

基于 GNU Radio 的 230 MHz 多通道主站电台的设计

闫龙¹, 王智海², 祁兵¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 鞍山市供电公司, 辽宁 鞍山 114004)

摘要: 采用 GNU Radio 技术及其配套的硬件前端 USRP 设计和实现了 230 MHz 软件无线电多通道主站电台。该主站电台在调制方式上与现有无线电台设备全面兼容, 覆盖了整个电力系统 230 MHz 全双工频段, 可以同时多个频点以不同的速率和调制方式与不同制式的从站电台进行双工通信。所提出的方案可以充分利用 230 MHz 无线频率资源, 增加终端接入数量, 提高通信系统组网的灵活性和可靠性, 同时有效降低维护和升级的成本。

关键词: GNU Radio; USRP; 无线数传电台; 软件无线电

Design of 230 MHz radio communication master station based on GNU Radio

YAN Long¹, WANG Zhi-hai², QI Bing¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Anshan Power Supply Company, Anshan 114004, China)

Abstract: A multi-channel master radio station is designed and realized with GNU Radio and its associated device Universal Software Radio Peripheral(USRP) in this paper. The master radio station is all-around compatible with existing radio stations, covering 230MHz full-duplex frequencies, running at multi-frequencies simultaneously and carrying on full-duplex communications in different rates and modulation modes. The solution in this paper can take full use of the 230 MHz wireless frequency resource, increase the terminal access number, improve the reliability and flexibility of the communication system, and effectively decrease the cost of maintenance and upgrade at the same time.

Key words: GNU Radio; USRP; wireless communication radio; software defined radio

中图分类号: TN924

文献标识码: B

文章编号: 1674-3415(2010)09-0100-05

0 引言

230 MHz 无线电台通信系统在电力负荷管理系统和用户用电信息采集系统中有着广泛的应用。然而, 随着无线通信技术的发展, 在不同时期投入应用的无线电台, 虽然基本结构类似, 但调制方式、波形结构、调制速率都有较大差别, 不同的设备占用不同频段单独组网, 独立运行, 十分不利于系统的维护, 而且, 随着对高速通信电台设备需求的增加^[1], 使得通信系统结构更加复杂。

为了解决上述问题, 本文基于 GNU Radio 系统提出了一种多信道、多传输速率、多调制方式的软件无线电多通道主站电台的系统结构。该系统在调制方式上与现有的无线电台设备全面兼容, 覆盖整个电力系统 230 MHz 全双工频段, 可以同时多个频点运行, 以不同的速率、调制方式进行通信, 很好地保证了现有业务的正常运营。此外, 基于软件

无线电的系统具有极强的可配置性, 为将来的业务拓展和设备升级提供了可靠保障, 降低了系统的维护和升级成本。

1 230 MHz 无线通信系统分析

230 MHz 无线通信系统由主站电台和从站电台组成, 主站采用全双工电台, 从站采用半双工电台。无线电管理委员会将 230 MHz 频段的 15 对双频频点分配给电力系统专用^[2], 频点分配如表 1 所示。每个频点带宽为 25 kHz, 相邻频点间隔为 50~150 kHz, 15 个接收/发送频点总带宽约为 2 MHz, 上下行频率间隔为 7 MHz。

目前电力行业中使用的大部分是模拟调频电台, 电台内增加调制解调模块后进行数据传输。早期的低速电台采用 FSK, MSK 等调制方式, 传输速率为 600~2 400 bps; 高速电台采用 GMSK 调制方式, 实现 9 600 bps 的信号收发。此外, 部分地区运

行着 230 MHz 频段的 Mobitex 系统, 它直接采用 GMSK 调制, 避免了第二级 FM 调制对信道资源的

浪费, 仅占用 12.5 kHz 的射频带宽, 实现了 8 kbps 数据传输。

表 1 230 MHz 频点分配表

Tab.1 Table of frequency allocations in 230 MHz

编号	主站发射频点	主站接收频点	编号	主站发射频点	主站接收频点
1	230.525	223.525	9	231.225	224.225
2	230.675	223.675	10	231.325	224.325
3	230.725	223.725	11	231.425	224.425
4	230.850	223.850	12	231.475	224.475
5	230.950	223.950	13	231.525	224.525
6	231.025	224.025	14	231.575	224.575
7	231.125	224.125	15	231.650	224.650
8	231.175	224.175			

