

基于 GNURadio 的频谱分析仪设计

金伟正, 赵小月, 肖云, 林漫晖
(武汉大学电子信息学院, 武汉 430079)



摘要: 设计了一种基于软件无线电(SDR)平台 GNURadio 便携式频谱分析仪, 给出了完整的设计方案。频谱分析仪由天线、收发转换开关、射频前端、中频接收、ADC、混频器、抽取滤波、DSP、移动客户端显示、云端存储组成, 采用 HackRF One 作为信号处理模块的射频中频硬件平台。该分析仪具有频率分辨率可调、频带宽、便携性好、灵活性强等特点, 可广泛用于实验教学。

关键词: 频谱分析仪; 软件无线电; 频率分辨率

中图分类号: TN 761.2; G 642.423

文献标志码: A

文章编号: 1006-7167(2019)01-0086-05

Design of Spectrum Analyzer Based on GNURadio

JIN Weizheng, ZHAO Xiaoyue, XIAO Yun, LIN Manhui

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper designs a handy spectrum analyzer based on GNURadio which is a platform of SDR, and presents the complete design scheme. Spectrum analyzer contains antenna, receive or launch switch, RF front end, IF receiver, ADC, Frequency mixer, decimation and filter, DSP, mobile client, cloud storage. HackRF One is used to hardware platform of RF and IF signal processing. Spectrum analyzer has some characteristics such as frequency resolution is adjustable, portability is good, flexibility is good, support bidirectional exchange of receive and launch. Its price is cheap and can be widely used in experimental education.

Key words: spectrum analyzer software radio(SDR); frequency resolution

0 引言

目前, 频谱分析仪主要分为超外差式扫描调谐分析仪和傅里叶分析仪两大类^[1]。傅里叶分析仪难以对高频信号进行分析; 超外差式扫描调谐分析仪对硬件要求很高, 且这两类频谱分析仪难以同时满足高频率分辨率和宽频带的要求。将模数转换器和数模转换器尽量靠近天线, 直接使射频模拟信号转换为适合在数字信号处理器和计算机中处理的数据信息, 在计算机中编写软件模块来实现信号的复杂处理过程, 最后

使这样的无线电系统具有良好的灵活性和扩展性, 这就是软件无线电技术的设计思想^[2]。随着信息技术的快速发展, 现代频谱分析仪朝着数字化、模块化、软件化的方向不断演进^[3-4]。现代的频谱分析仪中已经采用软件无线电结构, 利用模拟的射频接收端和全数字式的中频接收处理系统, 实现高频率分辨率和多测量功能。

本文基于软件无线电的采用宽带中频数字化方案的频谱分析仪可广泛用于信号的实时频谱分析, 相比传统的频谱分析仪, 具有频谱分析误差小, 频率分辨率高; 频带宽; 具有灵活性、开放性、模块化结构; 便于携带等优点。

1 总体方案设计

设计的频谱分析仪设计框图如图 1 所示, 系统由天线、收发转换开关、中频接收模块、ADC 模块、混频

收稿日期: 2018-04-20

基金项目: 武汉大学 2018 年国家级大学生创新创业训练计划 (201810486134)

作者简介: 金伟正(1966-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 副教授, 从事高频电子线路教学和软件无线电等的科研工作。

Tel.: 13871326306; E-mail: jwz@whu.edu.cn

模块、抽取滤波模块、参数设置模块、DSP 模块、移动客户端显示模块、云端存储模块组成。设计的性能目标:频率分辨率 1~40 为步进,共有 6 个档位(0.03, 0.10, 0.30, 1, 3, 10 kHz);中频频率为 2.6 GHz;动态范围为 75 dB;AD 工作频率为 20 MHz。

2 硬件设计

硬件模块由射频模块、中频接收模块、ADC 模块、混频模块组成,与软件无线电支持的外部设备 HackRF One 有着相似的架构。故可采用 HackRF One 作为频谱分析仪进行射频和中频信号处理的硬件平台,其基本架构如图 2 所示。在软件无线电系统中,要求天线尽可能覆盖多频段^[5],HackRF One 可覆盖 0.03 ~ 6 GHz 的大范围频率,其中频频点为 2.6 GHz,最高采样频率为 22 MHz。

