第3章

软件无线电 RTL-SDR

CHAPTER 3

RTL-SDR 是 Realtek 公司开发的一款廉价的无线电接收设备,将该设备连接到普通计算机,就可以构成低成本的软件无线电平台。本章首先介绍 RTL-SDR 的使用方法,然后介绍 RTL-SDR 的应用接口函数,接着利用 RTL-SDR 进行数据采集,对采集的数据进行理论解析,最后介绍 RTL-SDR 硬件结构。

3.1 RTL-SDR 简介

RTL-SDR 是 Realtek 公司开发的一款廉价的无线电接收设备,最初用于接收数字高清 广播电视信号,后来 Eric Fry 和 Antti Palosaari 等研究发现该设备在特定模式下能够接收 25MHz~1.75GHz 频段内的所有信号,并可以通过 USB 接口将采集的 I/Q 信号传输到普 通计算机,从而构成一款低成本的软件无线电(Software-Defined Radio,SDR)平台。

3.1.1 RTL-SDR 的应用

将一个 RTL-SDR 接上天线,然后接到计算机 USB 接口,就搭建成一个简易的软件无 线电平台,如图 3-1 所示。



图 3-1 RTL-SDR 软件无线电平台

软件无线电平台通过 RTL-SDR 采集射频信号。在 25MHz~1.75GHz 频段上,分布了 大量的应用,如 FM 广播、航空系统、海事通信、ISM 频段、应急通信、电视广播、音频广播、 GPS 卫星定位系统、2G/3G/4G 移动通信和物联网系统等,具体频段如图 3-2 所示。



图 3-2 RTL-SDR 无线应用

3.1.2 RTL-SDR 驱动安装

在使用 RTL-SDR 之前,计算机需要预先安装相应的驱动程序。首先下载一款名为 Zadig 的软件^①,然后将一个 RTL-SDR 插入计算机任意 USB 接口,接着运行 Zadig 软件,在 软件弹出的界面中,单击 Options 菜单,在下拉菜单中选择 List All Devices。

如果 RTL-SDR 设备硬件正常,在设备列表中就可以看到 Bulk-In, Interface (Interface 0)选项,如图 3-3 所示。选择该选项, Driver 选择 WinUSB, 最后单击 Reinstall Driver 按钮, 就可以进行 RTL-SDR 驱动的安装。待驱动程序安装成功后,软件界面的左下方会显示提示信息: Driver Installation: SUCCESS。

Zadig Device Options <u>H</u> elp	设备列表	- 🗆 X	
Bulk-In, Interface (Interface 0)	\checkmark	∽ [□ Edit	
Driver WinUSB (v6.1.7600.16385)	WinUSB (v6.1.7600.16385)	More Information WinUSB (libusb)	
	Reinstall Driver	libusb-win-32 libusbK WinUSB (Microsoft)	
Driver Installation: SUCCESS		Zadig 2.4.721	

图 3-3 Zadig 软件

① https://zadig.akeo.ie/

3.1.3 SDR 应用软件

驱动安装完成之后,可以利用 SDR 软件测试 RTL-SDR。常用的 SDR 软件有 SDRSharp、HDSDR、GQRX 和 SDRangel 等。本节选择 SDRSharp^① 和 SDRangel^② 两款 SDR 软件进行说明。

首先将 RTL-SDR 插入计算机 USB 接口,然后启动 SDRSharp 软件,在 SDRSharp 界面 左上角的 Source 列表下,选择 RTL-SDR(USB)。接下来设置一个本地 FM 电台频率(本例 中设置为 104.3MHz),单击 Run 按钮,就可以收听 FM 广播,如图 3-4 所示。这里需要注 意,不同地区的 FM 电台频率不尽相同,如果没有听到广播,可以调节频率进行电台搜索。



