

基于 NI USRP 与 RTL-SDR 的无线通信收发系统的实现

王晓丽 鲁旭涛 孙运强 解殿君
(中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

摘要:介绍了一种基于 NI USRP 与 RTL-SDR 的无线通信收发系统。分析了该系统的软件特性和硬件构架,以 FM 调制与解调方式来发送与接收音频信号为例,介绍了 FM 信号的正交调制解调算法,以 NI USRP 当作发射端,RTL-SDR 当作接收端,通过搭建 Simulink 框图在射频段与 PC 端对信号进行处理并发送与接收,并给出了详细的实现过程和测试结果。从实验结果得出,此系统可以较好地发送并接收音频信号。

关键词:软件无线电; NI USRP; RTL-SDR; Simulink; 调制解调

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Implementation of wireless transceiver system based on NI USRP and RTL-SDR

Wang Xiaoli Lu Xutao Sun Yunqiang Xie Dianjun

(Information and Communication Engineering Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In this paper we introduce a wireless communication system based on NI USRP and RTL-SDR. Its software characteristics and hardware framework are analyzed. Taking FM modulation and demodulation method to send and receive audio signal as an example, using the digital quadrature modulation and demodulation algorithm, NI USRP is used as transmitter, RTL-SDR as receiver, and the signal and data will be processed in Simulink block diagram in PC. The implementation procedure and test results are presented. The experimental results show that the designed system can send the received audio signal better.

Keywords: software defined radio; NI USRP; RTL-SDR; Simulink; modulation and demodulation

0 引言

软件无线电^[1-2]的基本思想是在统一硬件平台上,通过软件编程的方式,灵活地实现各类通信功能,用软件编程技术来改变固定传统的“纯硬件电路”技术。因此,无线通信产品的价值将日益体现在软件上,这些技术使得无线通信领域发生了从固定到移动、从模拟到数字的第3次伟大变革。作为第4代移动通信的关键技术,软件无线电在全球都得到了很大的应用。软件无线电平台的基本架构有^[3]:射频、中频、基带、信源、信令等各层,各层之间通过控制总线 and 数据总线实现通信。

本文将探讨基于 NI USRP 与 RTL-SDR 的无线通信收发系统,并借助 MATLAB 中的 Simulink 对收发系统工作过程作了仿真,得到了满意的仿真结果,实现了基于软

件无线电平台的无线通信收发。

1 软硬件介绍

Simulink 是一个可以进行动态系统建模、仿真和综合分析的软件包,Math Works 公司发布了 USRP 与 RTL-SDR 的硬件支持包,同时支持 MATLAB 中的 Simulink 与其进行连接并控制^[4]。MATLAB 中的动态仿真模块 Simulink 为用户提供了 USRP2 Receiver 和 USRP2 Transmitter 两类模块^[5],这两类模块都支持 USRP2 与 Simulink 之间数据的动态交换。通过硬件支持包,RTL-SDR 设备的基带采样输出被提供到软件环境中,使用户可以实现任何一种 DSP 接收机或频谱感应系统^[6]。

USRP(universal software radio peripherals,通用软件无线电外设)是数字通信系统的一个软件可重配置的射

频硬件,是软件无线电研究领域广泛使用的平台,具有可扩展、便捷、使用简单等特性,可避免采用复杂的FPGA开发技术^[7]。USRP硬件结构中主要有数字中频处理器FPGA、负责模/数的ADC与数/模DAC转换的器件和射频

子板。USRP最高采样率达25 MS/s,将从计算机采到的信号上变频到射频端,随后送到放大器通过天线发射到空中^[8]。接收端则完成一个大致相反的过程。以NI USRP 2920为例,其结构如图1所示。