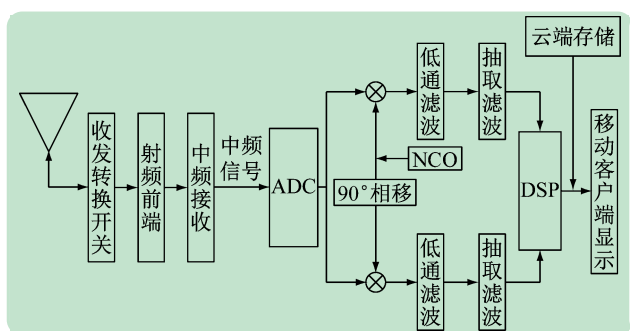


图1 频谱分析仪的设计框图

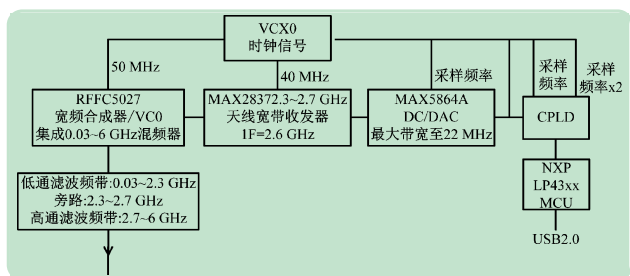


图2 HackRF One 基本架构图

HackRF One 支持 GNURadio^[6] 并可与之配合使用,通过 USB 口与 PC 端进行相连,主要作用是对信号的收发,并对信号进行放大、滤波、混频、采样等处理。以接收过程为例,信号由天线进入后流程如下^[7]: ①由射频开关决定是否经由 14 dB 的放大器进行放大; ②经过镜像抑制滤波器对信号进行高通或低通滤波; ③信号进行 RFIC5072 芯片混频到 2.6 GHz 固定中频(中频范围 2.15 ~ 2.75 GHz); ④信号送入 MAX2837 芯片混频到基带,输出差分的 IQ 信号(其间 MAX2837 芯片可以对信号进行带宽限制); ⑤MAX5864 芯片对基带信号进行数字化后送入 CPLD 和单片机; ⑥CPLD 处理数据; ⑦LPC4320/4330 处理器将采样数据通过

USB 送至计算机。

3 软件设计

软件模块主要包括抽取滤波模块、DSP 模块、移动客户端显示模块、云端存储模块。移动客户端显示模块和云端存储模块分别是利用 APP 开发技术和云端数据库开发技术实现。抽取滤波模块和 DSP 模块则是在软件平台 GNURadio 上实现。GNURadio 软件平台上有很多现成的信号处理模块,这些模块可以通过某种机制连接起来,形成一个模块流程图,这样就迅速搭建好一个软件无线电系统^[8]。常见的信号处理模块库有各种调制方式,观察信号波形图、频谱图、星座图、图形模块、纠错码、滤波器、均衡器等。用户可通过搭建相应的模块构建无线电应用的流图,也可根据应用的需要自定义编码扩展模块来构建自定义的无线应用,构建应用的信号处理模块可通过某种机制连接成一个系统。在 GNURadio 软件平台上,采用 Python 脚本语言^[9] 和 C++ 语言混合方式进行软件模块的编程^[10]。C++ 语言执行效率高,主要被用于编写一些信号处理模块;Python 语言不需要编译、语法简单、面向对象,主要用于各个信号处理模块连接的程序编写。

3.1 移动客户端显示和云端存储模块设计

移动客户端显示模块界面如图 3 (a) 所示,软件结构框图如图 3 (b) 所示。

移动端软件结构主要包括主进程 MainActivity、HackrfSource、FileIQSource、IQSourceInterface、Scheduler、AnalyzerProcessingLoop、AnalyzerSurface 以及 FFT 等进程(或模块)。软件执行过程如下:在主进程 MainActivity 的调控下,HackrfSource 进程采集并处理软件无线电设备 HackRF 接收无线电产生的相应数据,通过 IQSourceInterface 进程将数据传输到 Scheduler 进程;接收到数据后,Scheduler 进程处于等待状态;主进程开始执行频谱分析后,Scheduler 进程停止等待并将数据传至 AnalyzerProcessingLoop 进程;在 AnalyzerProcessingLoop 进程中通过 FFT 函数,执行傅里叶变化等相关处理,并通过 draw 函数做出相应的频谱图像。