图 3-4 SDRSharp 软件

SDRangel 是另一款专业的 SDR 测试软件,利用该软件,也可以接收并解调 FM 信号, 如图 3-5 所示。值得一提的是,该软件支持无线信号发射。

同样,首先安装 SDRangel 软件。SDRangel 安装完成之后,启动该软件,在左侧选项的 FileInput 图中选择 RTL-SDR 设备,如图 3-5 所示。接下来在左上角设置一个本地电台的 中心频率(本例中设置为 92.7MHz),最后单击 Run 按钮,如果可以听到 FM 广播,看到频 谱图,就说明 RTL-SDR 可以正常使用。

3.1.4 RTL-SDR 发现趣事

早在 2010年,Realtek 公司就将 RTL2832U 芯片操作手册发布给 Linux 开发者,希望 他们能够开发出该芯片在 Linux 系统下的驱动和软件。Eric Fry 就是开发者之一,他用了 大量时间研究 USB 接口传出的数据,并且发布了该芯片在 Linux 下的驱动。

两年之后,芬兰的一名工程专业的学生 Antti Palosaari 在 V4L GMANE 开发者论坛上

① https://airspy.com/download/

[@] https://github. com/f4exb/sdrangel

RTL-SDR[1] 0000001	*S SDRangel			- a ×
Image: Sector Display in the sector of th	Eile View DeviceSets Window Preferences Help		Channels	
Image: set in the set in	RO	RO	S Broadcast FM Demod	⊠^ ₂
Note: Port of NTRUE 2, 500 NG Note: Note:	•••• 0 , 0 9 2 , 7 0 0 Hz -70		▼Settings Δt + 0 , 0 0 0 , 0 0 0 Hz -34	6 dB 🕼 🖌 LL -120.0 dB 😎
Normed D Ok	LO ppm 0 -30 Auto corr DG IQ Fp Ce * X		RF BW	
Normation 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	L SR 1, 024, 000 S/s Dec 1 *		AF BW	15 kHz 2.0 -60 dB
Nime Oi <	No-mod DS Ofs RFBW 2, 500 kHz		Baseband Spectrum	
Structure	Gain 0.0 AGC		50	
Break Break <td< td=""><td>······································</td><td>植物品类的复数形式的现象</td><td>100</td><td></td></td<>	······································	植物品类的复数形式的现象	100	
RTL-SDR[1] 00000001 Image: 100 monodulator	Spectrum Display 838 -90	in the first of the first shared and the state of the sta	200	
V V2.0 V2.0 <t< td=""><td>R0</td><td><u>i'</u></td><td>250</td><td></td></t<>	R0	<u>i'</u>	250	
RTL-SDR[1] 00000001 Image: Strate FM Demodulator	● ● ● ■ A U A ₹ ₽ Ⅲ ● 92.20 92.30 92.40 92.50 92.60 92.70			
Image: state of the break	Sampling devices control		Har 1k 0 7 10 7 No 7 1 7	
Int_complexedure TVD Demodulator Int_or Int_or <td>R0 50</td> <td></td> <td>VRDS data</td> <td></td>	R0 50		VRDS data	
Imposed in 10 Abroaddaur Imposed in 10 A	RTL-SDR[1] 00000001 0 0 100		Dem 0 % Dec 0 % Acc 120.0 dB Fclk 0.00 Hz	0
Commands Description PR PR PR PR PR PR PR PR PR PR	Broadcast FM Demodulator + 125			
Image: All 2 O(6.121 46.64 Webes 18 (BB) 220-22 01 00.2213 #BB #Inf8 RTL-SDR[1] 00000001 Broadcast FM Demodulator	Commands Big 150		0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0
RTL-SDR[1] 00000001 Image: Specific and Specific a	200		BAS PSN TA Speech Stereo AID 00A 0000	000 EWS 00 0000 0000 00 000
Image: state of the s	225		TXT TIM 1900-00-00 00:00 (+0.0h) ECN	
RTL-SDR[1] 00000001 Image: Control of the control o	275		TMC 0000 +1	
Image: ALL OF CALL AND CA	300 325		CSBroadcast FM Demod	8
Image: State of the state o	350		Af + 0, 000, 000 Hz -34	6 dB 🕼 🖌 🔟 -120.0 dB 🕫
Image: State of the state o	400		dB	
Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY Image: ALLO OF LIZE HIGH AND CONTROL OF THE PARTY I	425		RF BW	180 kHz
Image: Contraction of particular system 0.038 Image: Contraction o	450			2.0
CONTACT OF A	a k 500		Sq	-60 68
RTL-SDR[1] 00000001			n SDRannel 4 12 0 CF 5 12 1 v85 64 Wirelever 1	▼
RTL-SDR[1] 00000001 S O Broadcast FM Demodulator +	Ŵ		Dertanger 4.12.0 (k 5.12.1 A00 64 Williams 1	11000 FORD OF OF 00 25122 4-0510/09-110
RTL-SDR[1] 00000001		1		
Broadcast FM Demodulator		e 5		
Broadcast FM Demodulator -	RTL-SDR[1] 0000001			
Broadcast FM Demodulator 🔹 🛨				
	Broadcast EM Demodulator	- +		
	Brotadat i m Bernodalator			

