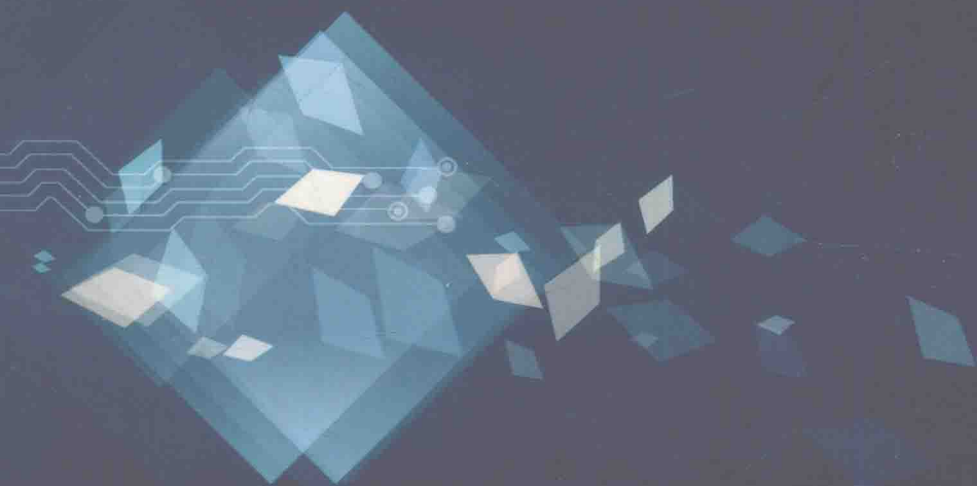


GNU Radio

软件无线电技术

白 勇 胡祝华 编著



科学出版社

GNU Radio 软件无线电技术

白 勇 胡祝华 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书首先介绍软件无线电技术的发展背景和历程,然后对一些常见的软件无线电平台进行详细的介绍(第1章);其次介绍软件无线电技术中的主要理论,包括信号采样理论、多速率信号处理技术、数字滤波器技术以及软件无线电的基本结构等(第2章);接着,针对GNU Radio 软件无线电中的软硬件平台进行详细的介绍(第3章),并给出GNU Radio 软件无线电系统环境在Ubuntu上的安装与测试方法(第4章);随后,介绍GNU Radio 中的附带工具和功能软件,重点介绍GRC的使用方法,以及如何使用GRC和Python来开发通信系统(第5、6章);在此基础上,本书还详细分析基于C++语言来开发信号处理模块的问题(第7章),同时对QPSK&GMSK调制方式、OFDM无线传输以及MIMO技术的GNU Radio 仿真实现进行详细的介绍和分析(第8章);最后,本书对常见的基于GNU Radio 的软件无线电科研项目(OpenBTS、Hydra和GQRS)进行深入的分析 and 探讨(第9章)。

本书可以为那些想通过构建GNU Radio 平台来开发和验证自己的创新想法或创新实践的科研和工程人员提供系统性的知识脉络和开发思路。

图书在版编目(CIP)数据

GNU Radio 软件无线电技术/白勇,胡祝华编著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050757-0

I. ①G… II. ①白… ②胡… III. ①软件无线电 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第279409号

责任编辑:任 静 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京数图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1 000 B5

2017年1月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:256 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

按照传统的无线电产品开发思路，当有新技术出现或版本需要升级时，要开发新的专用芯片来支持，这往往会带来巨大的投资风险，导致制造商和运营商对新技术持观望态度，从而限制了新技术的快速应用和推广。而软件无线电技术能够提供一种新的解决方案，该技术由 Joseph Mitola 于 1992 年首次提出，受到业界的广泛关注。与传统的无线电技术相比，该技术不必设计、开发新型专用芯片，即可验证新技术的性能，如信号发生、调制/解调、信道编译码等信号处理过程以及协议栈均可由软件实现，而不需要硬件电路的支持。由于软件无线电具有设备可重配置的特性，所以改变了传统的基于硬件和面向用途的产品设计与开发方法，把信号的数字化处理尽量靠近天线侧，能够在前端硬件配置不变的情况下通过编写软件实现新的功能。软件无线电的这一特点有利于新技术的发展，也有利于新技术的应用和推广。同时软件无线电技术为无线电技术领域的众多科研与工程人员提供了很好的开发和研究平台，可以非常容易地在搭建的软件无线电平台上验证各种创新设计和科学设想的可行性，从而可以让科研工作者将更多的精力集中在创新思路的构建上。