云端存储模块即在云端搭建服务器,并建立数据库用于存储每一用户在 App 使用过程中产生的大量频谱分析数据,或可将其扩展为数据库集群。考虑到移动端密集的 I/O 需求,使用基于多副本分布式技术的 SSD 云盘进行数据的云存储。SSD 云盘具有高性能、高可靠、弹性扩容的特点,能够提供极强的数据持久性。在云端存储方式中,App 与云端数据库进行交互,包含实时写入和定时读取两部分。在信号接收阶段,将数据实时发送到云端;在信号处理与分析阶段,采用特定算法,定时分批从云端读取大量数据至移动

```

graph LR
    Root[频谱分析仪菜单] --> P1[一级菜单]
    Root --> P2[二级菜单]
    P1 --> F1[功能设置]
    P1 --> F2[频率设置]
    P1 --> F3[幅度设置]
    P1 --> F4[频标设置]
    P1 --> F5[峰值设置]
    P1 --> F6[轨迹设置]
    P1 --> F7[关联设置]
    F1 --> F1_1[复位]
    F1 --> F1_2[窗口]
    F2 --> F2_1[中心频率]
    F2 --> F2_2[截止频率]
    F3 --> F3_1[参考电平]
    F3 --> F3_2[幅度单位]
    F3_2 --> F3_2_1[下一页]
    F3_2 --> F3_2_2[上一页]
    F4 --> F4_1[常态频标]
    F4 --> F4_2[峰值搜索]
    F5 --> F5_1[左峰值]
    F5 --> F5_2[频标 >]
    F5_2 --> F5_2_1[中心频率]
    F5_2 --> F5_2_2[截止频率]
    F6 --> F6_1[轨迹A]
    F6 --> F6_2[视频平均]
    F6 --> F6_3[下一页]
    F6 --> F6_4[上一页]
    F7 --> F7_1[分辨率带]
    F7 --> F7_2[窄带选择]
    F7 --> F7_3[下一页]
    F7 --> F7_4[上一页]
  
```

The diagram illustrates the high-level architecture of the RTL2832U driver. It shows the flow of data from the RTL2832U driver through various sources (HackrfSource, FileQSource, rtlSdrSource) to the IQSource-Interface, then to the Scheduler, and finally to the Analyzer-ProcessingLoop and Demodulator. The Scheduler also interacts with the MainActivity and the AnalyzerSurface.

```

graph TD
    RTL2832U[RTL2832U driver] --> HackrfSource
    RTL2832U --> FileQSource
    RTL2832U --> rtlSdrSource
    HackrfSource --> IQSourceInterface[IQSource-Interface]
    FileQSource --> IQSourceInterface
    rtlSdrSource --> IQSourceInterface
    IQSourceInterface --> Scheduler
    Scheduler --> MainActivity
    Scheduler --> AnalyzerProcessingLoop[Analyzer-ProcessingLoop]
    Scheduler --> Demodulator[Demodulator]
    MainActivity --> AnalyzerSurface
    MainActivity --> Scheduler
    MainActivity --> HackrfSource
    MainActivity --> FileQSource
    MainActivity --> rtlSdrSource
    MainActivity --> Scheduler
    AnalyzerSurface --> Scheduler
    AnalyzerSurface --> AnalyzerProcessingLoop
    AnalyzerProcessingLoop --> Scheduler
    AnalyzerProcessingLoop --> Demodulator
    Demodulator --> Scheduler
    
```

Key components and their interactions:

- RTL2832U driver** (grey box) connects to **HackrfSource**, **FileQSource**, and **rtlSdrSource** (dashed blue box, not implemented yet).
- HackrfSource**, **FileQSource**, and **rtlSdrSource** all feed into the **IQSource-Interface** (green box).
- The **IQSource-Interface** feeds into the **Scheduler** (blue box).
- The **Scheduler** interacts with **MainActivity** (blue box) and the **Analyzer-ProcessingLoop** (blue box).
- The **Scheduler** also feeds into the **Demodulator** (dashed blue box, not implemented yet).
- The **MainActivity** interacts with **AnalyzerSurface** (blue box) and the **Scheduler**.
- The **AnalyzerSurface** feeds into the **Analyzer-ProcessingLoop**.
- The **Analyzer-ProcessingLoop** feeds into the **Demodulator**.

