效性。

关键词:全球导航卫星系统;射频直接采样;带通采样;多频接收机;软件无线电;以太网

中图分类号:TN911;TN965 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.011

Implementation of a Multi-frequency GNSS Signal Collecting System Based on Direct-RF Sampling

YANG Liang , GUO Pei , QIN Hong-lei

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A multi-frequency signal collecting system is designed. The system uses RF direct-sampling without mixing and samples the multi-frequency signals at the same time. After optical filtering, it collects the multi-frequency signals simultaneously through the Ethernet. This design can not only make the system simple and flexible, but also decrease the interference of the analog components. Experimental results show that the system can continuously collect data from multiple frequencies, which verifies the feasibility of the system by capturing the COMPASS signals.

Key words: GNSS; direct-RF quantization; bandpass sampling; multi-frequency receiver; software defined radio; Ethernet

1 引 言

卫星导航系统是重要的空间信息基础设施,有重要的军事战略意义和显著的经济效益,因此许多国家都在大力发展本国的卫星导航系统。目前主要的导航系统包括美国的 GPS、我国的“北斗”系统(COMPASS)、欧洲的 Galileo 系统以及俄罗斯的 GLONASS 系统。随着各系统逐步实现兼容互操作,同时利用多系统进行导航将有效地减小电离层时延误差,提高定位精度;在有遮挡的区域可以提高导航

的连续性和有效性^[1]。由于各系统工作频段不同,所以为了使用多频信号需要多频接收机。目前,多数民用接收机仅能接收 GPS L1 频段进行定位,因此多频接收机有很高的实用价值和良好的市场前景。传统单频接收机射频前端采用多级混频,当接收多个频段时这种设计将非常复杂。本系统采用射频直接采样技术,避免了对射频信号进行混频,简化了系统结构;增加了系统的灵活性,接收不同频段信号时,只需调整滤波器和采样率;同时减少了由混频器件引入系统的干扰^[2,3]。

^{*} 收稿日期:2011-04-26;修回日期:2011-05-31

本文设计了利用射频直接采样同时采集多频信号的系统,其结构简单灵活,并有利于保证各路信号时延相同。

2 硬件整体设计

本文中多频信号采集系统的工作原理是,用宽频天线接收信号后,首先在射频前端用低噪放大器对信号进行放大、带通滤波,然后对多频信号进行分路滤波。再将滤波后的信号送到高速 ADC 进行采样,然后通过 FPGA 进行缓冲和数据处理(FIR 数字滤波及抽取),并将数据封装成帧结构通过以太网口将其传送到主机上。主机在物理层捕获以太网数据包,分析 MAC 地址后将需要的数据存储在硬盘之中,最后通过软件利用采集到的数据进行定位解算。图 1 为硬件平台的整体结构。

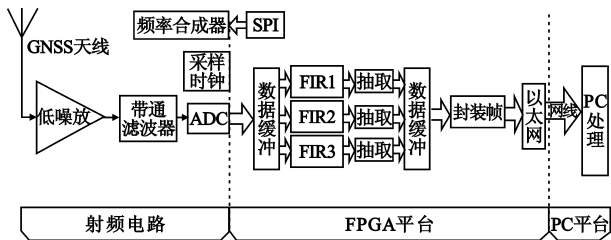


图 1 硬件平台整体结构

Fig.1 The whole structure of hardware platform

2.1 射频前端设计

直接采样的射频前端与传统下变频技术的接收机前端显著区别在于不需要混频。本系统射频前端可以同时接入多频信号,能够在 ADC 之前得到频谱形状如图 2 所示的信号。通带内包括了“北斗”系统 (COMPASS) 的 B1、B2、B3 共 3 个频段的信号。“北斗”系统信号特征见表 1。

表 1 “北斗”系统信号特征
Table 1 The feature of COMPASS signal

信号	频率/MHz	带宽/MHz
B1	1561.098	4.092
B2	1207.140	24.000
B3	1268.520	24.000

前端使用高增益 GNSS 天线接收信号,而后信号经过 LNA 作第一级放大后,经过通带为 1.1 ~ 1.7 GHz 带通滤波,再使用第二级放大器进一步放大。之后射频信号通过功率分路器分为 3 路,对每一路信号针对各自所需频带进行带通滤波、功率放大,之后再次带通滤波,最后将多路信号合并成一路送入 ADC。