GNU Radio 软件无线电技术是采用 GNU Radio 开源软件平台、普通 PC 和廉价的硬件前端来开发各种软件无线电应用的一门技术。其中，GNU Radio 是一个开源的无线电平台的软件包。它是由 Eric Blossom 发起的一个完全开放的软件无线电项目，旨在鼓励全球技术人员积极参与到这一领域的协作与创新。GNU Radio 的开发主要是基于 Linux 操作系统，采用 C++ 编程语言结合 Python 脚本语言进行编程，也可以将它移植到其他的操作系统上。而硬件前端一般采用 USRP (Universal Software Radio Peripheral) 套件来实现。该套件通常由天线、射频前端、模数/数模转换器以及通用数字信号处理器组成。

GNU Radio 软件无线电技术可以理解为开源软件的自由精神在无线领域的延伸，开放性和低成本是其最大的优势。低成本使得技术人员和资金不太充裕的研究机构可以像购买 PC 一样拥有一套能自由进入频谱空间的软硬件系统，从而为更广泛的技术创新打下基础。在 GNU Radio 的邮件讨论组中每天都有来自世界各地的用户对各种相关技术问题的讨论，这些用户包括学生、大学教师、软硬件工程师、无线工程师、业余无线电爱好者，而这些人正是推动技术进步的主力。GNU Radio 的开放特性也是其具有广泛吸引力的重要因素，同时也是其生命力的源泉。由于代码和技术资料完全开放，人们可以了解到其运作的所有细节，并可自由地对其进行修改和开发。在这种开放的氛围之下，人们取得的知识、成果可以得到充分的交流共享，更有益于创新。

当前，自组织网络、认知无线电技术、可重配置智能终端是无线通信领域几大热

点，而基于 GNU Radio 和 USRP 可以快速地设计出终端原型，因而可以让科研和工程人员从繁杂的验证平台搭建中解脱出来，将大部分的精力集中在核心技术的创新上，在这些领域的研究中具有相当的潜力。尽管目前 GNU Radio 在最大频带宽度、PC 处理能力以及软件的易用性方面仍然受到一定限制，但相信随着技术的进步，GNU Radio 必将在无线领域的技术创新中扮演更加重要的角色。

本书的编写工作得到了国家自然科学基金项目（项目编号：61561017、61261024）、海南省自然科学基金项目（项目编号：614221、20156228）以及 2016 年博士研究生优秀学位论文培育计划项目的资助，特此感谢。另外，本书在编写过程中参考了大量的论文、著作和网上的博文，在此一并表示感谢。

本书由海南大学的白勇、胡祝华执笔完成。其中，本书的第 2、5、6 章由白勇负责编写，第 1、3、4、7、8、9 章由胡祝华负责编写。

与本书内容相关的 Ubuntu 系统、软件和开发模板等资源，作者将其放在百度云盘中可供读者下载。百度云盘资源的提取地址为 <http://pan.baidu.com/s/1c2GCDxe>，访问密码为 bc9c。

由于时间仓促，作者水平有限，加上这一技术领域还在迅速发展之中，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 软件无线电发展概述	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 软件无线电概念及关键技术	2
1.1.3 软件无线电研究现状	3
1.1.4 存在的问题探讨	5
1.2 软件无线电平台介绍	6
1.2.1 GNU Radio	6
1.2.2 SORA	7
1.2.3 Open Air Interface	14
参考文献	17
第 2 章 软件无线电基本理论	20
2.1 信号采样理论	20
2.1.1 采样定理	21
2.1.2 带通信号采样定理	22
2.2 多速率信号处理	23
2.2.1 整数倍抽取	23
2.2.2 整数倍内插	25
2.2.3 采样率分数倍变换	27
2.3 数字滤波器	27
2.3.1 数字滤波器设计基础	28
2.3.2 半带滤波器	28
2.3.3 积分梳状滤波器	29
2.4 软件无线电基本结构	30
2.4.1 数字下变频	30
2.4.2 数字上变频	31
参考文献	32
第 3 章 GNU Radio 软件无线电平台	33
3.1 GNU Radio 平台综述	33

3.2	GNU Radio 软件架构	35
3.3	GNU Radio 硬件平台	37
3.3.1	HackRF	38
3.3.2	bladeRF	39
3.3.3	USRP	40
3.4	USRP 硬件平台	42
3.4.1	USRP 母板	43
3.4.2	USRP2 母板	45
3.4.3	USRP 子板	46
	参考文献	49
第 4 章	GNU Radio 的安装	50
4.1	安装需求	50
4.2	Linux 下的安装	50
4.2.1	安装 Ubuntu 10.10 操作系统	50
4.2.2	在 Ubuntu 10.10 系统下安装 GNU Radio	52
4.3	安装后的测试	53
4.3.1	连接检测	54
4.3.2	程序测试	56
4.3.3	图形界面 GRC 的测试	60
	参考文献	61
第 5 章	GNU Radio 的使用	62
5.1	引言	62
5.2	使用系统附带工具及功能软件	62
5.3	使用 GNU Radio 仿真	64
5.4	使用图形化信号处理开发工具 GRC	64
5.4.1	GRC 简介	64
5.4.2	核心概念	64
5.4.3	GRC 使用要点	66
5.4.4	GRC 使用举例	68
	参考文献	71
第 6 章	使用 Python 开发 GNU Radio 应用程序	72
6.1	Python	72
6.1.1	Python 语言简介	72
6.1.2	GNU Radio 中的 Python	77