图3 移动客户端显示模块设计

DSP 模块主要是利用 FFT 进行实时频谱分析。GNURadio 中有模块 Fourier Analysis, 包括 FFT、Goertzel、Log Power FFT 3 个子模块, 以及多个 sink 模块包含 FFT 运算。用户可通过调用这些模块来得到信号频谱图。利用 GNURadio 进行 FFT 时需要设置采样频率。对信号进行采样要满足基本的采样定理, 又称为奈奎斯特采样定理, 该定理在数字信号处理中有广泛应用^[11]。即采样频率要大于或等于最高频率的 2 倍才不会出现频谱混叠。但是在工程应用中, 为了提高信号的信噪比和降低抗混叠滤波器的设计难度, 通常取值是采样频率大于等于最高频率 2.5 倍^[12]。

经过抽取后的信号,需要经过低通滤波器进行波形整形。低通滤波器主要分为 FIR 滤波器和 IIR 滤波器。FIR 滤波器是有限长冲激响应,产生的误差对系统影响小,同时由于 FIR 滤波器具有线性相位,使信号在处理中不失真,因此选 FIR 滤波器。GNUradio 中 Decimating FIR Filter 即为抽取 FIR 滤波器。

DSP 模块和抽取滤波模块中分别对 FFT 点数和抽取因子进行调整,会对频率分辨率产生影响。频率分辨率是频谱分析仪的关键性能指标之一,表明了频谱分析仪分辨两个输入信号的能力。对于利用离散傅里叶变换进行离散数字频谱分析的系统而言,其频率分辨率^[15]:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{f_{\text{ad}}}{DN} = \frac{f_{\text{ad}}}{D'D_{\text{FIR}}N}$$

其中: f_s 是经过抽取滤波之后送入 DSP 模块的信号速率; N 为进行 FFT 的数据长度; f_{ad} 是模拟信号经过 AD 采样之后得到的数据信号速率; D 是抽取因子, 有 $D = D \mathcal{D}_{\text{FIR}}$, 即抽取因子等于抽取模块抽取因子再乘级联 FIR 抽取滤波器抽取因子。通常 f_{ad} 大小固定, D 、 N 大小可调。本设计中 ADC 采样率 $f_{\text{ad}} = 20 \text{ MHz}$, 取 FFT 点数 $N = 1024$, 设计的频率分辨率档位为 $0.03 \sim 30 \text{ kHz}$, 由 $\Delta f = f_{\text{ad}} / ND$ 得频率分辨率大小与抽取因子关系如表 1 所示。

频率分辨率档位 /kHz	期望基带信号速率 f_s	期望抽取率	实际总抽取因子 D	抽取模块抽取因子	级联 FIR 抽取滤波器抽取因子 D_{FIR}	频率分辨率理论值 /kHz
0.03	0.030 7	651.0	648	81	8	0.030 14
0.10	0.102 4	195.3	196	49	4	0.099 65
0.30	0.307 2	65.1	66	33	2	0.295 93
1.00	1.02	19.5	20	20	1	0.976 56
3.00	3.1	6.5	7	7	1	2.79
10.00	20.5	1.95	2	2	1	9.77

4 实验内容及测试结果

实验内容主要包括移动客户端显示模块、云端存储模块、抽取滤波模块、DSP 模块的设计与测试; 射频前端、中频接收、ADC、混频器的测试; 频率分辨率、带宽测试; 整机的发射与接收实验测试等部分。由于篇