图 3-5 SDRangel 软件

表示,他能够用 RTL 设备侦听无线电信号。他发现,如果 RTL 设备工作于 FM 或数字信号广播(Digital Audio Broadcasting, DAB)模式,会直接输出原始未解调的信号,于是他使用 RTL 设备捕捉了 17s 的 FM 广播信号数据,并在网上询问是否有人可以用软件解调这个信号。信息发布 36h 后,在网友的合作下,他再次发布消息称:"我可能发现了一种超级廉价的 SDR 设备。"

Antti Palosaari 的这个发现激发了软件无线电开发者的兴趣,开发者着重研究了 RTL-SDR 的 USB 协议。他们进一步研究发现,RTL2832U 在 FM 或 DAB 模式下会直接输出 8 位的基带 I/Q 信号。此时 Osmocom 的一些开发者也在其中,由于之前有 osmo-sdr 开发经验,于是很快就能够通过 Osmocom 软件控制 RTL2832U。

2013年之后,随着软件无线电技术的迅猛发展,RTL-SDR 作为 SDR 设备,其使用率远远超过了数字视频广播(Digital Video Broadcasting,DVB)接收机。再回顾 Realtek 公司的设计初衷,可谓是"一次意外的收获"。这也得益于美国 NooElec 公司,该公司采用了 R820T 调谐器,将 RTL-SDR 的频率接收范围扩展到 25MHz~1.75GHz,使之成为目前占 有率最高、成本最低、应用最广泛的 SDR 平台。

3.2 RTL-SDR 的 LabVIEW 接口

对于专业的 SDR 开发者,仅仅了解 SDR 软件的使用显然是不够的,学习如何开发 SDR 软件才是根本。本节将以 FM 接收机为例,介绍基于 LabVIEW 的 SDR 软件开发过程。

3.2.1 RTL-SDR 接口安装

LabVIEW 要控制 RTL-SDR,需要在 LabVIEW 函数库中添加 RTL-SDR 的接口函数。 首先将 rtlsdr 函数文件夹(本书配套程序)复制到主机 LabVIEW 的安装文件目录下,如

\National Instruments\LabVIEW 2013\instr. lib, 启动 LabVIEW,在 Instrument I/O→Instrument Drivers→rtlsdr→VIs 路径下就能够找到 RTL-SDR 在 LabVIEW 中的接口函数模块,如图 3-6 所示。

3.2.2 RTL-SDR 接口函数

RTL-SDR 接口函数介绍如下。

(1) open 函数:查找并开启设备,返回设备 句柄。通过设备句柄,就可以对 RTL-SDR 的参 数进行配置。

(2) set sample rate 函数:设置设备的 I/Q 数据的采样率,最大采样率一般不应超过 2.4M,否则会有数据丢失。

(3) set center freq 函数:设置中心频率,有效范围为 25MHz~1.75GHz。

(4) set freq correction 函数:用于 RTL-SDR 频偏校正,RTL-SDR 会随机产生约 ±20ppm 频偏,在一些典型应用中,使用前需要预先进行频偏校正。