2 GNU Radio 主站电台总体设计

GNU Radio 系统是一种运行于通用处理器 (GPP) 上的开放的软件无线电平台, 并配以 USRP (Universal Software Radio Peripheral) 作为硬件射频前端。GNU (GNU's Not Unix) 是一个推进软件开源代码的著名项目, 由 FSF (Free Software Foundation) 提供支持。GNU Radio 运行于 Linux 操作系统, 其软件代码和硬件设计完全公开, 其设计的核心思想是: 基带信号处理过程由通用处理器而不是 DSP 实现; 基带信号通过 USB 2.0 接口与 USRP 系统相连, 由 USRP 上的 FPGA 实现数字上下变频, 然后通过 AD/DA 芯片与射频子板连接; 覆盖不同频段的射频子板将模拟信号变换到射频进行信号收发。

本文设计的多通道主站电台系统的系统结构如图 1 所示, 由基带信号处理部分、USRP 主板、230 MHz 射频子板三个部分组成。

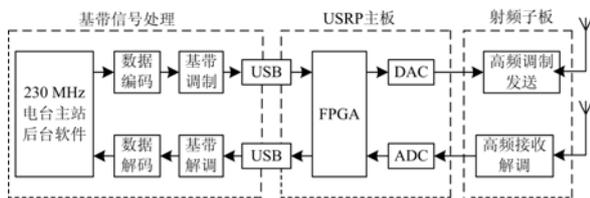


图 1 GNU Radio 软件无线电电台系统结构

Fig.1 Structure of GNU Radio system

(1) 基带信号处理部分

基带信号处理部分包括数据缓存、编解码、调制解调等模块。这部分的主要工作是基带信号处理模块和信号收发流图 (Flow Graph) 的设计。此外, 可使用 WxPython 跨平台 GUI 工具库编写人机交互

界面, 采用 MySQL 作为数据库系统。

(2) USRP 主板

USRP 主板实现了信号的中频处理, 主要为数字上下变频操作。板载 FPGA 芯片采用了 Altera 公司生产的 Cyclone 系列芯片 EP1C12Q240C8, 设计开发工具为 Quartus II 7.2, 各模块逻辑采用 Verilog 语言描述。

(3) 230 MHz 射频子板

目前 USRP 配套的全双工子板没有覆盖到 230 MHz 频段, 本文根据 USRP 主板与子板连接的接口说明, 设计了收发频率覆盖 200~250 MHz 的射频子板。同时, 由于子板输出功率过小, 发送信号需外接至大功率天线设备输出。

3 GNU Radio 主站电台基带信号处理

GNU Radio 的基带信号处理编程基于 C++ 和 Python 脚本语言的混合方式。C++ 执行效率较高, 用于编写各种底层信号处理模块。Python 是一种新型的脚本语言, 用来编写连接各个信号处理模块的脚本, 最终使之成为完整的信号收发流图。

3.1 GNU Radio 基带信号处理模块设计

GNU Radio 提供一个基带信号处理的底层模块库, 含有 100 多种信号处理模块, 如: 滤波器, FFT 变换、调制解调器、时频同步模块等^[3]。

本系统同时支持多种无线通信电台, 而不同电台的调制方式、信号速率可以不相同。通过分析可知, 电台系统中基带信号所用的数字调制方式如 FSK、MSK、GMSK 等均属于恒包络调制方式, 这些信号都可以通过 FM 调制器输出。

下面以 GMSK 调制模块为例简要说明 GNU Radio 信号处理模块的实现原理及实现方法。

从 Python 的角度来讲, GNU Radio 提供了一种

信号流图的抽象，用户可以方便地使用底层信号处理模块连接各种通信模块，最终组成完整的无线通信系统。首先从 `gnuradio` 包中导入 `gr` 和 `modulation_utils` 模块，并在 `__init__()` 方法的参数中定义模块中每符号的采样点个数、BT值和程序调试接口等。定义完这些参数之后，方法调用其父类 `gr_hier_block2` 的 `__init__()` 方法设定该模块的输入输出接口类型，本模块输入为要传输的数据字节，输出为 GMSK 的调制波形。

GMSK 调制模块由三个底层信号处理模块构成，分别是字节到 NRZ 编码变换器，高斯滤波器和 FM 调制器（FM 调制器模块需自行编写，系统提供的 FM 调制器输出为复采样信号，本调制器输出为实采样信号）。配置好这些模块之后，调用 `connect` 函数将这些模块连接，就形成了新的 GMSK 调制模块。其结构图如图 2 所示。其他调制方式如 FSK、MSK 调制模块与之十分类似，不再赘述。