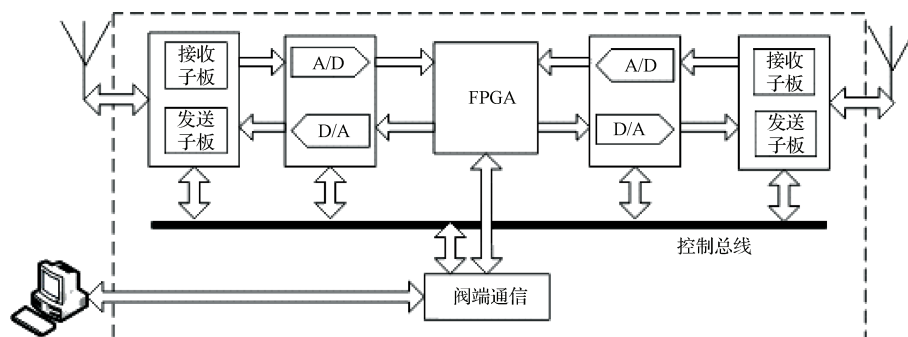


图1 USRP硬件结构框图

RTL-SDR是由RTL2832U和R820T组成的,R820T作为调谐器(高频头),主要由低噪声放大器(LNA)和混频器组成,其工作频率范围为25~1 750 MHz,RTL2832U作为A/D采样器,理论采样率最高为3.2 MHz,实际中测试采样率最高为2.56 MHz,输出两路I/Q的8 bit数字信号到PC。RTL-SDR和MATLAB软件可兼容,由此搭建的无线电平台可以基于MATLAB的信号处理模块构建无线电应用^[9]。RTL-SDR和MATLAB构成的无线电应用框图如图2所示。

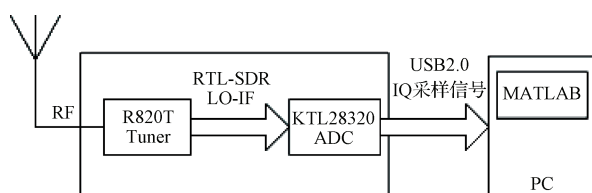


图2 RTL-SDR和MATLAB构成的无线电框图

2 系统原理概述

2.1 软件无线电中的正交调制解调原理

软件无线电中的各种调制解调信号是以通用数字信号处理平台为支撑,利用各种软件来实现。每一种调制解调算法都做成软件模块,要实现某种调制解调功能只需调用相应模块即可。由于各种调制解调可以用软件来实现,因此在软件无线电中,可以不断地更新调制解调模块来适应不断发展的调制解调体制,具有相当大的灵活性和开放性^[10]。

软件无线电的各种调制解调功能完全可以基于数字信号处理技术来实现^[11]。软件无线电中,信号调制是基于正交调制理论,其实现是通过数字上变频完成的。软件无线电的解调一般采用数字正交解调的方法。采用正交解调方式,在一定程度上可以改善模拟解调电路中信号的

失真和衰减,再加上正交调制产生的信号,都可以使用正交解调方法进行恢复,而且正交解调方式的理论可以运用在大部分解调中。

2.2 FM正交调制解调原理

2.2.1 FM正交调制原理

调频是一种使受调波瞬时频率随调制信号成线性变换的调制方式^[12]。单音调频信号的数学表达式为:

$$s_{fm}(t) = A[\cos(\omega_c t + K_{fm} \int_0^t v_{\Omega}(t) dt)] \quad (1)$$

式(1)展开并化简得:

$$S_{fm}(t) = A \cos(\omega_c t) \cos(K_{fm} \int_0^t v_{\Omega}(t) dt) -$$

$$A \sin(\omega_c t) \sin(K_{fm} \int_0^t v_{\Omega}(t) dt) =$$

$$A \cos(\omega_c t) \cos\phi - A \sin(\omega_c t) \sin\phi \quad (2)$$

式中: ω_c 为载波角频率, $v_{\Omega}(t)$ 为调制信号, K_{fm} 为调频指数, ϕ 为:

$$\phi = K_{fm} \int_0^t v_{\Omega}(t) dt \quad (3)$$

从式(2)可以看出,在实现FM调制时要对调制信号进行积分,然后对这积分后的信号分别取正弦和余弦即可。因此,用正交调制法实现只需要令:

