

# SDR技术原理解析 USRP收发原理

原创 置顶 光光学长 最后发布于2016-12-03 18:54:11 阅读数 26941 ☆ 收藏

## SDR技术原理解析

本博客通俗地介绍SDR的技术原理。先简单介绍SDR的概念，SDR系统的分类，基于GPP的SDR系统。接着详细介绍SDR系统原理，进一步解析SDR系统的工作流程。

### 一 软件无线电（SDR）概念

软件无线电，即Software Defined Radio，SDR。通俗来讲，SDR就是基于通用的硬件平台上用软件来实现各种通信模块。

概念中有两个关键词，“通用硬件平台”和“软件”。“通用硬件平台”就是说我们能基于这个硬件平台实现各种各样的通信功能，实现一种通信功能。“软件”来实现通信模块是相对于传统的无线电技术来讲的，传统的无线电通信模块都是用硬件电路来设计，一个通信模块只能完成一种功能，开发周期长，开发成本高，而且一旦设计好后功能就无法改变。软件化可以加快通信模块的开发速度，降低开发成本，便于调试和维护。

我们可以用图1来简单看看软件无线电基站与传统的无线电基站的区别。图片左边的是传统的大基站，图片右边的是基于软件无线电的小型化基站。传统基站体积较大，需要设计很多专用的硬件电路；而SDR基站体积较小，大部分通信功能由软件实现。

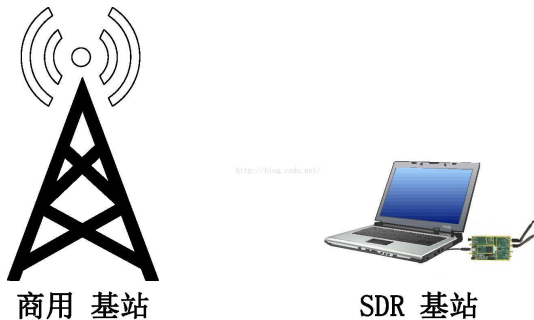


图1 商用基站与SDR基站

SDR技术被誉为通信领域的第三次革命。第一次革命是1G通信系统，由有线通信到无线通信的革命；第二次革命是2G通信系统，由模拟通信到数字通信。SDR是未来通信系统的发展趋势。

### 二 SDR系统分类

比较通用的SDR系统分类是以SDR的硬件平台来分类。SDR系统分为三类：基于FPGA的SDR系统，基于DSP的SDR系统和基于GPP的SDR系统。

#### 2.1 FPGA-Based SDR系统

基于FPGA平台开发的SDR系统，实时处理能力强，但是开发难度大，开发成本也高。这里强调一下在SDR系统对实时处理能力要求很高，我们举个例子，LTE系统的子帧长1ms，也就是说我们的SDR系统必须在1ms内把这一子帧的数据全部处理完并发送出去，不能有任何时延。通信系统带宽越大，对系统的实时性要求就越高。

#### 2.2 DSP-Based SDR系统

基于DSP平台开发的SDR系统，实时性比FPGA略差，而且同样的开发难度大，开发成本也高。

#### 2.3 GPP-Based SDR系统

GPP即General Purpose Processor，通用处理器。我们可以简单的把GPP理解为电脑，即我们使用的台式机、笔记本等。基于GPP能很高效地开发通信系统，因为我们可以很方便的基于各种高级编程语言、各种链接库实现各种通信功能，如编码、调制等。而且，基于GPP的SDR系统开发相比较低的开发门槛，较低的开发成本，开发周期也较短、便于调试等。GPP-Based SDR系统是目前最为通用的一种SDR系统实现形式。

GPP-based SDR系统通常包含两部分，一部分是GPP，另一部分是外设。下一个章节我们将介绍SDR外设的种类。

### 三 SDR系统外设

28

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

23

如图2所示，SDR基站/UE都各自包含一个GPP和一个外设。GPP即我们平常所用的台式机或笔记本电脑。SDR的外设有很多种类，如USRP，blad HackRF，以及低端的RTLSDR等。下面我们分别介绍各种外设的相关信息。

