

21

世纪 .....  
信息与通信技术教程

# 软件无线电

—无线电工程的现代方法

■ [美] Jeffrey H.Reed 等著

■ 陈 强 等译

PEARSON  
Prentice  
Hall

9

人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪信息与通信技术教程

# 软件无线电

——无线电工程的现代方法

[美] Jeffrey H.Reed 等著

陈 强 等译

人民邮电出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

软件无线电: 无线电工程的现代方法 / (美) 里德 (Reed, J. H.) 等著; 陈强等译.

—北京: 人民邮电出版社, 2004.7

21 世纪信息与通信技术教程

ISBN 7-115-11869-8

I. 软... II. ①里...②陈... III. 无线电通信—软件工程—高等学校—教材 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 045339 号

### 内 容 提 要

本书首次从无线电工程的角度全面系统地介绍了软件无线电的设计方法学, 不仅详细介绍了软件无线电系统中射频、直接数字合成、模数转换器和数模转换器以及各种数字硬件的设计与选择, 而且阐述了软件无线电系统中 Java、无线电虚拟机、对象请求代理和移动环境等高级软件的开发和应用, 还深入分析了多速率信号处理、智能天线和面向对象等关键技术, 最后对目前军事、民用和学术领域中典型的软件无线电系统进行了实例分析和比较。

本书内容详尽且理论与实践相结合, 适合从事现代通信系统 (特别是软件无线电系统) 设计、开发与研究的射频工程师、数字信号处理工程师、软件工程师、系统工程师和各类研究人员阅读, 也可以作为高等院校通信等相关专业的师生学习软件无线电的参考书籍。

21 世纪信息与通信技术教程

### 软件无线电——无线电工程的现代方法

- 
- ◆ 著 [美] Jeffrey H. Reed 等  
译 陈 强 等  
责任编辑 徐享华
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
读者热线: 010-67129258  
北京汉魂图文设计有限公司制作  
北京顺义振华印刷厂印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 26  
字数: 619 千字 2004 年 7 月第 1 版  
印数: 1-4 000 册 2004 年 7 月北京第 1 次印刷  
著作权合同登记 图字: 01-2002-5948 号

ISBN 7-115-11869-8/TN · 2215

定价: 41.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

## 译者的话

传统的无线电系统是纯粹以硬件方式来实现的。现代的无线电系统越来越多地采用可编程数字信号处理器件来实现，这样增强了设备的灵活性，简化了开发研制的过程，降低了系统成本。简单地说，软件无线电就是采用软件来实现无线电通信系统的功能。就像个人计算机一样，同一台无线电通信系统通过加载不同的软件能够完成不同的功能。

软件无线电的概念最早于 1991 年由美国 MITRE 公司的 Mitola 博士提出。软件无线电的最初目的是为了解决美军电台种类繁多、功能单一、维护困难等问题，实现各军兵种之间的互连、互通和互操作。美军于 1992 年开始实施“SPEAKeasy”计划，进行软件无线电的研究，并且取得了巨大的成功。在随后的各种军事通信计划中，例如“Glomo”计划，美军进一步加强了软件无线电的研究。在实践中，美军认识到软件无线电的设计完全不同于传统的无线电工程，于是在 1997 年提出“JTRS”计划，并且提出了软件通信体系结构（SCA）。JTRS 采用全新的设计思想和方法，成为当前软件无线电研究的典型系统。

与此同时，商业无线通信也在飞速发展，在短短 10 多年间移动通信就从第一代技术发展第三代（3G）技术。但是，商业无线通信的发展遇到了许多困难和问题，例如各国之间不同的标准和协议以及不同的频率分配等，阻碍了全球个人通信的实现。软件无线电的提出和发展为解决这些问题提供了有效契机，这是无线通信领域的一次革命性的发展，引起了全世界的关注，成为学术界和工业界的研究热点。各种国际组织和国际会议都将软件无线电列为研究计划，并且于 1997 年成立了 100 多家公司和机构组成的“软件无线电国际论坛（SDR Forum）”。目前，软件无线电国际论坛和对象管理组织（OMG）这两大国际组织正在致力于整合民用和军用软件无线电的开发和应用，制定软件无线电的国际标准。