6.2	编程概念	77
6.2.1	低通滤波器音频记录机	77
6.2.2	拨号音发生器	78
6.2.3	QPSK 解调器	78
6.3	第一个 Python 代码例程	79
6.4	编程指南	81
6.4.1	Python 如何调用 C++程序	81
6.4.2	GNU Radio 模块	82
6.4.3	选择、定义和配置功能块	83
6.4.4	模块的阶层结构	85
6.4.5	并行流程图	87
6.4.6	GNU Radio 的扩展和工具	89
6.4.7	流图的控制	89
6.4.8	非流图应用	91
6.4.9	高级主题	91
	参考文献	95
第 7 章	使用 C++开发 GNU Radio 信号处理模块	96
7.1	C++编程规范	96
7.1.1	编辑规范	96
7.1.2	设计规范	100
7.2	模块结构	102
7.3	信号处理模块的编写	103
7.3.1	关键知识点	103
7.3.2	基于 C++的开发方法	108
7.3.3	第一个模块	112
7.4	图形界面的使用	116
7.5	外部库文件的使用	121
7.6	Octave 和 MATLAB 的使用	122
7.6.1	Octave 的使用	122
7.6.2	MATLAB 的使用	124
7.7	版本控制	127
	参考文献	129
第 8 章	GNU Radio 无线传输实现范例	131
8.1	GNU Radio 调制方式实现	131
8.1.1	DQPSK&QPSK 调制方式实现	131

8.1.2	GMSK 调制方式实现	140
8.2	GNU Radio 的 OFDM 无线传输	145
8.2.1	系统框图和 MAC 帧的构成	145
8.2.2	物理层	147
8.2.3	开发和调试方法	151
8.2.4	OFDM 系统实验结果及分析	153
8.3	GNU Radio 的 MIMO 技术	155
8.3.1	mux 参数的含义	156
8.3.2	代码示例	158
	参考文献	164
第 9 章	GNU Radio 科研项目	166
9.1	GNU Radio 科研项目概述	166
9.2	GNU Radio 科研项目介绍	166
9.2.1	OpenBTS 项目	166
9.2.2	Hydra 项目	180
9.2.3	认知无线电压缩频谱感知项目	183
9.2.4	其他应用	191
	参考文献	191
附录 A	main_usrp_tx.py	193
附录 B	demo_usrp_rx.py	198

第 1 章 绪 论

1.1 软件无线电发展概述

1.1.1 背景

海湾战争时,以美国为首的多国部队联合作战,但由于每个国家使用的通信设备制式不尽相同,虽然有些电台基本结构相似,但它们的信号在工作频段、调制方式、通信协议等方面都有很大的差异。这些差异使得不同电台之间并不能互相兼容、互相联通,给协同作战带来困难,因而并没有做到实质上的“联合作战”^[1]。为解决这一难题,在 1992 年 5 月, Mitola 在美国通信系统会议上首次提出“软件无线电”(Software Radio, SR)的概念^[2]。1995 年,软件无线电被美国电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)通信杂志(*Communication Magazine*)制成专集,并主要介绍了与软件无线电相关的概念和应用,如军用 SpeakEasy(易通话)^[3]以及第三代移动通信(3rd-Generation, 3G)开发基于软件的空中接口计划等内容。1996~1998 年间,经国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)制订 3G 标准的研究组讨论,软件无线电也成为第三代移动通信系统实现的技术基础。1999 年 6 月,“模块化多功能信息变换系统”(Modular Multifunction Information Transfer System, MMITS)论坛更名为“软件定义无线电”(Software Defined Radio, SDR)论坛^[4],开始从理想的软件无线电转向研究与当前技术发展相适应的“软件定义无线电”。1999 年以后,以 SDR 技术为背景的 3G 成为软件无线电研究亟待解决的主要问题。