(5) set tuner gain 函数:设置射频调谐器的增益,有效值为{0,9,14,27,37,77,87,125,144,157,166,197,207,229,254,280,297,328,338,364,372,386,402,421,434,439,445,480,496},该值表示 10 倍分贝值,如 115 表示 11.5dB。

(6) set agc mode 函数:设置调谐器内部自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)电路,AGC能够将接收信号的动态范围调整到合适的 ADC 电平。

(7) reset buffer 函数: 重新设置 RTL2832U 内部的数据接收缓存。

(8) read sync 函数:将 RTL2832U 数据通信方式设置为同步通信方式。

(9) close 函数:释放句柄资源,供下次调用时分配。注意,close 函数不可省略,否则再次运行时会报错。

3.2.3 RTL-SDR 数据采集流程

在 LabVIEW 数据采集系统中,一般逻辑是先配置设备,然后进行循环读,最后关闭设备,如图 3-7 所示。



图 3-7 LabVIEW 数据采集的一般流程

RTL-SDR 的数据采集过程也遵循这一逻辑。接下来,本节将通过 RTL-SDR 数据采集的例子说明 RTL-SDR 接口函数的使用方法,如图 3-8 所示。

LabVIEW 编程步骤如下。

(1)利用 open 接口函数搜索 RTL-SDR 设备句柄。首先新建一个空白的 VI,打开程序 框图,从函数选板中导入 open 和 close 两个函数模块,然后在前面板中创建一个数值显示控



图 3-6 RTL-SDR 接口函数

74 ◀II 软件无线电入门教程——使用LabVIEW设计与实现

件 DevRefnum,用于显示 open 函数的输出值,也就是设备句柄。

(2) 在计算机的 USB 接口插入一个 RTL-SDR,运行程序,若 RTL-SDR 接口函数安装 正确,并且 RTL-SDR 正常连接,那么 DevRefnum 将返回设备句柄,否则返回 0,如图 3-9 所 示。需要注意的是,这里 open. vi 输入的 Device index(设备索引)值为 0。



(3) 在程序框图中依次创建 set sample rate. vi、set center freq. vi 和 reset buffer. vi 3 个函数模块,如图 3-10 所示。注意,配置这些函数模块都需要设备句柄信息。利用 set sample rate. vi 接口函数设置 I/Q 采样率,利用 set center freq. vi 接口函数设置设备的中心频率,利用 reset buffer. vi 接口函数重设缓存。

(4) 创建一个 While 循环,再创建一个 read sync. vi 函数模块,通过这个模块,可以读取 缓存中的 I/Q 数据,如图 3-10 所示。

需要注意的是,在 read sync. vi 函数模块中,可以设置单次读取数据的长度。需要指出的是,从 RTL-SDR 中读取的数据格式是 I1-Q1-I2-Q2-I3-Q3… In-Qn,采用 Decimate 1D Array 模块可以将 I/Q 数据分开,如图 3-10 所示。

(5) 将 I/Q 数据的时域波形和频谱显示出来。创建两个波形图和一个频谱测量模块, 在进行频谱测量之前,先构建波形,将数组 I 或数组 Q 作为波形数组 Y 的值,将采样率的倒 数作为采样间隔,如图 3-10 所示。



图 3-10 RTL-SDR 数据采集程序

(6) 创建一个 close. vi 函数模块,用于释放句柄资源,如图 3-10 所示。这里需要特别注意,在程序运行时,如果直接单击 LabVIEW 程序"停止"按钮, close. vi 函数将不会被执行,再次运行程序的时候,可能会因为找不到设备句柄而无法正常运行。因此,需要单击 While 循环中的 stop 按钮停止程序,此时 close. vi 会被执行,再次运行的时候就不会报错。

(7) 切换到前面板,配置 sample rate 和 center frequency 两个参数。sample rate 设置为 200k, center frequency 设置为 104. 3MHz,运行程序,可以获得该频段信号的时域波形和频谱,如图 3-11 所示。