我国许多大学、公司和研究机构一直在跟踪软件无线电的发展，并且进行了不懈的研究和实践。自然科学基金、“863”计划和国防预研基金等都将软件无线电列入研究计划。我国的第三代移动通信研究组已经将软件无线电作为关键技术来研究，并且在基于 TD-SCDMA 标准的移动通信系统中应用了软件无线电技术。

然而，许多工程师并不熟悉开发软件无线电系统的最新技术。本书填补了这一方面的空白，介绍了软件无线电系统设计的重要概念，并且涉及了工程师应该理解的各种问题和技术，以促进他们在无线电系统和子系统中应用软件无线电技术。本书的内容涉及以下各方面：

- 多速率数字信号处理在软件无线电系统设计中的核心作用；
- 在实现射频前端时，利用数字处理技术来克服射频设计中出现的关键问题；
- 调制波形的直接数字合成；
- 在模数转换和数模转换精度、抽样速率和动态范围之间进行折衷；
- 通过智能天线和其他自适应阵列算法来增强系统性能；
- 在数字信号处理器、现场可编程门阵列和专用集成电路之间进行选择的实际技术；
- 采用面向对象技术构建灵活的和可复用的实时软件的系统方法。

本书从典型的军用和民用软件无线电系统，目前商业可用的产品以及软件无线电协会的研究课题，各种公司、大学和研究机构的研究项目中选择实例，并对它们进行分析和全面总结。

本书原版书的作者是弗吉尼亚工学院移动和便携式无线电研究组（MPRG）的导师，是软件无线电、智能天线、干扰抑制、调制解调器设计和定位技术等方面的著名教授，他领导的MPRG曾经承担并完成了DARPA的“Glomo”计划中软件无线电和智能天线等方面的重要项目。

参加本书翻译的人员有陈强博士（译者序、第1~3章和第7~9章以及附录）、李刚副教授（第2、4、5章）、王成海工程师（第8、9章）、张旭东博士（第7章）和李晋文博士（第6章）等。由于译者的水平有限，书中的翻译错误在所难免，希望读者提出批评并指正。

译者

2004年3月

# 序

软件无线电体现了无线电设计模式的重大变化。软件无线电的大部分功能是由可编程的信号处理器件来实现的，这就使得无线电系统能够通过改变其运行参数来适应新的特征和功能。软件无线电的实现方法减少了传统无线电系统中的射频部分和其他模拟部件，强调应用数字信号处理来增强整个接收机的灵活性。

对于采用这种方法来设计新的无线电系统，技术变化非常快，以至于在培训新的无线电工程师的培训资料方面出现了严重空白。传统的无线电工程专业的教科书强调模拟的器件层设计，很少提及数字信号处理在实现无线收发机的主要功能方面所起到的日益增长的重要作用。尽管个别的参考书涉及一些关键的模拟和数字子系统，但是论述都不够全面，对于这些子系统之间的相互影响，这些参考书也没有提供一个完整的阐述。

作者在为（美国）国防部高级研究计划局（DARPA）研究和开发新型的高性能无线电系统的过程中，强烈地意识到这一空白。当研制无线电原型样机的时候，作者发现，在如何设计基于数字信号处理的无线电系统方面，几乎没有什么易于理解的资料可以提供给学生作为参考。除了作者所遇到的情况以外，在学术界和工业界的许多同事们也遇到同样令人沮丧的情况，这促使作者决定写这本关于现代无线电设计原理的书，目的就是为对关键的无线电子系统之间的相互影响进行必要的阐述。

软件无线电不断地出现在商业和军事的通信基础设施中，由于其自身的许多优点应用得越来越广泛。

## 1. 设计的简易性

传统的无线电设计要求设计者具有多年的设计实践经验，并且极其谨慎，要能够理解各种系统器件是如何结合在一起而发挥作用的。开发具有市场要求的产品所需要的时间是现代工程设计应该考虑的关键事项。软件无线电的实现减少了新产品的的设计周期，这使得工程师不再需要反复地进行有关模拟硬件部分的设计。采用具有期望频率和带宽的通用射频前端，再结合各种信号处理软件，可以设计出许多不同的无线电产品。