通过 Python 语言构造信号处理模块非常灵活，大幅提高了代码的复用度。但由于底层模块库并不完备，在执行某些数据处理时还需采用 C++ 语言编写对应的底层模块，如纠错编码、多相滤波发送、多相滤波接收等，编写底层模块的具体方法可参考文献[4]。



图 2 GMSK 模块结构框图
Fig.2 Diagram of GMSK block

3.2 基带信号收发流图设计

本系统同时覆盖了 230 MHz 频段的 15 个双工频点，如果将这 15 个支路的信号分别通过独立的载波调制解调，系统将过于复杂。因此，本文采用了信道化收发机的系统结构，即一部收发机同时处理信道带宽内所有信道上的信号。

图 3 是主站电台信道化发射机基本调制原理框图。基带信号的处理分为了两部分工作：

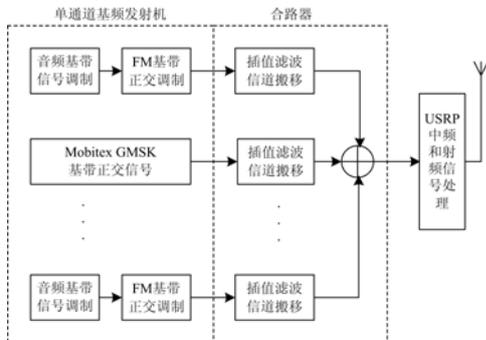


图 3 主站电台调制框图
Fig.3 Modulating diagram of master radio station

第一步是由 N 个单通道基频发射机产生 N 个基带数字信号。对于普通数传电台，首先根据不同的基带调制方式（FSK、MSK、GMSK 等）输出基带信号，再由 FM 基带正交调制器进行复合调制，调制完成后的基带信号数字谱带宽为 25 kHz。对于 Mobitex 电台，直接输出速率为 8 kbps 的 GMSK 基带正交信号，数字谱带宽为 12.5 kHz。

第二步将调制完成的各路基带信号进行插值滤波，并分别根据各路占用的不同频点，用移频因子 $e^{j\omega_k t}$ 搬移到虚频点 ω_k （即射频频点相差 230MHz 的基带频点）处，最后将所有支路上的信号整合，得到覆盖 0~2 MHz 的整合基带信号，其频谱结构如图 4 所示。在具体实现时，本文采用了基于多相结构的信道化发射机模型以提高计算效率和实时处理能力，实现细节请参阅文献[5]。

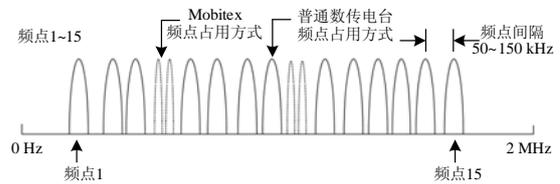


图 4 整合基带信号频谱结构
Fig.4 Spectrum structure of base band

合路器输出的整合基带信号的复采样频率为 6 MHz，精度为 8 bit，这样每个复采样点占据 2 个字节，通过 USB2.0 接口传输到 USRP，双向收发占用的 USB 带宽为 24 MByte/s。在 USRP 中，基带信号再通过插值和滤波变换为固定速率的中频信号并送到 D/A 转换器转换为模拟信号，最后在射频子板转换为射频信号发射。

4 USRP 主板 FPGA 配置

USRP 主板上可支持两路信号并行收发，结构框图如图 5 所示，本文中只使用其中一路。FPGA 芯片处于 USRP 主板中的核心位置，内部逻辑通过 Verilog 语言描述。它的主要功能是将 ADC 采来的中频信号进行数字下变频（DDC），并将基带信号进行插值滤波、速率匹配、输出到 DAC 进行数字上变频（DUC），同时还要控制子板信号收发，适配各路 ADC，DAC 与 PC 机之间的数据交换。

USRP 提供了标准系统的 Verilog 代码供用户使用，但需要针对不同的信号带宽，信号精度和外插子板情况对 Verilog 文件进行改写并重新编译后，下载到 FPGA 中运行。