图 3-11 I/Q数据采集波形图

3.3 FM 电台搜索

在 RTL-SDR 数据采集实验中,我们已经能够利用 RTL-SDR 和 LabVIEW 接口模块获 取 FM 频段的 I/Q 信号,为了深入解析这些信号,还需要补充一些必要数学知识,如信号的 复数表示等。接下来,本节将通过 FM 电台搜索实例介绍 RTL-SDR 的控制方法。

3.3.1 信号的复数表示

在通信系统中,一个实带通信号 s(t)可以表示为

$$s(t) = a(t) \cos[2\pi f_{c}t + \varphi]$$
(3-1)

其中,a(t)为幅度; f_{c} 为载波频率; φ 表示相位。将式(3-1)展开可得

$$s(t) = a(t)\cos(\varphi)\cos(2\pi f_{c}t) - a(t)\sin(\varphi)\sin(2\pi f_{c}t)$$
(3-2)

令 $s_{I}(t) = a(t)\cos(\varphi)$,表示同向分量; $s_{Q}(t) = a(t)\sin(\varphi)$,表示正交分量,则式(3-2)进 一步化简为

$$s(t) = s_{1}(t) \cos(2\pi f_{c}t) - s_{Q}(t) \sin(2\pi f_{c}t)$$
(3-3)

将式(3-3)进一步写成复数形式,即

$$s(t) = \Re\{ \left[s_1(t) + j s_Q(t) \right] e^{2\pi f_c t} \}$$
(3-4)

式(3-4)中的复数 [$s_1(t)$ + $js_q(t)$]表达了基带信号的信息,该复数称为复基带信号,设 $s_L(t)$ 表示复基带信号,即

$$s_{\rm L}(t) = s_{\rm I}(t) + js_{\rm Q}(t)$$
 (3-5)

需要指出的是,实际发射和接收的信号都是实信号,而复信号只是等价的数学表达,这

种表达使数学计算更加简洁。

3.3.2 FM 的复基带表示

在实际 FM 调制和解调的过程中,载波调制和解调是在射频前端完成的。在计算机端, 只需完成 FM 复基带信号的设计,或者将复基带信号还原成原始基带信号。设 T_s为 I/Q 采样间隔,k_f为调制灵敏度,A_c为载波幅度,m(nT_s)为需要传输的数字基带信号,则复基 带信号为

$$s_{\rm L}(nT_{\rm s}) = s_{\rm I}(nT_{\rm s}) + js_{\rm Q}(nT_{\rm s})$$
 (3-6)

其中,根据 FM 的调制原理,I 路信号为

$$s_{\mathrm{I}}(nT_{\mathrm{s}}) = A_{\mathrm{c}} \cos\left[\varphi(nT_{\mathrm{s}})\right] = A_{\mathrm{c}} \cos\left[2\pi k_{\mathrm{f}} \int m(nT_{\mathrm{s}}) \,\mathrm{d}t\right]$$
(3-7)

Q路信号为

$$s_{\rm Q}(nT_{\rm s}) = A_{\rm c} \sin\left[\varphi(nT_{\rm s})\right] = A_{\rm c} \sin\left[2\pi k_{\rm f} \int m(nT_{\rm s}) \,\mathrm{d}t\right]$$
(3-8)

注意,这里复基带信号 $s_{L}(nT_{s})$ 是数字信号。

根据 FM 复基带信号的产生过程,可以逆推出 FM 的解调过程。从 RTL-SDR 中获得 复基带信号 $s_L(nT_s)$ 后,只需反正切法求出 $s_L(nT_s)$ 的相位,然后对相位进行微分处理,就可 以还原基带信号 $m(nT_s)$ 。

3.3.3 RTL-SDR 控制参数

1. 设备索引

RTL-SDR 与计算机之间通过 USB 接口通信,需要配置设备的索引。如果只插入一个 RTL-SDR,那么设备索引为 0;如果同时插入两个 RTL-SDR,先插入设备的索引为 0,后插 入设备的索引为 1。

2. I/Q采样率

I/Q采样速率为采样间隔的倒数,即每秒钟采样值的数量。I/Q采样是通过 USB 接口 交织发送的,在 FM 解调实验中,由于语音信号的频率范围为 0~20kHz,所以 I/Q采样速 率设置为 200kHz 就已经足够。