ADC 采样的时钟来自于频率合成器输出的时钟。为了满足 ADC 采样对于采样时钟的相位噪声的要求,本设计使用了 10 MHz 的原子钟作为频率合成器输入,通过 FPGA 的 SPI 将频率合成器输出配置成需要的频率。

前端需要将信号放大至 ADC 可以采样的电平,对于 ADC08D500,1 bit 量化的信号最小输入能量是 -47.92 dBm。接收到的卫星导航信号能量约为 -141 dB,GNSS 天线的增益为 50 dB,两级 LNA 增益共约 35 dB,PA 增益 20 dB,前端总插入损耗约为 20 dB,使用前端的增益足够对信号采样。

射频前端结构如图 3 所示。

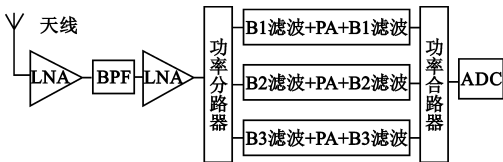


图 3 射频前端结构

Fig.3 The structure of radio front - end

该设计有如下优点:

- (1) 只需调整滤波器和采样率即可接收任意所需的多频信号,系统灵活性高,适应性强;
- (2) 通过宽频天线将同时接收各频带信号以及将各路信号合为一同时送入 ADC,最大限度地保证了进入系统的所有信号有相同的时延;
- (3) 进行多级带通滤波,尽可能地将带外噪声滤除,防止采样后噪声混入信号频带;
- (4) 第一级放大器使用了噪声系数很小的 LNA,保证多级放大器有较小的总噪声系数,这是因为根据式(1),多级放大器的第一级的噪声系数 F_1 对总

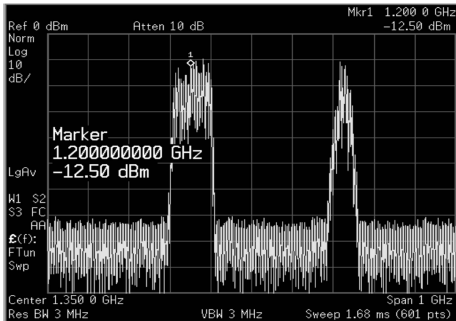


图 2 ADC 采样前信号频谱

Fig.2 The signal spectrum before ADC sampling

的噪声系数 F_T 起决定性作用。

$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \cdots + \frac{F_N - 1}{G_1 G_2 \cdots G_N - 1} \tag{1}$$

2.2 基于射频直采多频系统采样率的选择

射频直接采样是一种软件无线电技术,系统不用混频器对信号进行下变频,直接对射频信号进行采样,极大地简化了系统结构,为接收多频信号提供了必要条件。由于直接采集的射频信号频率非常高,使用奈奎斯特采样率将非常不合实际,因此多频信号采集系统采样率的选择是一个关键问题。

在系统设计中,使用带通采样定理对射频信号进行采样。根据带通采样定理,采样率将只与信号带宽有关,与载波频率无关,这将使采样率大大降低。采样后系统需要保证各频带信号既不能与自身混叠也不与其它频带信号混叠,同时还要避免因采样率过高导致数据处理负担过重。

根据带通采样定理,采样率最低应不小于两倍的信号带宽,所以对于多频系统采样率 F_s 最基本的要求是不低于各频带带宽和的两倍,即:

$$F_s \geq 2(B_1 + B_2 + \cdots + B_N) \tag{2}$$

采样后的中频 F_{IF} 可通过下式计算:

$$\text{fix}\left(\frac{F_C}{F_s}\right) = \begin{cases} \text{even, } F_{IF} = \text{rem}(F_C, F_s) \\ \text{odd, } F_{IF} = |F_s - \text{rem}(F_C, F_s)| \end{cases} \tag{3}$$

式中, $\text{fix}(a)$ 表示取 a 的整数部分, F_C 表示载波频率, $\text{rem}(a, b)$ 表示 a 对 b 取余。式(3)提供了一种计算带通采样后中频的方法。