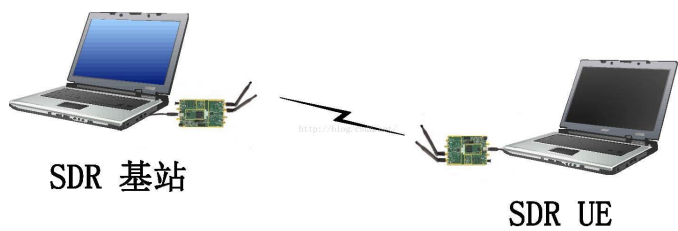


图2 SDR通信系统

### 3.1 USRP

USRP是Ettus公司的产品，目前主要有B系列，E系列，N系列和X系列等，基本上系列字母越靠后价格越贵。由于USRP型号太多，我们这里只介绍B系列。B系列主打小型化，目前有USRP B200/B210、USRP mini系列等，其中迷你系列更是只有一张名片大小。而且B系列都采用USB直接采用USB供电，使用非常便捷。USRP B系列的产品大部分单价都在7000-8000块之间，但是如果加上税钱、运费等，差不多就得10000块了。国内相关的主要是嘉兆科技有限公司。USRP相关产品的介绍请链接官网<https://www.ettus.com/product>



图3 USRP设备

### 3.2 BladeRF


BladeRF主要有三种型号，BladeRF X40，BladeRF X115，BladeRF X115 Thermal。BladeRF X40 是低配版，就是我们手机里面的青春版，大约3000块左右；BladeRF X115是高配版，FPGA比BladeRF X40好，价格约\$650，即4500块左右；而BladeRF X115 Thermal则是顶配版，可以耐受极约\$1500，即10000块左右。BladeRF的详细信息请查阅官网<http://www.nuand.com/>





图4 BladeRF设备


### 3.3 HackRF


HackRF，顾名思义是黑客版的SDR外设，它主打性价比高，价格便宜。HackRF主要有两种版本，HackRF blue和HackRF one，其中HackRF blue是高配版。注意的是HackRF只能支持半双工。HackRF详细的信息请查阅官网<http://greatscottgadgets.com/hackrf/>


  
28


  
23


  
23

  
23

  
23

  
23

  
23

  
23

  
举报



图5 HackRF设备

在国外网站上找到一篇介绍上述SDR外设的区分的博客，<http://www.taylorkillian.com/2013/08/sdr-showdown-hackrf-vs-bladeRF/>，访问可能需要翻墙，有空我给大家翻译翻译。现在先给大家预览一下里面的一个表格。

|  | HackRF         | bladeRF           |       | USRP          |          |
|--|----------------|-------------------|-------|---------------|----------|
|  |                | x40               | x115  | B200          | B210     |
| 频带   | 30 MHz – 6 GHz | 300 MHz – 3.8 GHz |       | 50MHz – 6 GHz |          |
| 带宽   | 20 MHz         | 28 MHz            |       | 61.44 MHz [1] |          |
| 双工   | Half           | Full              |       | Full          | 2x2 MIMO |
| AD 采样位数  | 8 bit          | 12 bit            |       | 12 bit        |          |
| AD 采样率   | 20 Msps        | 40 Msps           |       | 61.44 Msps    |          |
| 接口 (速度)  | USB 2 HS       | USB 3 (5 gigabit) |       | USB 3         |          |
| FPGA 逻辑器件  | [2]            | 40k               | 115k  | 75k           | 150k     |
| Microcontroller  | LPC43XX        | Cypress FX3       |       | Cypress FX3   |          |
| 开源   | Everything     | HDL + Code        |       | Host Code [3] |          |
| Cost   | \$300 [4]      | \$420             | \$650 | \$675         | \$1100   |
| <div>[1] – 56 MHz for single half duplex channel, 30.72 MHz per channel full duplex</div> <div>[2] – There is a CPLD on the board, but no FPGA</div> <div>[3] – Ettus confirmed that the HDL + Code + Schematics will be released for the B210 /B200</div> <div>[4] - Estimated retail price, cheaper though Kickstarter</div> |                |                   |       |               |          |

3.4 RTLSDR

如果说上述设备对学生党来说都太贵了，毕竟动不动就好几千块钱，那么不得不隆重介绍下入门级的SDR外设，RTLSDR。淘宝一搜RTLSDR就能！而且都只需要几十块钱，博主目前就买了一个，正在研究怎么使用。便宜就意味着性能的低，RTLSDR本来是用来接收电视信号的，所以也称为电视棒能接收信号，不能发射信号，而且只有2.8M/s的采样速率，根据奈奎斯特采样定律换算一下理论上最大支持的带宽只有1.4M。但这仍然是一款非常适SDR外设。RTLSDR具体使用方法参见<http://sdr.osmocom.org/trac/wiki/rtl-sdr>和<http://www.rtl-sdr.com/>。