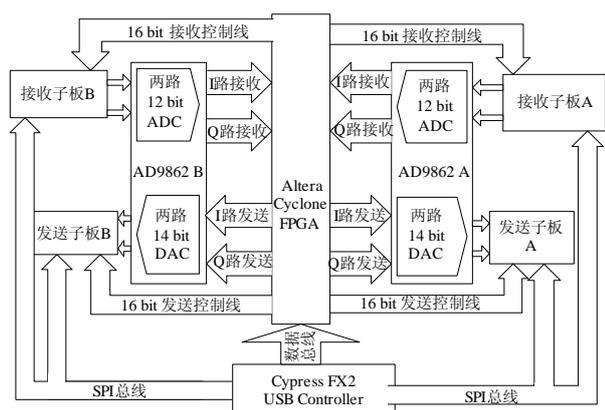


图5 USRP主板系统结构框图

Fig.5 Diagram of USRP block

本系统中, AD采样输出的数据为两路12 bits、64MSample/s的正交中频信号, FPGA要首先对其中有用的信号进行下变频。

数字下变频的第一步是对信号进行混频, 这部分主要由乘法器和DCO组成。USRP采用坐标旋转数字计算(CORDIC)算法生成正弦和余弦信号^[6], 与常规的查表法不同, CORDIC算法不占用存储器空间, 仅使用移位寄存器和加法器就可产生正余弦信号, 具有很好的NCO的精度。

数字下变频的第二个环节是对混频后的信号进行抽取滤波, 以便降低软件解调的计算复杂度。USRP使用了由一个4级CIC抽取滤波器和一个31阶半带滤波器组成的混合滤波器结构。CIC滤波器为整数系数滤波器, 滤波时无需乘法运算, 而半带滤波器有一半系数为零, 这样在滤波时大大减少了计算量^[7]。滤波的同时, 在CIC滤波器实现了4倍的数据抽取, 在半带滤波器实现了2倍的数据抽取, 这样就得到了带宽为2MHz的两路8 bits, 8MSample/s的正交基带信号。

对于发送信号, FPGA将USB传输的低速率基带信号进行插值并滤波, 变换为32MSample/s的采样信号并输出到DAC单元的数字上变频模块中, 最终以两路14 bits, 128MSample/s的速度转换为模拟信号。

5 230 MHz 射频子板的实现

USRP的子板有很多种规格, 分别针对了基带信号处理、广播电视接收、移动通信信号处理等领域。但由于在230MHz频段没有可用的全双工子卡, 本文根据USRP与子卡的接口说明, 设计了针对230MHz频段应用的全双工子卡, 实现信号收发。其硬件实现结构如图6所示。

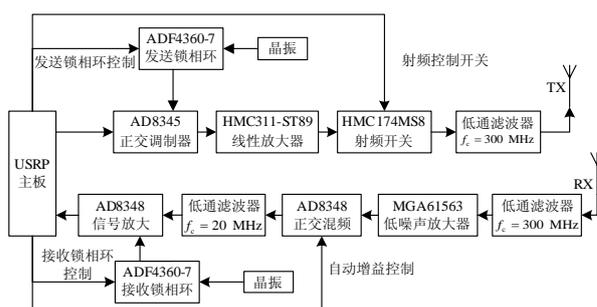


图6 230 MHz 子卡硬件结构

Fig.6 Hardware structure of 230 MHz daughter board

230 MHz子板采用AD8345和AD8348分别作为调制器和解调器。AD8345是ANALOG DEVICES公司推出的正交调制器, 其工作频率为140~1000MHz, 在数字通信系统中可用作中频调制器或直接上变频器。AD8348是ANALOG DEVICES公司推出的正交解调器, 其工作频率为50~1000MHz, 解调带宽75MHz, 内部集成中频可变增益放大器。

AD8345和AD8348输入的本振频率是两块ADF4360-7锁相环输出的, 本振频率分别为460MHz和446MHz。460MHz的信号在ADF4360-7内部二分频输出至AD8345, 446MHz信号在AD8348内部进行二分频。芯片内部VCO的中心频率设为460MHz, 这个中心振荡频率值是由外部电感设置的, 它们之间的对应关系为:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi[6.2\text{pF}(0.9\text{nH} + L_{\text{EXT}})]^2} \quad (1)$$

通过计算可得, 外部电感的值为3.84nH。子板系统中晶振输出的参考频率为10MHz, 通过SPI总线控制配置ADF4360中的14位R计数器值为200, 再配置N计数器数值, 就可以以50kHz的步长, 覆盖420~500MHz的频率范围。

此外, 由于USRP的板载电源功率过小, 子板的天线接口只能提供了100MW的功率输出, 而一般的230MHz主站电台的功率为15W左右, 因此, 还需要在另外加装高增益的外接天线。