与此同时,进行软件无线电技术研究的还有 SpectrumWare 项目^[5]和 RDRN (Rapidly Deployable Radio Networks Project)^[6]。前者由美国麻省理工学院进行研究,主要基于工作站或 PC 对信号用软件进行处理以实现无线通信。由于 PC 的运算处理能力有限,即使联合多台机器进行分布式处理,所能达到的带宽依然非常有限。然而,该研究使得无线通信系统和其他计算机应用平台变得非常相似,软件的开发和测试是非常方便的。RDRN 由 Kansas 学校负责研究,主要用于无线异步传输模式(Wireless Asynchronous Transfer Mode, WATM)的设计,根据变化的无线环境自适应改变链路层和网络层以实现高速无线通信系统的快速部署。该项目的主要目的是对 WATM 协议的验证。测试频段为 1.3GHz、5.3GHz、5.8GHz,调制方式为 MPSK (Multiple Phase Shift Keying),速率为 1~8Mbit/s。

软件化的无线调制解调器,能兼容军队现有的各种调制解调器,实现军队通用的多频段、多功能的无线电平台。近年来,人们开始专注于软件无线电在民用移动通信领域的研究和应用^[7-12],欧洲的先进通信技术与业务(ACTS)计划,研究如何将软件无线电技术应用于下一代 UMTS(Universal Mobile Telecommunications System)系统,分别对软件无线电的硬件平台、接入、终端等关键技术进行研究,包括 FIRST(Flexible Integrated Radio Systems Technology),将软件无线电技术应用到设计多频/多模(可兼容 GSM、WCDMA、现有的大多数模拟体制)可编程手机,这种手机可自动检测接收信号以接入不同的网络;FRAMES(Future Radio Wideband Multiple Access Systems),该计划的目标是定义、研究与评估宽带有效的多址接入方案来满足 UMTS 要求,方法之一是采用软件无线电技术;SORT(Software Radio Technologies),该计划是演示灵活有效的软件可编程电台,它具有无线自适应接入功能,并符合 UMTS 的标准;TRUST(Transparent Reconfigurable Ubiquitous Terminals),该计划提供和验证支持可重构的网络概念终端和终端重新配置的概念。随着移动通信技术的发展,软件无线电技术将在 3G、4G 和未来 5G 无线通信系统中得到广泛的应用。

1.1.2 软件无线电概念及关键技术

在 1992 年发表的论文中,Mitola 把软件无线电定义为:软件无线电是一种多频段无线电,它具有天线、射频前端、模数和数模转换器,能够支持多种无线通信协议,在理想的软件无线电中,包括信号的产生、调制/解调、定时、控制、编/解码、数据格式、通信协议等各种功能都可以通过软件来实现^[2]。换句话说,软件无线电是指在硬件平台不变的前提下通过软件编程对物理硬件进行配置以获得灵活性的无线电。由此引发的软件无线电革命,使调制解调器的功能和业务彻底摆脱了硬件的束缚。

由以上软件无线电发展背景可以看出,人们对软件无线电的研究日益深入细致,理论上已经基本成熟,正在进行各种应用的具体实现。软件无线电技术是软件化、计算密集型的操作形式,它与数字和模拟信号之间的转换、计算速度、运算量、数据处理方式等问题息息相关,这些技术决定着软件无线电技术的发展程度和进展速度。宽带/多频段天线、高速 ADC 与 DAC 器件、高速数字信号处理器是软件无线电的关键技术^[13]。

1. 宽带/多频段天线

理想的软件无线电系统的天线部分应该能够覆盖全部无线通信频段,通常来说,由于内部阻抗不匹配,不同频段的天线是不能混用的。而软件无线电要在很宽的工作频率范围内实现无障碍通信,就必须有一种无论电台在哪一个波段都能与之匹配的天线。所以,实现软件无线电通信,必须有一个可通过各种频率信号而且线性性能好的宽带天线。

软件无线电台覆盖的频段为 2~2000MHz。就目前天线的发展水平而言,研制一

种全频段天线是非常困难的。一般情况下,大多数无线系统只要覆盖几个不同频段的窗口即可,不必覆盖全部频段。因此,现实可行的方法是采用组合式多频段天线的方案,即把2~2000MHz频段分为2~30MHz、30~500MHz、500~2000MHz三段,每一段可以采用与该波段相符的宽带天线。这样的宽带天线在目前的技术条件下是可以实现的,而且基本不影响技术使用要求。