$$I(t) = \cos\phi$$

$$Q(t) = \sin\phi \quad (4)$$

2.2.2 FM正交解调原理

信号表达式:

$$S(n) = A_0 \cos[\omega_c n + k \sum m(n) + \phi_0] \quad (5)$$

式中: k 为比例因子, ϕ_0 为常数。对信号进行正交分解,得同相和正交分量。

$$\text{同相分量: } X_I(n) = A_0 \cos[k \sum m(n) + \phi_0]$$

$$\text{正交分量: } X_Q(n) = A_0 \sin[k \sum m(n) + \phi_0]$$

则 $\phi(n) = \arctan\left[\frac{X_Q}{X_I}\right] = k \sum m(n) + \phi_0$ 。然后,对相位差分,即可求得调制信号 t ,

$$\phi(n) - \phi(n-1) = m(n) \quad (6)$$

FM 信号用正交解调方法解调时,也具有较强的抗载频失配能力^[13]。

2.3 基于 NI USRP 和 RTL-SDR 的 FM 收发设计原理

使用 Simulink 合成用于传输的 32 位基带 I/Q 信号

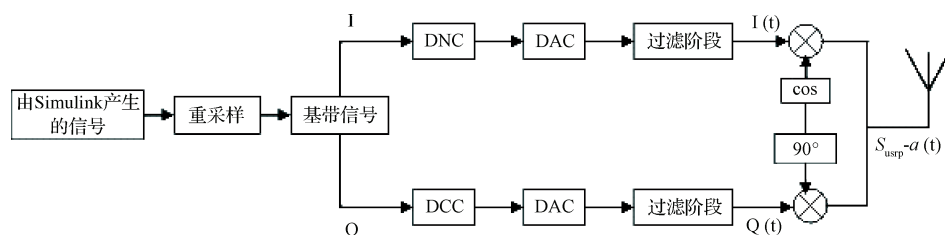


图3 Simulink/USRP 硬件实现框图

频率解调是上述过程的逆过程。使用 RTL-SDR 接收已调 FM 信号,信号经射频输入进入 R820T,在此中进行低噪声放大,射频滤波器滤波,混频,经过两次下变频变为中频后的信号进入 RTL2832U 芯片,在芯片中进行 AD 转换,ADC 采集的数据由芯片内部进行下变频,经过混频之后得到正交基带 IQ 信号,IQ 数据按字节依次交错输出,通过 USB 接口连接计算机,在 MATLAB 中完成信号解调^[15]。其 workflow 如图 2 所示。

3 在仿真平台上的实现及结果分析

3.1 平台组成

基于 USRP 与 RTL-SDR 的软件无线电平台由 NI USRP-2920、RTL-SDR 和运行在计算机上的 MATLAB Simulink 编程环境构成,NI USRP-2920 通过千兆以太网与 PC 相连,RTL-SDR 则通过 USB 接口连接电脑,如图 4 所示。在进行信号发射时,计算机通过 MATLAB Simulink 实现编码、调制等,经过 USRP-2920,通过天线发射出去。调制信号进入接收端,天线接收到的信号,经过 RTL-SDR 传送到计算机,用 MATLAB Simulink 实现解调、解码等功能。

3.2 发送端仿真设计

搭建 FM 调制的 Simulink 流程图,通过 USRP 发送,发射端的流程图设计如图 5 所示。

图 5 中对于发送数据的处理为:

1) 放置一个以 48 kHz 进行采样的单声道音频源,设置音频输出为单声道;

2) 重采样。放置两个 FIR Rate Conversion 模块和一个 FIR Interpolation 模块。在经过相应设置后,输出采样率从 48 kHz 上升到 400 kHz;

3) 滤波。放置两个 Lowpass Filter 模块在 2) 中的 FIR Rate Conversion 模块和 FIR Interpolation 模块之间,