3. 中心频率

FM 广播的中心频率范围为 87.5~108MHz。由于 RTL-SDR 石英振荡器稳定度较低, 实际产生的振荡频率可能会与我们设定的目标中心频率存在大约±20ppm 的频率偏差。

4. 调谐器增益

调谐器增益指的是 R820T 增益,即是在 A/D 转换之前中频信号的增益,有效值范围为 0~49.6dB。需要注意,增大增益的同时也会放大噪声。

5. 采样缓存

采样缓存是一个先入先出的队列,寄存的对象是 I/Q 采样值,计算机通过读函数可以 读取采样缓存中的数据。需要注意的是,在读取数据之前,需要对采样缓存进行重置。

3.3.4 FM 接收机设计模型

在 3.2.3 节中,调用了 RTL-SDR 的接口模块函数,实现了数据接收功能。本节将利用这

些接口函数。实现一个 FM 接收机。从结构上看,仍然采用 RTL-SDR 的数据采集模型,不同的是,增加了频谱计算和频谱显示两个功能模块,各模块之间的逻辑连接关系如图 3-12 所示。



图 3-12 FM 接收机设计模型

3.3.5 FM 电台搜索实例

接下来,本节将通过一个 FM 电台搜索实例,进一步解释从 RTL-SDR 中获取的数据。 实验步骤如下。

(1)复制 3.2.3 节所示的数据采集程序,重命名 VI 并保存,为了确保程序的正确性,运行程序,验证是否能够成功获取数据。

(2)利用 Decimate 1D Array 模块将 I/Q 数据分成两路,然后转换成对应的复数组,并利用 XY 图将其显示出来,如图 3-13 所示。

(3)将中心频率设为 104.3MHz(或本地其他可用电台频率),运行程序。根据 3.3.2 节的理论分析,有

 $s_1(nT_s) = A_c \cos \left[\varphi(nT_s) \right]$, $s_Q(nT_s) = A_c \sin \left[\varphi(nT_s) \right]$ (3-9) 理论结果应是一个圆形,但是由于受噪声、A/D分辨率等因素的影响,实际结果并不是 一个理想的圆,如图 3-14 所示。



(4) 测量 FM 信号的频谱。在 Signal Processing→Waveform Measurements 路径下找 到 FFT Power Spectrum and PSD 模块,利用这个模块,就可以测量 FM 信号的频谱,完整 的程序框图如图 3-15(a)所示,功率谱如图 3-16(b)所示,可以看出,在中心频率 104.3MHz 处有一个明显的峰值。



(5)修改中心频率,从功率谱中发现电台。首先把中心频率设置为 88MHz,采样率设置为 2.4MHz,每间隔 1MHz 扫描频率,直到 108MHz。从功率谱扫描中可以发现广播电台的频谱分布,也能够看出电台信号强弱。需要注意的是,由于接收的 FM 信号与接收地理位置和天线有关,不同广播电台的信号强度可能会不一样,有些信号较弱的广播电台可能要调高增益才能从噪声中区分出来。

3.4 FM 信号解调和播放

RTL-SDR 接收到 FM 信号后,需要对 FM 信号进行解调处理。接下来,本节将介绍 FM 信号的解调流程、程序框图以及基于队列的 FM 接收机。

3.4.1 FM 信号解调流程

根据 2.4.1 节的反正切原理,FM 信号解调和播放大体分为 4 步,依次是相位计算、微分处理、下采样和声音播放,如图 3-16 所示。



图 3-16 FM 接收机模型

(1)相位计算。将复数组转换为极坐标,就可以获得相位,由于相位值分布在[-π,π]范围内,因此还需要进行相位展开处理。

(2) 微分处理。对相位求导直接可以获得基带信号。

(3) 下采样。由于接收信号的 I/Q 采样率为 286.65kHz, 而普通音乐播放设备的采样率是 44.1kHz, 因此需要进行波形下采样。

(4) 声音播放。在 Graphics & Sound→Sound→Output 路径下找到声音播放相关模块。需要注意的是,下采样后的信号输入扬声器之前要进行归一化处理。