图6 RTLSDR设备

👍  
28

🔗

💬  
23

📖

☆

📱

<

>

赏

🔊

举报

四 SDR系统原理

下面正式开始讲解SDR的系统原理。在上面的介绍中我们知道GPP-Based SDR系统一般都是包含一个GPP和一个外设。我们以一台笔记本电脑为例来给大家讲解SDR系统内部的实现原理。

4.1 发射机

首先我们来看发射端的系统原理图，即图7。图的左边是一台笔记本的示意图，右边的一个USRP B200的发射示意图。

首先看笔记本结构最上面的SDR程序。这个程序就是我们用软件来实现的通信模块，在笔记本上我们可以用各种高级编程语言来编写编码模块，OFDM模块等。鉴于SDR系统对实时性要求较高，所以我们一般使用C或C++语言来编写SDR程序。SDR程序里面包含了通信协议栈的编写，如果写的是LTE系统，则包含PHY、MAC、RLC、PDCP、RRC、NAS甚至MME等；而如果写的是WiFi系统，则包含PHY、MAC、LLC等处理系统的基带数据。

接下来UHD是USRP设备的驱动模块，不同的外设使用的驱动也不一样，因为我们是USRPB200为例，所以驱动模块是UHD。UHD的官方网站是<http://blog.csdn.net/jxwxg/article/details/53002311>使用C或者C++调用UHD的库函数可以参见<http://blog.csdn.net/jxwxg/article/details/5314>

接下来是系统的各种系统库和系统调用的接口以及内核。强调一点，大部分SDR程序都是基于Linux来开发的，很少基于Windows开发，而且实时性较好。这一块主要涉及操作系统方面的知识，我们不在这里深入讨论。

USRP B200与GPP的接口是USB3.0。外设接口的选择也很重要，接口的传输速率必须快，不能成为整个系统的瓶颈。USRP早期的产品是用串口，因为当时通信系统的吞吐量较小，所以不会限制使用。现在大部分外设都是用USB3.0或者以太网网口作为外设接口。USB3.0的接口速度可以达到基本能满足大部分通信系统的需求。

接着笔记本电脑通过USB3.0把数据传输给USRP B200。USRP最底下的两个模块是发送控制模块和数字上变频模块（DUC）。这两个模块是用FPGA实现的，用FPGA实现的好处是处理速度快。发送控制模块好理解就是用来控制整个USRP的发送行为，例如什么时候发送等。DUC模块是为了把电脑产生的基带信号变频到中频。之后数字信号经过USRP的DAC之后转化为模拟域的数据，数模转化之后需要过一个低通滤波器使信号变的更加平滑。最后中频的模拟域信号相乘把我们的中频信号调制到制定的射频频点上。

最后射频信号再经过功率放大器把信号发射出去。信号放大器里面也有很多知识可以学习。例如信号放大器分为A类，B类和C类等，具体每一类的具体解释了。我们可以通过UHD提供的库函数来修改发射信号的发射增益，即tx\_gain。tx\_gain这个参数对信号的影响还是挺大的，tx\_gain设置的太小，而如果设置的过大可能会导致系统的低噪上升，也有可能影响其他通信系统的正常工作。

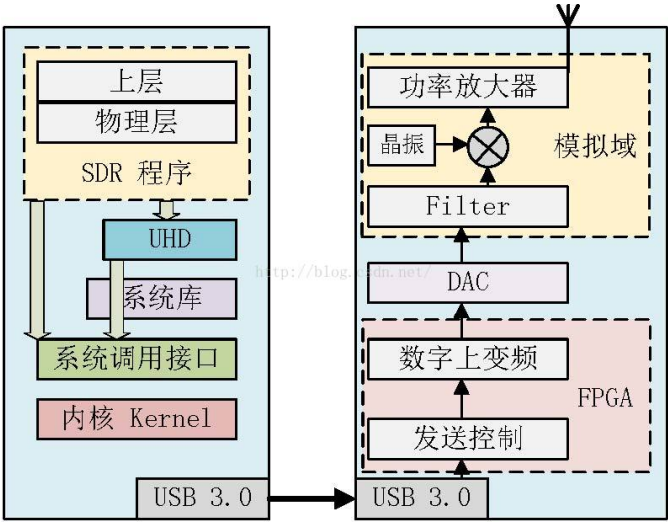


图7 SDR发射机原理图

4.2 接收机

可能有人会问为什么要经过两次变频。我们以SDR接收机给大家讲解。如图8所示是SDR接收机的原理图。同样的，左边是笔记本的示意图，与发射机类似，右边是USRP的接收示意图，USRP接收示意图与发射示意图稍有不同。