(每对 I/Q 各 16 位),然后再通过千兆以太网以高达 20 MS/s 的速度供给 USRP。根据式(1)和(2)可以产生对应的 I 和 Q 信号,信号进入 USRP 后首先通过数字上变频器(DUC)将输入信号速率变为 400 MS/s,接下来由双通道 16 位的数模转换器(DAC)变为模拟信号。输出的模拟信号与混频到载频,即 I/Q 调制,生成的射频信号被放大然后通过天线发射出去^[14]。其工作原理如图 3 所示。



图4 基于 USRP 与 RTL-SDR 的实验平台组成

以确保内插信号中的光谱图像被充分衰减;

4) FM 调制。

5) 用 USRP 发送信号。放置一个 SDRu Transmit 模块,此模块可与 USRP 进行通信。打开其参数窗口,将“中心频率”参数设置为所需的发射频率(该值应在 RTL-SDR 调谐器的范围内,例如在 25 ~ 1.75 GHz 的范围内) 433.9 MHz,在“Interpolation”中输入 250,这意味着此时信号从 400 kHz 到了 100 MHz;

6) 添加波形图和频谱图模块。

3.3 接收端仿真设计

现在已经用 USRP 产生了 FM 信号,接下来就用 RTL-SDR 进行接收。

在 Simulink 中构建一个基于频率鉴别器的 FM 接收器。在创建了一个新的 Simulink 模型后,与 RTL-SDR 连接的 Simulink 库中的组件将会被放置,用以实现解调。接收端将输出解调音频信息到电脑音箱或耳机。接收端的设计如图 6 所示。