3.4.2 RTL-SDR 解调程序框图

完成程序框图编程之后,回到前面板设置参数,运行程序,如果程序正确,则会有断断续 续的声音播放出来,这是因为将 I/Q 数据采集模块、FM 解调模块以及声音播放模块通过串 行的方式放在一个循环之中,这种方式增大了循环时间间隔,会造成声音"卡顿"的问题。 FM 接收机的程序框图如图 3-17 所示。

3.4.3 基于队列的 FM 接收机

为了解决声音"卡顿"问题,可以应用 1.3.6 节中介绍的生产者-消费者设计模式,利用 这种设计模式,可以将 I/Q 数据采集模块和 I/Q 数据处理模块分开,以增大 I/Q 数据采集 效率,如图 3-18 所示。







在这个生产者-消费者设计模式中,采用了 Data Stream 队列结构来实现。在生产者循 环中,不断从 RTL-SDR 中获取 I/Q 数据;在消费者循环中,进行 FM 解调、声音播放以及 频谱显示等信号处理。

在消费者循环中,同时完成 FM 解调、声音播放以及频谱显示功能,也会造成声音卡顿 现象,可以再创建一个队列,用于处理声音播放功能。关于这个问题,将在第4章进一步 介绍。

3.5 RTL-SDR 硬件结构

RTL-SDR 硬件结构采用典型的数字中频接收机结构。接下来,本节将首先介绍 RTL-SDR 内部电路板,然后介绍 RTL-SDR 信号处理的流程,接着详细介绍 RTL-SDR 的两枚核 心芯片: R820T 和 RTL2832U,最后介绍数字中频接收机结构。

3.5.1 RTL-SDR 硬件简介

RTL-SDR 内部硬件电路板如图 3-19 所示,可以看出,RTL-SDR 主要由 R820T 调谐器 芯片、RTL2832U 两枚芯片构成,其中 R820T 负责模拟信号下变频,RTL2832U 负责 I/Q 信号采集和转发。



图 3-19 RTL-SDR 内部电路板

RTL-SDR 电路板上还包含 LED、静电保护(Electrostatic Discharge, ESD) 二极管、红外线(Infrared Radiation, IR) 传感器、晶振、带电可擦可编程只读存储器(Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, EEPROM)以及 USB 2.0 接口等器件。

3.5.2 RTL-SDR 信号处理流程

RTL-SDR 通过 R820T 和 RTL2832U 将射频信号变换为基带信号。RTL-SDR 内部信号处理流程如图 3-20 所示。

首先,天线将射频信号通过 MCX(推入式)连接器耦合到 R820T。R820T 调谐器将射频信号下变频为中频信号。RTL2832U 芯片接着对中频信号进行 A/D 采样、数字下变频等处理,并获得基带信号。最后,USB 2.0 接口将基带信号送入计算机做基带信号处理,如基于 LabVIEW 的信号解调处理。



图 3-20 RTL-SDR 内部信号处理流程

3.5.3 调谐器芯片 R820T

调谐器芯片 R820T 用于射频(Radio Frequency, RF)频段选择,并将接收到的射频信号 下变频到一个固定的中频。R820T 可以接收 42~1002MHz 的射频信号,中频频率为 3.57MHz,其内部结构如图 3-21 所示^①。



其中,RF_IN是 MCX 连接器接口,用于连接天线,以耦合空间中的射频信号。由于天 线会使集成电路累积静电荷,最终可能会导致器件损坏,实际电路中采用了 ESD 二极管连 接 MCX,接地放电以保护集成电路。LNA(低噪声放大器)可以在放大微弱信号的同时提 供较高的信噪比。RF FILTER(射频滤波器)是镜像抑制滤波器,其主要作用是滤除镜像信 号和相邻信道干扰。混频器对射频信号进行模拟混频,其本地振荡信号由压控振荡器 (VCO)模块提供。IF FILTER(中频滤波器)在滤去上变频成分的同时抑制频带外信号,起 到选频作用。VGA 为可变增益控制放大器。