首先接收部分的放大器变成了低噪放，顾名思义，低噪放就是低噪声的放大器，本质上还是个放大器。因为接收的信号里面包含了信道的噪声，接收放大的过大。

信号经过低噪放后与USRP晶振产生的信号相乘把信号下变频到中频，同样地再经过一个低通滤波器把信号变得平滑。

之后中频信号经过ADC把模拟域的信号转到数据域。ADC是USRP里面很重要的一个部件。ADC主要由两个参数，采样精度和采样率。采样精度表示用多少bit来表示，例如USRP B200的ADC精度为12 bits，即采样后的每一个数据用12bits来表示。采样率就是系统的采样速率，USRP B200的采样率为61.44MS/s。这也就是为什么大部分SDRLTE系统都采用USRP B系列作为外设的原因，61.44MS/s的采样率刚好是LTE系统最大采样速率30.72M的



同样地信号经过ADC之后，数字信号被送入FPGA模块处理。FPGA里面包含两个模块，数字下变频和接收控制。接收控制用来控制整个USRP系统例如什么时候开始接受等。数字下变频即DDC，用于把信号从中频下变频到基带。

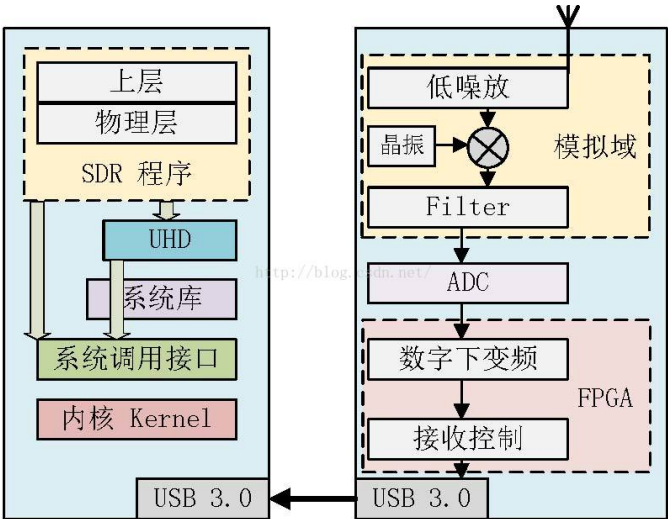


图8 SDR接收机原理图

为什么要经过两次下变频呢？如图9所示，第一次变频是在模拟域通过晶振产生的信号与射频信号相乘把信号下变频到中频，这一次变频主要是为采样。我们知道采样需要满足奈奎斯特采样定律，采样的频率必须大于信号的最高频率的2倍，而射频信号的载波频率已经能都达到2.6GHz，甚至5GHz做出载波频率两倍的采样速率的ADC。所以系统先把信号下变频到中频，然后再利用ADC对信号进行模数转化。因为USRP ADC的采样率为61.44MS/秒可以推出USRP对应的中频频率应该低于30.72MHz。

接着中频的数字信号被DDC下变频到基带。有人可能会问为什么不直接把信号一次变频到基带呢，这样的接收机叫做零中频接收机。如果载波频率高的接收机设计会非常复杂，所以零中频接收机一般用于载波频率较低的系统里面。