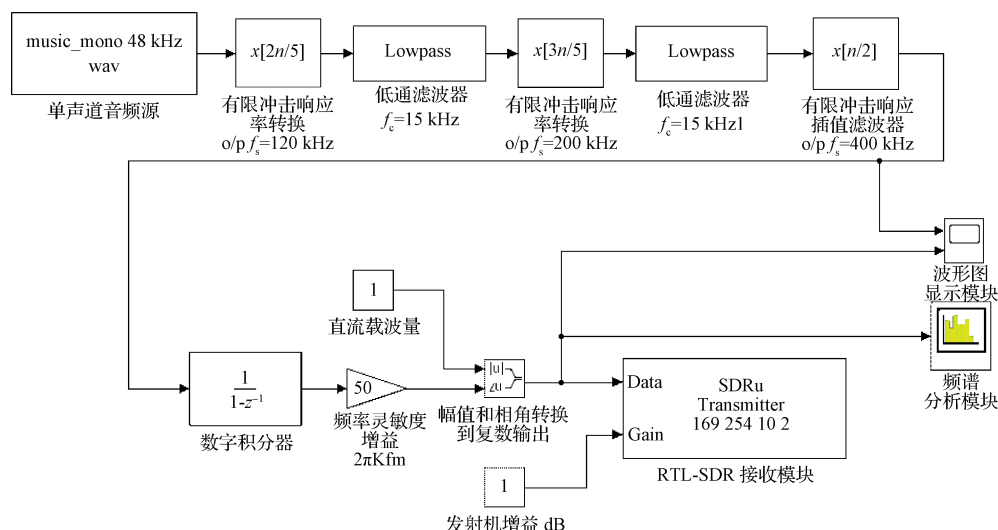


图5 发射端流程图

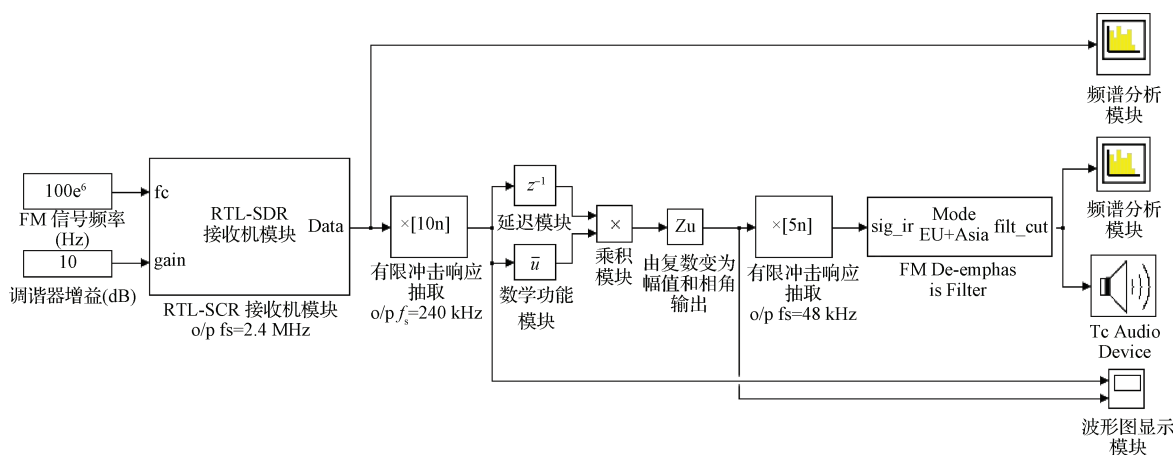


图6 接收端流程图

图6中对于接收数据的处理为:

(1) 放置一个 RTL-SDR Receive 模块, 打开其参数窗口设置中心频率为“Input port”, 通过 Constant 模块将 FM 信号频率的常数值设置为要接收的 FM 信号的中心频率 100 MHz。在“Sampling Rate”中输入 2.4 MHz, 将 RTL-SDR 设置为以 2.4 MHz 的速率进行采样。因为当接收机具有宽带宽时, 使用频谱分析仪更容易调谐到 FM 信号;

(2) 使用 FIR Decimation 模块, 将采样率降低 10 倍(从 2.4 MHz 降到 240 kHz), 并允许通过频率在 120 kHz 以上的信号。执行低通滤波, 以确保不出现混叠;

(3) 使用 FIR Decimation 模块, 将采样率降低 5 倍(从 240 kHz 降到 48 kHz), 并允许通过频率在 15 kHz 以上的信号;

(4) 解调器的最后一部分是 de-emphasis filter(去加重滤波器)模块。打开 Simulink Library>RTL-SDR Book Library>FM Demod Tools, 选择 FM de-emphasis filter

模块。双击模块打开其参数窗口并选择适合的位置的过滤器区域, 此处选择“Europe, Asia”。将采样率设置为 48 kHz, 并应用更改重新配置过滤器。

5) 添加波形图、频谱图和音频输出块。

从 NI USRP 硬件发送的单声道音频信号由 RTL-SDR 接收并被解调, 波形图也被记录下来, 如图 7 所示。通过收听接收端输出的音频信息, 发现发送端的原音频与解调后的音频完全吻合, 即接收端接收的数据经过解调解码完好恢复了发送音频。

4 结论

本文主要利用 NI USRP 对信号进行处理并发送, 以 RTL-SDR 作为信号接收端, 实现了基于软件无线电平台的无线通信收发系统, 具有极大的灵活性, 同时 MATLAB Simulink 应用的普遍性和易上手等特点, 可以灵活地对其进行修改和开发, 对软件无线电技术研究的进一步深入, 未来可以实现图片甚至视频的实时传输。