为保证采样后信号不与自身发生混叠,必须满足式(4)和式(5)所示的限制条件:

$$0 < F_{IF} - \frac{B_l}{2} \tag{4}$$

$$F_{IF} + \frac{B_l}{2} < \frac{F_s}{2} \tag{5}$$

此外,对于 N 个频带的接收机,为保证采样后每一个频带的信号不与任何其它频带信号混叠,还需满足:

$$|F_{IF_b} - F_{IF_a}| \geq \frac{B_{l_b} + B_{l_a}}{2} \tag{6}$$

式中, $a = 2, 3, \cdots, N, b = 1, 2, \cdots, a$ 。

在满足约束条件的范围内选取采样率,即可保证采样后的信号不发生混叠^[4]。

这里需要特别注意的是,约束条件是在假设各

窄带滤波器均具有尖锐截止特性,即滤波器的通带带宽与信号带宽近似相等的情况下给出的。

而限于原件工艺水平,目前所使用的射频窄带滤波器的通带带宽明显大于信号带宽。因此在使用约束条件时,带宽参数应使用滤波器实际的通带带宽,才能保证通带内噪声不被混叠到信号频带内而影响信号质量。

总结起来,多频系统采样率选取步骤如下:

(1)根据窄带滤波器通带带宽计算采样率限制条件;

(2)在限定范围内,找到满足条件的最低采样率;

(3)适当提高所选用的采样率,使各频带信号完全分开并防止滤波器通带内噪声混入信号频带,从而提高系统性能。

通过以上步骤,对于“北斗”系统(COMPASS)B1、B2、B3 3 个频段,选取 325 Msample/s 的采样率即可满足要求。

2.3 FPGA 数据处理

FPGA 数据处理模块的作用在于生成 FIR 将 ADC 输出的信号进行数字滤波,分出各路信号,其中提高 FIR 处理速度和降低各路采样率是两个关键问题。

FPGA 首先将 ADC 输出的信号即低压差分信号通过内置宏转换成单路信号,然后送入 FIR 分别对各频带信号进行数字滤波。

在设计 FIR 时,本文使用了分布式算法。由于 FPGA 进行乘法运算需要的时间远大于加法运算需要的时间,因此减少乘法运算可显著减少系统运算时间。分布式算法巧妙完美地将固定系数的乘累加运算转换成查找表(LUT)操作,尽量避免乘法运算。查找表后的数据执行的都是简单的加法运算,可以提高运算速度。系统响应表达式为

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \tag{7}$$

式中, $h(n)$ 是传递函数, $x(n)$ 为输入信号, $x(n)$ 可以表示为

$$x(n) = \sum_{b=0}^{B-1} x_b(n) \cdot 2^b, x_b(n) = 0, 1 \tag{8}$$

式中, $x_b(n)$ 表示 $x(n)$ 的第 b 位, $x(n)$ 也就是 x 的第 n 次采样。而卷积表达式也可以表示为

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \cdot \sum_{b=0}^{B-1} x_b(n) \cdot 2^b \tag{9}$$

式(9)进行分别求和可得:

$$y(n) = h(0)(x_{B-1}(0)2^{B-1} + x_{B-2}(0)2^{B-2} + \dots + x_0(0)2^0) + h(1)(x_{B-1}(1)2^{B-1} + x_{B-2}(1)2^{B-2} + \dots + x_0(1)2^0) + \dots + h(N-1)(x_{B-1}(N-1)2^{B-1} + x_{B-2}(N-1)2^{B-2} + \dots + x_0(N-1)2^0) = (h(0)x_{B-1}(0) + h(1)x_{B-1}(1) + \dots + h(N-1)x_{B-1}(N-1))2^{B-1} + (h(0)x_{B-2}(0) + h(1)x_{B-2}(1) + \dots + h(N-1)x_{B-2}(N-1))2^{B-2} + \dots + (h(0)x_0(0) + h(1)x_0(1) + \dots + h(N-1)x_0(N-1))2^0 \tag{10}$$

上式可写成简洁公式:

$$y = \sum_{b=0}^{B-1} 2^b \cdot \sum_{n=0}^{N-1} h(n)x_b(n) = \sum_{b=0}^{B-1} 2^b \cdot \sum_{n=0}^{N-1} f(h(n), x_b(n)) \tag{11}$$

函数 $f(h(n), x_b(n))$ 所指的就是利用一个查找表实现映射,预先设定程序的查找表接收 1 个 n 位输入向量 $X(b) = (x_b(0), x_b(1), \dots, x_b(N-1))$, 输出为 $f(h(n), x_b(n))$, 各个映射都由相应的二次幂加权并累加,最后得到一次滤波的结果。由此可见,DA 算法的处理速度仅与输入的位宽有关,利用查找表(LUT)避免了大量的乘法运算,从而大大提高运算速度。