6 结束语

本文提出了一种基于GNU Radio的多速率、多种调制方式、多信道的软件无线电主站电台的系统结构。该系统基于通用硬件平台, 成本较低, 既充分的利用了现有的无线电台资源, 实现多种电台的全面兼容, 又为将来的业务拓展和设备升级提供了保证。该系统使用纯软件的信号处理具有很大的灵活性, 采用高级语言(C/C++、Python)进行系统

开发, 扩展性和可移植性强, 开发周期短, 并且随着 CPU 处理能力的不断提高以及软件技术的进步, 系统性能还有进一步提升的空间。

参考文献

[1] 周立岩, 孙毅, 冯小安. 提高电力负荷管理系统通信效率的新方法[J]. 电力系统通信, 2008, 28 (128): 46-49.
ZHOU Li-yan, SUN Yi, FENG Xiao-an. New Method of Improving Communication Efficiency in Power Load Management System[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 28 (128): 46-49.

[2] 无管字 5 号, 民用超短波遥测遥控数据传输业务频率划分[S].
Radio Administrative Bureau No.5 , Frequency Allocations of Civil Ultrashort Wave Telemetering and Telecontrol Data Transmit Servies[S].

[3] 曹瀚文, 王文博. GNU Radio: 开放的软件无线电平台 [J]. 电信快报, 2007(4): 31-34.
CAO Han-wen, WANG Wen-bo. GNU Radio: Open Source SDR Platform[J]. Telecommunication Information, 2007(4): 31-34.

[4] Blossom E. How to Write a Signal Processing Block[EB/OL]. <http://www.gnu.org/software/gnuradio/doc/howto-write-a-block.html>. 2006.

[5] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 68-85.
YANG Xiao-niu, LOU Cai-yi, XU Jian-liang. Principles and Applications of Software Defined Radio[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.68-85.

[6] Ray Andraka. A Survey of CORDIC Algorithms for FPGA Based Computers[A]. in: Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA Sixth International Symposium on Field Programmable Gate Arrays[C]. 1998. 191-200.

[7] 徐以涛, 沈良, 王金龙. FPGA 技术在软件无线电中的应用[J]. 电信科学, 2001, 11: 36-39.
XU Yi-tao, SHEN Liang, WANG Jin-long. Application of FPGA Technology in Software Radio [J]. Telecommunications Science, 2001, 11: 36-39.

收稿日期: 2009-06-17; 修回日期: 2009-07-13

作者简介:

闫 龙 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统通信、无线通信; E-mail: yanlongchina@gmail.com

王智海 (1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事配电网自动化运行管理工作;

祁 兵 (1965-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为电力系统通信、无线通信和多媒体通信。

(上接第 49 页 continued from page 49)

JIN Hua-zheng, CHENG Hao-zhong, ZENG De-jun. A Novel Method of Flexible Transmission Network Planning Based on Set Pair Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (3) : 7-12.

[22] 王佳贤, 程浩忠, 胡泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规划方法[J]. 电网技术, 2008, 32 (19): 56-61, 83,
WANG Jia-xian, CHENG Hao-zhong, HU Ze-chun. Optimal Reactive Power Planning for Distribution Systems Considering Multi-load Levels[J]. Power System Technology, 2008, 32 (19) : 56-61, 83.

[23] 刘群英, 刘俊勇, 刘启方. 考虑电压稳定约束的无功规划研究综述[J]. 继电器, 2006, 34 (17) : 78-85.
LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Survey on Reactive Power Planning Research Considering Voltage Stability Limit[J]. Relay, 2006, 34 (17) : 78-85.

[24] 李勇, 张勇军, 等. 基于N-1方式的无功优化规划[J]. 高电压技术, 2007, 33 (9) : 100-103, 133.

LI Yong, ZHANG Yong-jun, et al. Optimal Reactive Power Planning by N-1 Mode[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (9) : 100-103, 133.

[25] 李林川, 王建勇, 陈礼义, 等. 电力系统无功补偿优化规划[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (2) : 66-69.
LI Lin-chuan, WANG Jian-yong, CHEN Li-yi, et al. Optimal Reactive Power Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (2) : 66-69.

收稿日期: 2009-09-14; 修回日期: 2009-10-11

作者简介:

程 飞 (1984-), 男, 硕士, 主要从事电力系统电压稳定性和无功规划方面的研究工作; E-mail: zzchengfei@yahoo.com.cn

刘俊勇 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统可视化及电力系统稳定与控制等方面的研究;

刘 莹 (1985-), 女, 硕士, 主要从事电力系统故障告警及稳定控制研究。