幅的限制,本文只给出重要模块的重要性能测量方法,包括抽取滤波模块测试、射频中频测试(HackRF One测试),对频谱分析仪的重要参数频率分辨率和带宽进行测试。

4.1 抽取滤波测试

在GNURadio中搭建抽取滤波的GRC流程图如图4所示,将采样频率设置为20 MHz,信号源波形为正弦波,中心频率为100 kHz,调整Rational Resampler Base模块和Decimating FIR filter模块参数以及Decimating FIR filter模块数量,改变抽取因子,进而改变频率分辨率。分别将频率分辨率调为0.03、1、10 kHz,抽取因

子设置见表1,所得抽取滤波后信号如图5所示。

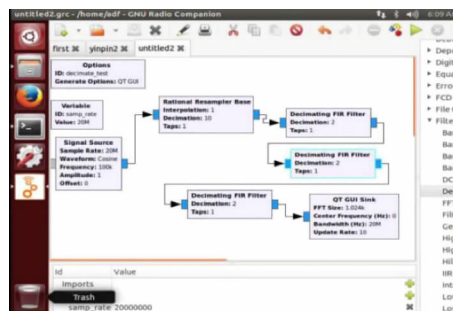
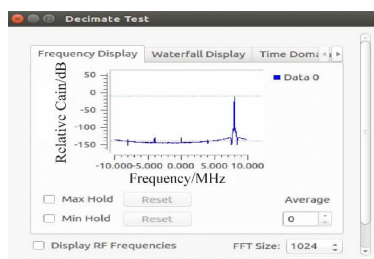
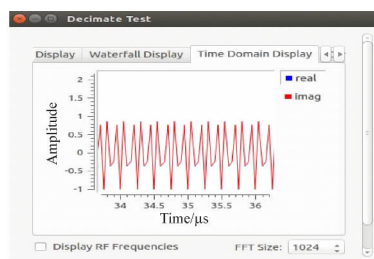


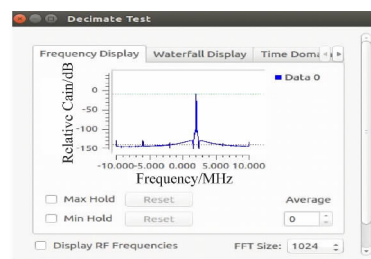
图4 抽取滤波模块GRC流程图



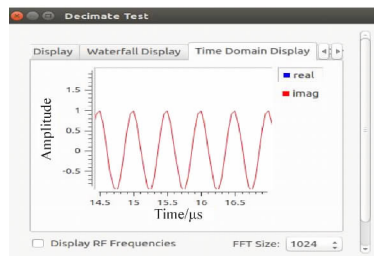
(a) 30 Hz 频谱图



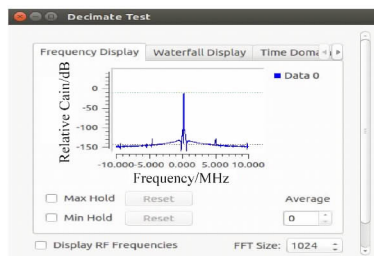
(b) 30 Hz 时域波形图



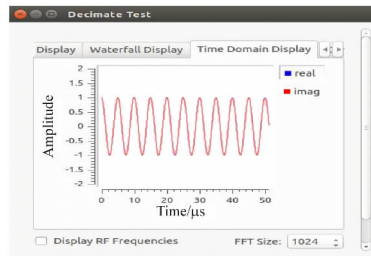
(c) 1 kHz 频谱图



(d) 1 kHz 时域波形图



(e) 10 kHz 频谱图



(f) 10 kHz 时域波形图

图5 抽取滤波测试数据

可见,当频率分辨率较小,即抽取因子较大时,系统采样率下降较多,信号时域波形具有较小周期,波形失真也会增大。这与预期结果相符,故抽取滤波模块符合设计要求。

4.2 射频中频测试

将HackRF One通过USB口与PC相连,在GNURadio中搭建图6所示GRC流程图,采样率设置为20 MHz。Audio Sink模块输出相应频段上的语音,可以利用其进行各种广播接收,此处不再对其进行实验。WX GUI Scope Sink模块和WX GUI FFT Sink模块分别输出时域和频域信号。Osmocom Source模块为经HackRF One输入的信号源,通过调整其频率来测试射频中频输入的不同带宽的信号。将频率调整为0.10、1.6 GHz,观察其信号,如图7所示。当在一定范围内时可以检测到语音,且与各广播频段分布有关。较小时检测到的信号时域波形与波形比较复杂。当6 GHz时,能够检测到信号,但信号比较微弱。实验中射频中频模块能够对0.1~6 GHz信号进行接收,与预期效果相同,满足宽频带特性,符合设计要求。