ADC 进行高速采样后,输出数据率将非常大,会为后续的数据传输和处理带来极大的困难。单独对其中任意一个频带来说,保证自身频段信号不混叠,如此高的采样率是不必要的,因此使用抽取来降低每一路的采样率。

抽取是把原始的采样数据每 M 采样点各取一个生成新的采样序列,其中 M 为大于 1 的整数,称为抽取因子。在这一过程中,我们仍要求信号的频谱不会混叠。这样等效信号的采样周期增大为原来的 M 倍,而采样频率相应为原来的 $1/M$ 。这种处理在 FPGA 中是可以实现的,通过 PLL 将 FIR 的时钟分出不同的频率,如 F_s/M ,用这个频率接收 FIR 输出的数据,即可以完成数字信号 M 倍的抽取,抽取后将大大减少数据量,降低处理难度。

对于 GNSS 信号,超过 2 bit 量化对信噪比的改善作用不是很明显,太高的量化位数只会增加数据处理的困难。因此本设计对滤波后的数据进行截位处理,最终只截取 1 bit 进行保存。这将进一步减轻了计算平台的负担,为后续的实时定位解算打下了坚

实的基础。

2.4 以太网数据传输

为了能满足高速数据上传的需求,本设计使用千兆以太网将 FPGA 处理过的各路数据上传 PC 进行定位解算。使用以太网传送数据的关键问题是将数据按以太网帧格式封装成帧。

千兆位以太网的理论速度达 1 000 Mbit/s,能够满足数据传输的需要,而且 FPGA 开发工具自带了 Ethernet MAC IP 核。因此,本设计采用千兆以太网进行数据的传输。

另外,千兆以太网的参考时钟是 125 MHz,输入数据时钟是根据抽取时钟而定的,这样两个不同时钟域的数据交换需要使用异步 FIFO 进行缓冲处理,将接收到的数据按整字节传到 EMAC 核。其结构如图 4 所示。

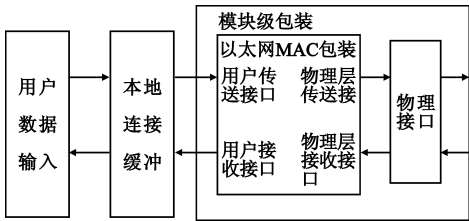


图 4 EMAC 核的结构
Fig 4 The structure of EMAC core

千兆以太网数据帧的包头首先是 8 byte 的前导码(7 byte 原语和 1 byte 帧起始),然后是 6 byte 的目的 MAC 地址和 6 byte 的源 MAC 地址,之后是 2 bit 的协议类型或数据包长度,中间是 46 ~ 1 500 byte 的数据内容,以及 4 bit 的校验位,如图 5 所示。

原语 7 byte	帧界 定符 1 byte	目的 地址 6 byte	源地址 6 byte	数据 0 ~ 1 500 byte	填充 0 ~ 46 byte	校验 4 bit
--------------	--------------------	--------------------	---------------	-------------------------	----------------------	-------------

图 5 标准以太网帧结构
Fig.5 The structure of standard Ethernet frame

基于 EMAC 核实现满足以太网网络协议的数据报文包括数据输出缓冲、添加 MAC 地址、添加前导码和 FCS 校验 4 个步骤。最终经过 MAC 封装以后,整个数据报文的长度为 64 ~ 1 518 byte。

设计时设置每个数据帧除了帧头信息以外有 1 024 byte 的数据,正好是 1 kbyte,这样可以方便观察数据包是否出错和衡量整体数据传输完整性。此外,通过以太网封装帧给不同频点信号赋予不同的 MAC 地址,从而主机捕获时可以通过识别 MAC 地址的方法,将三路数据进行分类存储。

3 实验分析

实验中,通过对“北斗”系统 (COMPASS) 卫星信号进行采集,验证了系统各部分设计的正确性并成功地捕获了卫星信号。

3.1 分布式算法效率的验证

实验中使用 96 阶 FIR,输入信号位宽 8 bit,通过调用 FIR compiler 配置向导可以对 FIR 使用分布式算法,计算延迟时间明显小于传统卷积算法,因此使用分布式算法有效提高了计算效率。表 2 列出了两种算法所需的时钟周期延迟。