2. 高速 ADC 与 DAC

在软件无线电通信系统中,要达到尽可能多地以数字形式处理无线信号,必须把ADC尽可能地向天线端推移,这样就对ADC的性能提出了更高的要求。为保证抽样后的信号保持原信号的信息,ADC转换速率要满足奈奎斯特(Nyquist)采样定律,即采样率至少为带宽的两倍。而在实际应用中,为保证系统更好的性能,通常需要大于带宽两倍的采样率^[14]。ADC将连续的模拟信号量化为离散的数字信号,采用 N 比特表示,但量化过程中会带来量化噪声,理论上量化信噪比可以近似表示为 $SNR_{dB} \approx 6.02 \times N + 1.76$ ^[15],因此,增加ADC的量化精度可以提高量化信噪比。一般采样速率和量化精度由ADC的电路特性和结构决定,而在实际情况中这两者往往是矛盾的,即精度要求越高,则采样率就越低;而降低精度就可以实现高速、超高速采样。

3. 高速数字信号处理器

数字信号处理器是整个软件无线电系统中的核心,软件无线电的灵活性、开放性、兼容性等特点主要是通过以数字信号处理器为中心的通用硬件平台和软件来实现的。从前端接收的信号,或将从功率放大器发射出去的信号都要经过数字信号处理器的处理,包括调制、解调、编码、解码等工作。由于内部数据流量大,进行滤波、变频等处理运算次数多,必须采用高速、实时、并行的数字信号处理器模块或专用集成电路才能达到要求。要完成这么艰巨的任务,必须要求硬件处理速度不断增加,同时要求算法进行针对处理器的优化和改进。在单个芯片的处理速度有限的情况下,为了满足数字信号实时处理的需求,就需要利用多个芯片进行并行处理。

1.1.3 软件无线电研究现状

软件无线电需要将现代先进的通信技术、微电子技术和计算机技术结合在一起,是一个中长期的研究项目,需要很强的综合实力^[16,17]。软件无线电的目的是希望建立开放式、标准化、模块化的通用硬件平台,将各种功能,如频率、调制方式、数据率、加密模式、通信协议等都由软件来完成,因此,软件无线电设备更易于重新配置,从而可灵活地进行多制式切换并适应技术的发展演进。广义上的软件无线电分为三类。

(1) 基于可控制硬件的软件无线电平台。将多种不同制式的设备集成在一起,如现在市场上的GSM-CDMA双模手机。显然这种方式只能在预置的几种制式下切换,

要增加对新的制式的支持则意味着集成更多的电路, 重配置能力十分有限。通过设备驱动程序来管理、控制硬件设备的工作模式、状态。

(2) 基于可编程硬件的软件无线电平台。基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)和数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP), 这类可编程硬件重配置的能力得到了很大提高。但是用于FPGA的VHDL(Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language)、Verilog等编程语言都是针对特定厂商的产品, 使得这种方式下的软件过分依赖于具体的硬件, 可移植性较差。此外, 对广大技术人员来说, FPGA和DSP开发的门槛依然较高, 开发过程也相对比较烦琐。

(3) 基于通用处理器的软件无线电平台。针对以上两类缺陷, 第三类软件无线电平台采用通用处理器(如商用服务器、普通PC以及嵌入式系统)作为信号处理软件的平台, 具有以下几方面的优势: 纯软件的信号处理具有很大的灵活性; 可采用通用的高级语言(如C/C++)进行软件开发, 扩展性和可移植性强, 开发周期短; 基于通用处理器的平台, 成本较低, 并可享受计算机技术进步带来的各种优势(如CPU处理能力的不断提高和软件技术的进步等)。

就目前而言, 有关软件无线电的研究主要集中在两个方面: 一是软件无线电通用硬件平台; 二是软件无线电应用方面。基于软件无线电技术的通信系统的设计, 世界各地的研究进展情况相对不均衡, 美国和欧洲处于世界领先地位, 其中技术领先的代表之一就是前面所述的SpeakEasy系统, 该系统使不同军用电台实现了互通。据悉, 在该系统的影响下, 美国国防部下属多个公司已经开始了覆盖多频段, 包含多模式兼容电台的研制, 例如, 哈里斯公司研制的覆盖多频段车用电台; 马格纳斯克公司研制的包含多模式的通信电台等, 诸多的兼容电台使美军的前线战地控制、空中运行管理和补给支撑超越了通信标准和通信模式的限制。当前美国国防部已经开始了新一代软件化卫星通信终端的研究, 期望使多平台、多标准间无缝互通技术趋于成熟。

就国内而言, 有许多研究机构已经开始研究软件无线电技术, 一些单位已经取得了一定的成果。例如, “十五”计划中由国内多单位合作研发的软件无线电重点项目“软件无线电电台”。而我国政府对软件无线电项目相当关注, 将软件无线电列在863计划内, 通过国内通信研究人员的努力, 也取得了非常不错的成绩。其中包括: 信威公司在软件无线电的基础上开发的SCDMA(Synchronous Code Division Multiple Access)基站及其对应的通信系统; 大唐公司向国际电信联盟提交并采用的、利用软件无线电技术完成设计的第三代移动通信标准, 其中将软件无线电作为TD-SCDMA(Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access)技术的核心技术之一^[18]。