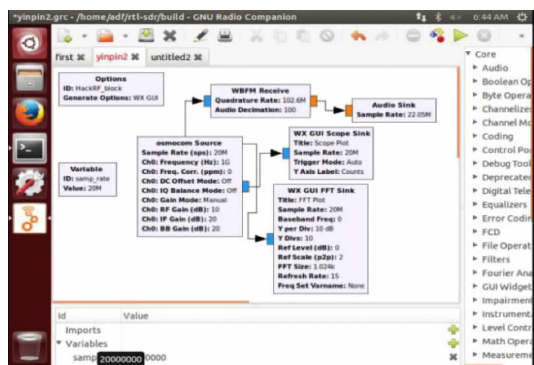
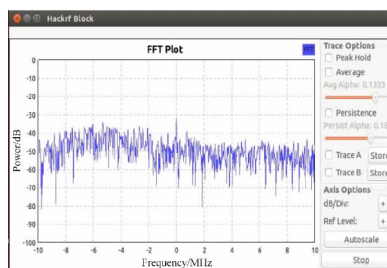


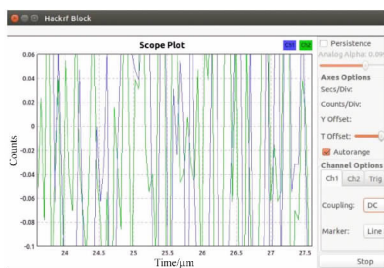
图6 射频中频模块GRC流程图

5 结语

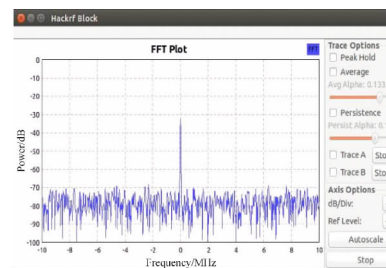
设计了一种基于GNURadio的频谱分析仪,通过对抽取滤波模块和射频中频模块进行简单测试,验证了其具有可调频率分辨率以及较高频带的性能。由于篇幅限制以及并非频谱分析仪的核心内容,并未给出移动客户端显示和云端存储这两个模块的测试。本分析仪成功应用于2017级卓越工程师计划的高频实验



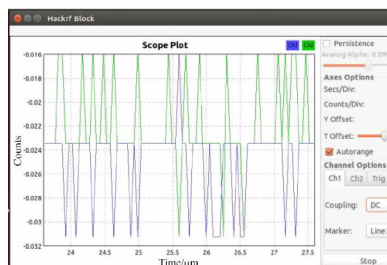
(a) 100 MHz 频谱图



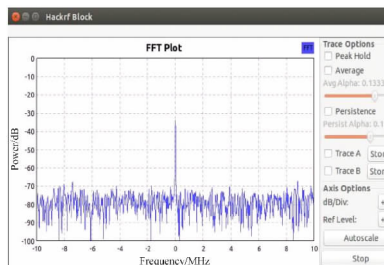
(b) 100 MHz 时域波形图



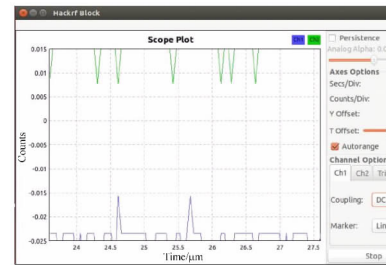
(c) 1 GHz 频谱图



(d) 1 GHz 时域波形图



(e) 6 GHz 频谱图



(f) 6 GHz 时域波形图

图 7 频域及时域波形图

教学,教学效果良好,学生通过本实验可以较为深入地理解和掌握信号频域分析设计原理和方法。该整体方案进行了实用新型专利的申请登记,同时获批样 2018 年国家级大学生创新创业项目立项。