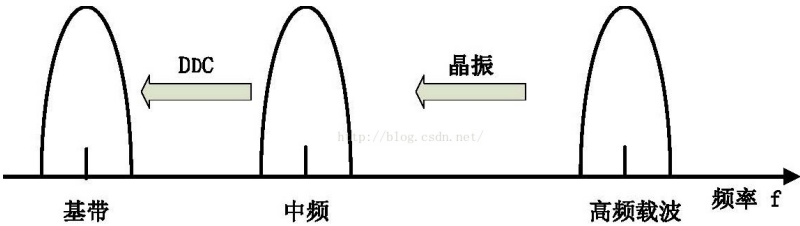


图9 下变频原理示意图

数字信号经过USB3.0接口传输到笔记本电脑上后，电脑再把数据传输给SDR程序处理。物理层处理完后再把数据交给上层。这样SDR接收机的信号就完成了。

SDR发射机/接收机里面的每一个模块都对应一大片知识，知识的海洋是无穷的，这里的介绍只能起一个抛砖引玉的作用。如果大家想深入学习的话，可以参考相关资料。

## 五 SDR LTE系统

上一章节从SDR发射机和接收机的角度分别介绍SDR系统的原理。下面我们以SDR LTE系统为例给大家介绍一个SDR系统的例子，有助于大家理解SDR通信系统。

目前国际上已经有好几个开源的SDR LTE系统，如OpenAirInterface，srsLTE，OpenLTE等，详情可以查看<http://blog.csdn.net/jxwxg/article/details/53026659>。开源的SDR LTE系统非常适合用来学习SDR和LTE的原理和知识。

下面以图10来介绍SDR LTE系统的工作流程。

首先LTE的上层有数据需要物理层发送，比如我们要发送一个经典的字符串“Hello World”，上层把数据编码成Bit流自后交给物理层。上层可能编码，把Hello World编码成对应的Bit流。即物理层收到的是一连串的100110等。

Bit流传到物理层后开始进行编码，LTE采用的是1/3 码率的Turbo编码，再经过加扰，加扰可以理解为将Bit流随机化，避免出现一大串连续的0或1。在发送端用小区专用扰码序列进行加扰，接收端再进行解扰，只有本小区内UE才能根据本小区的ID形成的小区专用扰码序列对接收到的信号进行解扰，这样可以在一定程度上减小临小区间的干扰。

接着Bit流经过调制模块后被调制成复数。LTE里面采用的是QPSK，16QAM和64QAM等调制方式，出来的数据形式如0.707+0.707j。

接着复数进行资源映射，把复数映射到LTE的时频资源上，最后再对这些信号进行OFDM把信号转换到时域。此时，SDR程序的工作便完成了，生的基带数据。

紧接着，GPP把基带数据通过USB3.0接口把数据传输给USRP，由USRP经过上一章讲述的流程把基带信号上变频到射频并发送出去。

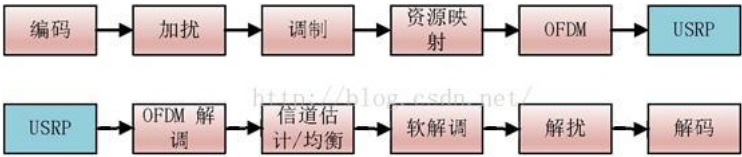


图10 SDR LTE系统原理

LTE接收机的过程基本与发射机相反。

USRP把接收到的射频信号下变频到基带后通过USB3.0接口传输给SDR程序。SDR程序把接收到的一连串复数先做OFDM解调，接着信道估计/均衡，数据仍然是复数形式的。经过软解调之后数据变成Bit流，最后再进行解扰，解码恢复出“Hello World”的ASCII码，传输给UE的上层后，UE就输出一串信息，即“Hello World”。

至此，通信的过程完成。

## 六 参考文献

我的SDR方面的 SCI 论文

X. Wei; H. Liu; Z. Geng; K. Zheng; R. Xu; Y. Liu; P. Chen, "Software Defined Radio Implementation of a Non-Orthogonal Multiple Access Sys 5G," in IEEE Access , vol.PP, no.99, pp.1-1

我的博士师兄带我飞的论文

X. Xiong, W. Xiang, K. Zheng, H. Shen and X. Wei, "An opensource SDR-based NOMA system for 5G networks," in IEEE WirelessCommunic 22, no. 6, pp. 24-32, December 2015.

👍 点赞 28    ☆ 收藏    ➦ 分享    ...



光光学长

发布了49 篇原创文章 · 获赞 406 · 访问量 61万+

私信

亿速云提供免费代搭建部署环境

亿速云防攻击服务器，20+行业领袖视频推荐 增强防CC? 防1000G DDOS BGP\电信\香港 实时开通

广告 亿速云



想对作者说点什么



qq\_34881089 1年前

作者您好，请问B210可以实现四路同时接收信号吗？现在在学这方面的东西。。。



非非主流 1年前

博主有没有兴趣加盟我们技术团队，做一些SDR方面的项目。



胖腿 1年前 博主，可以转载吗？



qq\_33473249 1年前

博主您好，我用的是usrp n210，在执行GNUradio自带的tunnel时遇到了 “in method ‘usrp\_source\_sptr\_set\_antenna’, argument 2 of type ‘std::string’ const” 请问您知道怎么解决吗



qq\_33473249 1年前



举报