从移动网络运营商的角度来说, 如今越来越多的人使用移动设备接入如视频流和游戏等高带宽业务, 这给移动网络的容量带来巨大的挑战。微基站对未来无线宽带的部署起到了举足轻重的作用, 它能帮助运营商在避免新建造价高昂、选址困难的情况下, 继续为用户提供高质量的服务。目前, 一些运营商已经开始基于软件无线电的思想发展下一代基站^[19]。

2010 年 4 月, 中国移动正式发布了面向绿色演进的新型无线网络架构 C-RAN (Cloud-Radio Access Network) 白皮书, 阐述了对未来集中式基带处理网络架构技术发展的愿景。C-RAN 架构主要包括三个组成部分: 远端无线射频单元(Remote Radio Unit, RRU)和天线组成的分布式无线网络; 高带宽、低延迟的光传输网络连接远端无线射频单元; 高性能通用处理器和实时虚拟技术组成的集中式基带处理池。分布式的远端无线射频单元提供了一个大容量、广覆盖的无线网络。由于这些单元灵巧轻便, 便于安装维护, 所以可以大范围、高密度地使用。

2011 年, 阿尔卡特朗讯宣布推出 LightRadio 计划, 它将通常位于每个蜂窝小区站塔底部的基站分解为多个部件, 并把功能块分布在天线和云架构网络中。该系统还将各种蜂窝站塔天线整合凝缩为单一的、体积更小、功能更强大的多频、多标准(2G、3G、LTE (Long Term Evolution))的有源天线矩阵设备, 可安装在电线杆上、建筑物旁或其他任何可供电和具备宽带连接的地方。LightRadio 方案是实现传统网络向更多样化网络演进的革命性方式, 能够带来更高的网络容量和更低的成本, 这将彻底颠覆现有移动和宽带基础架构, 显著简化移动网络结构。2011 年 5 月, 诺基亚西门子通信在杭州展示其动态无线电(LiquidRadio)架构, LiquidRadio 由三大组件构成, 包括基带池、有源天线系统和统一异构网络, 能让网络流量灵活覆盖, 并且可以让容量增益大小进行快速的智能化选择。LiquidRadio 消除了传统移动宽带网络的严格结构限制, 能有效应对用户在网络中移动而产生的流量“涨落”“移动”问题, 通过基带池技术来满足网络内流动的需求, 可以集中资源为特定区域中所有基站提供通用的处理功能, 保证网络兼容与互操作性, 确保在 WiFi、2G、3G、LTE 等不同网络模式之间融通。

1.1.4 存在的问题探讨

目前, 虽然软件无线电的核心思想已经开始深入人心, 但是它更多的是以概念理论和设计蓝图的方式存在, 具体的定义和体系架构在国内外的通信领域中还没有统一的意见, 同时现有的软件无线电技术还存在诸多的限制和使用上的局限性^[20]。

首先, 当前技术条件下, 软件无线电实现被硬件发展程度制约: ①缺少带宽高、效率高的天线以及射频前端, 理论上能包含全频段的天线目前仅支持 20%左右的带宽; ②缺乏输出性能高、覆盖广的 A/D 转换器, 目前的技术水平很难生产满足功率和频率要求的转换器; ③缺乏低功耗、性价比高的数字信号处理芯片, 数字处理器的处理能力也一直是软件无线电最大的发展制约。虽然在研究中, 发现对通信系统的结构和性能进行折中后, 仍可以实现特定的软件无线电应用, 但从长远来看, 器件的性能将直接决定软件无线电发展的前景。

其次, 因为世界各国在软件无线电的研究领域仍处于初级阶段, 研究机构之间相互独立, 缺少交流, 不同的研究者从各自的出发点和侧重面中, 研究得出的结果也不尽相同, 缺少统一的标准规范, 导致软件无线电体系结构和理论基础未能真正定型^[13]。

因此,研究者只能从过去的模型和理论中汲取经验,使得目前的软件无线电研究很大程度上受传统通信系统的影响,未能从根本上突破传统通信系统的局限性,显示软件无线电技术的优势。

1.2 软件无线电平台介绍

1.2.1 GNU Radio

基于通用处理器的软件无线电平台采用商用服务器或普通 PC 作为信号处理软件的平台,具有更多的灵活性,可采用通用的高级语言(如 C/C++)进行软件开发。但是,由于 PC 的硬件和软件都不是专门为无线信号处理而设计的,现有基于通用处理器架构的软件无线电平台只可以实现有限的性能,不能实现高速无线通信协议,这将制约开发人员使用基于通用处理器的软件无线电平台实现更加先进的无线通信协议。目前,广泛使用的基于通用处理器的软件无线电平台由麻省理工学院(MIT)设计,由 USRP(Universal Software Radio Peripheral)硬件前端^[21]和对应的软件开发套件 GNU Radio^[22]组成,下面简单介绍其功能和性能。同时在本书的第 3 章会对 GNU Radio 平台进行详细的介绍。