① R820T High Performance Low Power Advanced Digital TV Silicon Tuner Datasheet

3.5.4 控制器芯片 RTL2832U

RTL2832U芯片是 RTL-SDR 的控制核心,最初用于 DVB-T(地面无线数字电视系统)。它最主要的功能是将输入中频信号变换成数字基带信号,并将这些数据传递给计算机。RTL2832U芯片内嵌高速的模拟数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC),采样率为 28.8MHz,采样位数为 8 位。

RTL2832U芯片除了集成 ADC 之外,还集成了 8051 微嵌系统,负责整个板载资源的 控制,其内部结构如图 3-22 所示。



图 3-22 RTL2832U 内部结构

从图 3-22 可以看出,RTL2832U 首先利用 ADC 对中频信号进行采样,这里的中频信号 带宽为 6MHz,ADC 以 28.8MHz 的采样率进行采样。接着,采样数据在芯片内部进行一次 数字下变频,这一过程又分为两步:①将 I/Q 采样信号分为两路,一路与本振信号进行混 频,另一路与经过 90°相移器的本振信号进行混频;②利用数字低通滤波器滤除倍频分量, 得到两路 I/Q 基带信号。最后,利用抽取器对 I/Q 信号进行抽取处理,降低数据量以减轻 后续计算机信号处理的负担。注意:RTL2832U 在 SDR(Single Data Rate)模式下,抽取后 的 I/Q 数据按 I1→Q1→I2→Q2…依次交错输出,通过 USB 2.0 送到计算机。RTL2832U 在 DVB-T 模式下,内部的数字信号处理(Digital Signal Processing,DSP)模块还进行了重 采样、同步、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)、信道估计和均衡、符号逆映 射、信道解码和解交织 PID(比例-积分-微分控制)滤波等数字信号解调处理。一款 RTL-SDR 的原理图如图 3-23 所示。

3.5.5 数字中频接收机结构

RTL-SDR本质上是一种数字中频接收机,如图 3-24 所示,它的解调过程分为模拟信号 处理和数字信号处理两级。在模拟信号处理中,通过模拟电路把射频(RF)降到中频。在数 字信号处理中,通过数字信号处理技术把中频降到基带,更重要的是解调过程可以用软件设 置 RF 频率,这样就能够自定义需要的 RF 频率范围。

RTL-SDR 内部信号处理流程采用低中频接收机结构,射频信号经过天线系统后,首先 利用低噪声放大器进行放大,然后进行镜像抑制滤波,接着通过混频器将射频信号下变频到 中频,在中频段对信号进行中频滤波,并进一步放大以及自动增益控制(AGC),接着将中频 信号送入 ADC 进行采样。ADC 采样之后,信号就在数字域进行处理,首先对数字信号进行



图 3-23 RTL-SDR 的原理图 (源于"老邵的开源世界")



数字下变频解调,然后依次进行抽取和数字滤波处理,最后输出基带信号。

数字低中频结构之所以能够被广泛采用,是因为它能够较好地解决硬件实现过程中存 在的一些问题。例如,采用数字下变频技术,能够有效避免模拟信号中的 I/Q 不均衡问题, 能够有效解决噪声消除和直流偏置效应。此外,中频信号的滤波和解调都可以用软件编程 来实现,以灵活适应不同通信标准的要求。关于低中频接收机结构,将在第7章详细介绍。

3.6 本章小结

本章介绍了一种低成本的软件无线电平台 RTL-SDR。首先,本章介绍了 RTL-SDR 驱动程序安装和验证,介绍了 RTL-SDR 在 LabVIEW 中的接口函数以及这些函数的使用方法。

然后,通过 RTL-SDR 数据采集实例,介绍了 RTL-SDR 的控制方法,为了解析采集的 I/Q 数据,还介绍了信号的复数表示法。

接下来,通过基于 RTL-SDR 的电台频谱扫描和 FM 解调实例,进一步介绍了 RTL-SDR 的使用方法。

最后,介绍了 RTL-SDR 硬件结构、RTL-SDR 的信号处理流程以及软件无线电接收机结构。