参考文献(References):

- [1] 余兵才. 软件化频谱分析仪的设计与实现[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [2] Stoll Stefan, Arthur Schweiger. EasySpin, a comprehensive software package for spectral simulation and analysis in EPR[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2006, 178(1): 42-55.
- [3] 王 存. 全数字式谱仪中频处理平台的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 11-14.
- [4] 梁 璨. 虚拟数字频谱分析仪的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 9-11.
- [5] 李少谦, 张 平. 软件无线电的发展与展望[J]. 中兴新通信, 1999(6): 139-141.
- [6] Mendez-Rivera, Marcia G. An on-chip spectrum analyzer for analog built-in testing[J]. Journal of Electronic Testing, 2005, 21(3): 205-219.
- [7] 王 刚, 吴健健. 基于 GNURadio 和 Hackrf 的无线通信收发系统实现[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(5): 34-36.
- [8] Joseph Mitola, Maquire G Q Jr. Cognitive radio: Making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [9] Pinnick Ronald G. Aerosol fluorescence spectrum analyzer for rapid measurement of signal micrometer-sized airborne biological particles[J]. Aerosol Science and Technology, 1998, 28(2): 95-104.
- [10] 黄嘉威, 钟晓峰, 王 京, 等. 基于 GNURadio 和 USRP 的路测仪设计[J]. 通信技术, 2011, 44(4): 158-160.
- [11] 温 和. 新型窗函数与改进 FFT 谐波分析方法及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [12] 朱英芳. 高性能频谱分析仪的数字中频信号处理系统的研究与仿真[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2010.
- [13] 彭启琮, 邵怀宗, 李明其. 信号分析导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 309-319.
- [14] 张锡权. 基于 FPGA 的 DDC 在频谱仪中的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [15] 王瑞霞, 王志刚. 外插式频谱仪 FFT 分辨率滤波器设计[J]. 北京: 电子产品世界, 2011(9): 44-46.
- [9] 欧阳甸. 嵌入式数字视频监控系统中的媒体存储研究[J]. 电视技术, 2014, 38(1): 156-159.
- [10] 吴大中, 高 飞. 一种 HEVC 帧内模式选择的快速算法[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(6): 107-110.
- [11] 杜青青, 李 华, 张永林, 等. 一种基于双模糊控制的视频传输策略[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(28): 8487-8491.
- [12] 李道清. 基于 AL-FEC 和多访问点协作的视频多播可靠传输方案[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(10): 127-134.
- [13] 陈雪涛, 穆春阳, 马 行, 等. 基于嵌入式的实时视频采集与拼接系统的设计[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 216-220.
- [14] 白 杰, 孟令军, 张慧慧. 基于 DSP 的视频处理及传输系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(3): 111-115.
- [15] 彭 爽, 蒋荣欣. 面向高清视频监控系统的实时运动检测算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(11): 288-291, 296.

(上接第 72 页)

- [3] 齐丽凤, 陈贺新, 赵 岩, 等. 基于 DCT 系数相关性的音视频混合压缩算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(1): 44-46.
- [4] 张 硕, 李 博, 杨 婷. 基于达芬奇的 HDMI 高清视频编解码器的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(6): 54-57, 61.
- [5] 张 晶, 戴 明, 孙丽娜, 等. 基于 DM6467 的视频压缩存储和网络传输系统设计[J]. 液晶与显示, 2013, 28(6): 911-916.
- [6] 张 硕, 杨 婷, 李 博. 基于 DM6467 的视频实时压缩与传输系统的设计[J]. 电子器件, 2017, 40(3): 617-621.
- [7] 孙 立, 刘 佳, 孙 可. 基于 FPGA 的数字光纤视频信号接收装置的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(6): 40-43.
- [8] 杨 峰, 陈建春. 基于达芬奇技术的音视频压缩传输系统[J]. 电子科技, 2017, 30(8): 96-98.