GNU Radio 是由 MIT 提供的免费软件开发套件,提供了信号实时处理的软件和低成本软件无线电硬件,用它可以在低成本的射频硬件和通用处理器上实现软件无线电。这套套件广泛用于业余爱好者、学术机构及商业机构研究和构建无线通信系统。GNU Radio 主要是用 Python 编程语言来编写的,但是其核心信号处理模块是 C++在带浮点运算的处理器上构建的。因此,开发者能够简单快速地构建一个无线通信原型系统。但是,受限于其信号处理的软件实现方式,它只能达到有限的信号处理速度,并不能满足高速无线通信协议中的大计算量需求。

USRP 是与 GNU Radio 配套的硬件前端,USRP 是 Matt Ettus 的杰作,它可以把 PC 连接到射频前端(RF Frontend)。本质上它充当了一个无线电通信系统的数字基带或中频部分。USRP 产品系列包括多种不同的模型,使用类似的架构。母板是由以下子系统组成的:时钟产生器和同步器、FPGA、ADC、DAC、主机接口和电源调节。这些是基带信号处理所必需的组件。一个模块化的前端,称为子板,用于对模拟信号的操作,如上/下变频、滤波等。这种模块化设计允许 USRP 为 0~6GHz 运行的应用程序提供服务。USRP 在 FPGA 上进行一些数字信号处理操作,将模拟信号转换为数字域的低速率、数字复信号。在大多数应用中,这些复采样信号被传输到主机内,由主机处理器执行相应的数字信号处理操作。FPGA 的代码是开源的,用户可以自行修改,在 FPGA 上执行高速、低延迟的操作。

USRP1 提供了入门级的射频处理能力,为用户和应用程序提供低成本的软件无线电开发能力。该架构包括 Altera 公司的 Cyclone FPGA,ADC 采样率为 64MS/s,精度

为 12bit, DAC 转换率为 128MS/s, 精度为 14bit, 通过 USB 2.0 与主机相连。USRP1 平台可以支持两个完整的射频子板, 工作在 0~6GHz。USRP2 是继 USRP 之后开发的, 于 2008 年 9 月面世, 之后被 USRPN 200 和 N210 取代。USRPN 210 提供更高带宽、高动态范围处理能力。USRPN 210 适用于对处理速度要求严格的通信应用。产品架构包括一个 Xilinx 的 Spartan3A-DSP3400 FPGA、100MS/s 的双通道 ADC、400MS/s 的双通道 DAC 和千兆以太网接口 (用于将数字信号在主板和主机之间传递)。USRP 采用模块化设计, 母板可以与不同的射频板连接, 各射频板可工作在不同的频段, 提供不同的带宽, 例如, XCVR2450 射频板可以工作在 2.4~2.5GHz, 带宽为 33MHz; WBX 射频板工作在 50MHz~2.2GHz, 带宽为 40MHz。

1.2.2 SORA

1. SORA 介绍

SORA 是微软亚洲研究院研发的具有独创性的软件无线电平台, 它由高性能的通用硬件 SDR 平台和商用 PC 组成, 利用多核商用 CPU 实现软件高速信道编解码的软件算法。SORA 既拥有基于硬件软件无线电平台的高性能特性, 又拥有基于通用处理器的软件无线电平台的易编程性与灵活性的特点。SORA 同时利用硬件与软件技术在 PC 平台上实现高速软件无线电系统。SORA 的硬件由射频前端板、射频转接板、射频控制板组成。射频前端利用 ADC 与 DAC 实现数字与模拟信号的转换, 并负责信号的发送与接收, 通常每个射频前端工作在某一个特定的频段。射频前端与射频控制板之间通过射频转接板连接, 射频转接板与射频前端通过快速射频链路连接, 负责将数字信号在射频前端与射频控制板之间传递, 射频转接板提供了对射频前端操作的统一接口, 不同类型的射频前端只要实现规定的标准接口就可以与 SORA 连接。射频控制板与主机通过高速数据接口 PCI-e 连接, 通过直接内存操作 (Direct Memory Access, DMA) 将数字信号从主机内存传输到射频控制板, 或将从射频前端来的数字信号传递到主机内存。