表 2 FIR 两种算法的时钟周期延迟 Table 2 The cycle latency of two FIR algorithms	
FIR 算法	所需延迟
分布式算法	11 个时钟周期延迟
卷积算法	55 个时钟周期延迟

3.2 以太网传送数据可行性验证

实验中,对于“北斗”系统 (COMPASS),ADC 采样率设置为 325 MHz,经过 FIR 滤波后 B1 按 32 倍抽取,B2、B3 按 6 倍抽取,各路均按 1 bit 量化,输出数据率约为 118 Mbit/s。因此,根据表 3 可知千兆以太网速率满足要求。

表 3 以太网速率与系统输出速率 Table 3 The Ethernet rate and system output rate	
类型	速率/(Mbit/s)
千兆以太网速率	1 000
系统输出速率	118

3.3 多频采集系统整体功能验证

使用捕获算法对采集到的数据进行处理,捕获到的信号产生尖锐的相关峰,并且噪底平坦。由此可见,本文设计的系统可以有效地接收多频卫星导航信号。图 6 为 B1 的捕获结果。

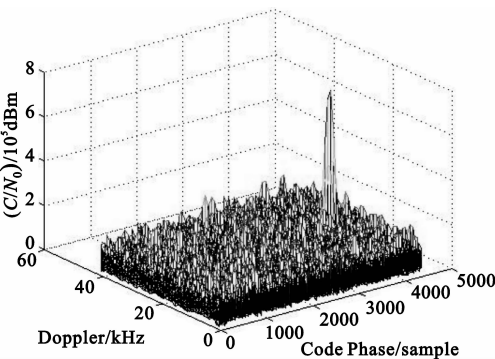


图 6 B1 信号捕获结果
Fig.6 The capturing result of B1

4 结 论

本文介绍了使用基于射频直接采样的多频 GNSS 数据采集系统的设计实现方法,提供了系统主要的硬件平台结构设计方案,以及数字信号处理的方法,同时对多频接收系统采样率的选择和射频前端设计这两个关键技术进行了详细阐述。实验表明,本系统可以实现对多频卫星导航信号的采集。该系统在灵活性和可扩展性方面都要优于传统的下变频采集系统,具备很好的通用性。随着各国导航系统的不断完善,尤其是我国“北斗”系统的蓬勃发展,多频接收机将充分显示出利用多频多系统的优势,从而成为发展的趋势。

参考文献:

[1] Thor J, Akos D M. A Direct RF Sampling Multifrequency GPS Receiver[C]//Proceedings of 2002 IEEE International Symposium on Position Location and Navigation. Palm Springs, USA; IEEE, 2002:44 – 51.

[2] Psiaki M L, Powell S P, Hee Jung, et al. Design and practical implementation of multifrequency RF front ends using direct RF sampling[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(10): 3082 – 3089.

[3] Rivera Parada E, Chastellain F, Botteron C, et al. Design of a GPS and Galileo Multi – Frequency[C]//Proceedings of the 69th Vehicular Technology Conference. Barcelona, Spain; IEEE, 2009:1 – 5.

[4] Tian Yonghua, Zeng Dazhi, Zeng Tao. Design and Implementation of Multi – frequency Front End Using Bandpass Over Sampling[C]// Proceedings of International Radar Conference. Guilin: IET, 2009:1 – 4.

作者简介:

杨 亮(1988—),男,天津人,2010 年获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为软件无线电、卫星导航;
YANG Liang was born in Tianjin, in 1988. He received the B.S. degree in 2010. He is now a graduate student. His research interests include software radio and satellite navigation.
Email: ok.star@163.com
郭 佩(1986—),男,湖北鄂州人,硕士研究生,主要研究方向为卫星导航、电路设计;
GUO Pei was born in Ezhou, Hubei Province, in 1986. He is now a graduate student. His research interests include satellite navigation and circuit design.
秦红磊(1976—),男,山东临清人,副教授、硕士研究生导师,主要研究方向为卫星导航、组合导航以及电子设备自动测试系统。
QIN Hong – lei was born in Linqing, Shandong Province, in 1976. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research interests include satellite navigation, integrated navigation and automatic test system of electronic equipment.