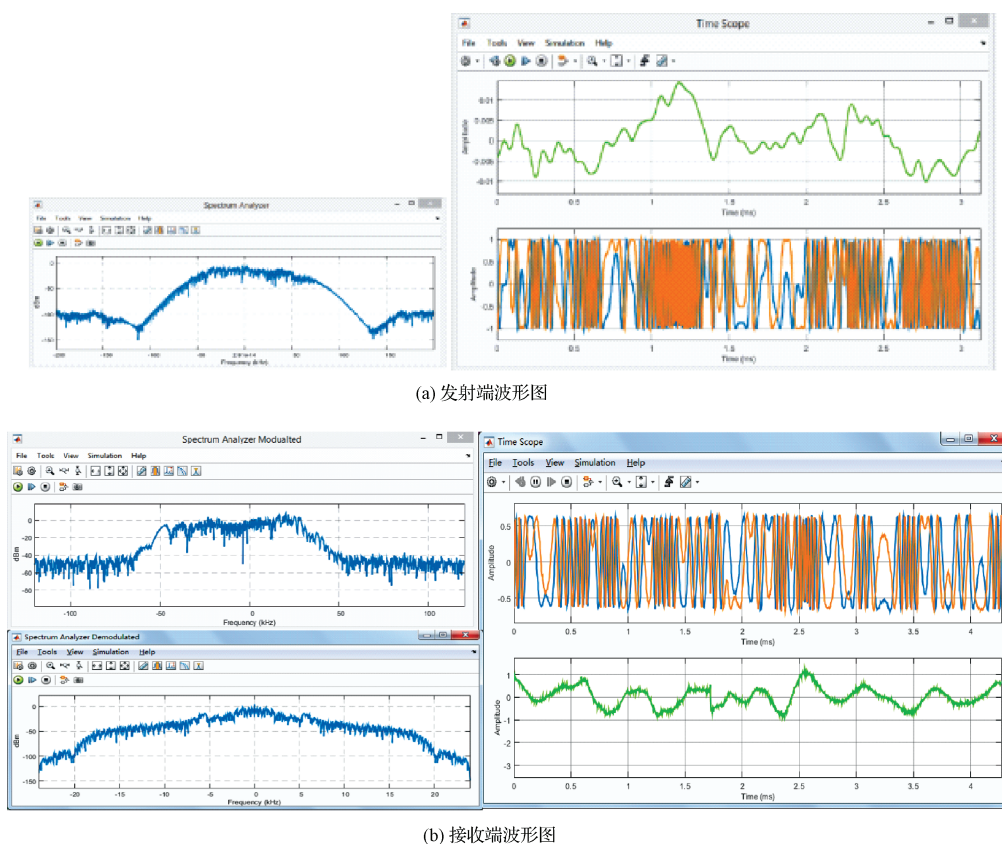


图7 发送接收端的信号频谱图

参考文献

- [1] 罗宁,杨宇红. 基于 NI-USRP 软件无线电平台的 FM 调制解调器设计[J]. 电子技术, 2015, 44(12): 44-47.
- [2] 饶伶俐. 基于 GNURadio 和 RTLSDR 软件无线电的 FM 广播解调接收[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- [3] 楼才义. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [4] 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.
- [5] 秦协安, 王玲, 赵海涛, 等. 基于 MATLAB 和通用软件无线电外设的频谱感知实现[J]. 计算机工程, 2015, 41(5): 106-110.
- [6] 张晓. 基于 GNURadio 平台的无线电监测信号分析研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [7] 莫金容, 胡圣波. 基于 USRP/LabVIEW 的 DQPSK 收发机的设计[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2014(6): 96-99.
- [8] 邢鑫, 赵慧. 基于 LabVIEW 和 USRP 的软件无线电通信实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(5): 160-164.
- [9] WICKERT M A, LOVEJOY M K R. Hands-on software defined radio experiments with the low-cost RTL-SDR dongle[C]. Signal Processing and Signal Processing Education Workshop (SP/SPE), 2015: 65-70.
- [10] MARQUES P. LabVIEW 和 NI USRP 硬件加快了认知无线电研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(9): 54-54.
- [11] 罗宁, 杨宇红. 基于 NI-USRP 软件无线电平台的 FM 调制解调器设计[J]. 电子技术, 2015, 44(12): 44-47.
- [12] 董晓静, 吴辰文, 王平. 软件无线电中调制解调的实现[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(1): 13-15, 20.
- [13] 胡丽芳. 基于软件无线电的 FM 正交调制器的实现[J]. 电声技术, 2012, 36(2): 37-40.
- [14] 付玉堂. 基于 USRP 的通信平台的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [15] STEWART R W, BARLEE K W, ATKINSON D S W. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR [M]. Strathclyde Academic Media, 2015.

作者简介

王晓丽, 1991 年出生, 工学硕士, 主要研究方向为通信与信息系统、软件无线电技术。
E-mail: 1173056165@qq.com