SORA 的软件中大量使用了现代处理器的并行处理技术来加速无线信号处理速度, 使之可以满足无线通信协议中对处理速度和延迟的要求, 具体包括: 使用独占 CPU 内核技术以保证数字信号处理的实时性、使用查找表 (Lookup Table, LUT) 以减少数字信号处理过程中的计算量、利用 SIMD (Single Instruction Multiple Data) 指令集^[23]进行数据并行计算等。在 SORA 平台上, 已经实现了 IEEE 802.11a/b/g/n 物理层全部速率算法和 MAC 层协议, 可以与商业 802.11 网卡无缝连接, 相互通信。同时还实现了 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project)、LTE^[24]上行链路物理层算法, 实时通信速率达到 43.8Mbit/s。目前, SORA 软件无线电平台已经实现商业化^[25], 已经被全球 100 多所机构和科研院所作为科研平台, 得到了业界的广泛认可。特别的是, SORA 的论文在 2011 年被计算机界公认的顶级杂志 *CACM* (*Communications of the ACM*) 评为在过去几年内最具影响力的论文之一^[26,27]。

2. SORA 的硬件架构

SORA 的硬件基于模块化设计, 支持多频段、多射频结构, 包含一个射频控制板 (Radio Control Board, RCB), 通过射频转接板 (Radio Adaptor Board, RAB) 连接不同的前端。RCB 上有 8 个射频前端接口, 可以将 8 个射频前端连接至 RCB, 这 8 个射频前端可以工作在相同频段也可以工作在不同频段, 可以独立使用也可以将其中若干个组成 MIMO 系统使用。射频前端是一个硬件模块, 包含无线电信号转换所必需的电路, 负责接收和发送无线电信号, 如将信号从高频转换至中频或基带, 反之亦然。射频前端与 RCB 之间通过 RAB 相连, 提供了对射频前端操作的统一接口, 通过射频快速链路 (Radio Fast Link, RFL) 协议实现, 不同类型的射频前端通过实现 RFL 可以与 RCB 相连。RAB 定义了数字信号和模拟信号相互转换的接口, 包含了 ADC 和 DAC, 以及用于无线电传输所必要的电路^[19]。

RCB 是 SORA 系统的核心板卡, 它通过 PCI-e 接口与 PC 相连接。RCB 采用 Xilinx 公司 Virtex5 系列 FPGA, 具有高性能、低功耗的特点^[28]。RCB 的另一个重要作用是作为主机与射频前端数字信号传输的桥梁。RCB 中使用不同的缓冲区和队列, 作为射频前端与主机内存之间数据传输的缓冲区, 可以消除数据传输时突发的延迟抖动。同时, 在 RCB 上还有板载内存, 允许软件将预先计算好的波形缓存在 RCB 上, 为软件无线电处理添加额外的灵活性。RCB 实物如图 1-1 所示。

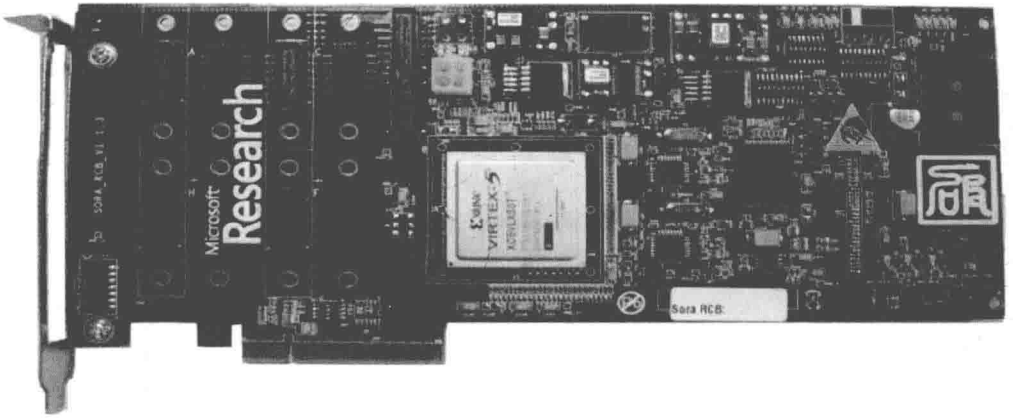


图 1-1 RCB 板实物图

RAB 包括一片 ADI 公司的全集成 AD/DA 芯片, 它主要完成 AD/DA 转换, 把来自 RCB 的经过变换后的数字基带信号转换为模拟信号, 以及把来自 RF 板的模拟信号转换为可经 RCB 处理的数字基带信号; 一片用于实现 SoraFRL 协议和逻辑控制功能的 FPGA; RAB 的时钟分配电路用于产生 AD/DA/射频所需参考时钟。RAB 实物如图 1-2 所示。