## 2. 研制的简易性

没有两个模拟器件具有完全相同的性能，所以在生产过程中需要对无线电系统进行严格的质量控制和检测。然而，给定相同的输入，两个运行相同软件的数字处理器能够产生相同的输出。因此，促进数字硬件的开发可减少无线电系统研制和测试的成本。

## 3. 多模式操作

无线通信的迅猛发展已经导致传输标准的激增。但是，在很多情况下，我们希望一种无线电系统能够运行多个标准。例如，全美国的所有无线通信公司都在配置他们的系统，从而在某些市场采用 GSM 标准，在另一些市场采用 IS-95 码分多址（CDMA）标准。此外，第三代无线通信的发展也在这种背景下引入了很多种标准。通常，多模式操作需要多个完整的硬件集，这不仅增大了无线电系统的规模，而且增加了无线电系统的设计成本。然而，软件无

线电系统只要在内存中加载合适的软件就能够改变其工作模式。

#### 4. 高速信号处理技术的应用

采用高速信号处理技术能够实现新的接收机结构，例如自适应天线、干扰抑制和加密等技术，以前都认为这些技术太复杂了。但是随着数字信号处理器性能的不不断提高，现在这些技术都在商业系统中有各自的应用领域。对于消费者来说，这种影响将导致扩大服务范围，提高服务质量；对于服务提供商来说，这种影响将减少整个通信基础设施的成本。

#### 5. 较少的分立器件

单个的高速数字处理器能够实现许多传统的无线电功能，例如数据的同步、解调、差错检测和加密等，这样就减少了所需要的器件数量，缩小了无线电系统的规模，降低了无线电系统的成本。

#### 6. 新功能增加的灵活性

软件无线电系统可以进行现场调整，解决没有预见到的问题或者对无线电系统进行升级。例如，可以向无线电系统发送升级软件，从而改进整个系统的性能，比如向手机发送新的语音编码器。另一个重要的功能改进是无线电系统和网络操作的自我诊断能力，这意味着在没有人工干预的情况下，能够提高系统的可靠性。

因为软件无线电具有以上这些优点以及数字信号处理器件的处理能力在不断提高，所以作者认为软件无线电将成为无线电设计的标准模式。

研制软件无线电系统所面临的挑战是必须具备广阔的知识面，包括数字信号处理算法、射频电路、软件方法学和数字电路等。本书中给出的设计方法就是为数字信号处理工程师理解无线电设计的关键领域提供帮助。例如，数字信号处理工程师应该知道射频参数的选择以及所产生的局限，从而能够知道如何恰当地选择后续的信号处理方法来弥补这些局限。本书从数字信号处理工程师的角度，回顾了关键的无线电子系统及其相互之间的关联。

第1章介绍了软件无线电的基本概念，讨论了软件无线电的优点，建立了用于研究软件无线电设计过程的几个步骤。

数字信号处理工程师通常不了解射频工程，同样地，射频工程师通常不了解数字信号处理。然而，为了充分论述软件无线电技术，不能完全独立地阐述其中的一些子系统。因此，第2章为数字信号处理工程师提供了射频前端设计的基础知识，描述了可以在数字域进行的一些信号处理过程以解决射频设计方面存在的问题。

第3章的论述主题是多速率数字信号处理。多速率数字信号处理使用不同的抽样频率，这种信号处理方法对于软件无线电的设计特别重要，因为初始的带宽和抽样频率很高，必须在后续的处理过程中降低抽样频率。多速率数字信号处理一般用于将工作频段划分成不同的通信信道。多速率数字信号处理也是现代同步技术的基础。

软件无线电的灵活性很大程度上在于能够在数字域直接实现任意类型的调制方式。在许多情况下，用于生成这些信号的直接数字合成方法不仅仅是模拟技术的数字化实现，而且为设计者在设计信号波形方面提供了更大的自由度。第4章阐述了调制波形的直接数字合成。

模数转换器、数模转换器以及功率放大器都是软件无线电的关键器件。软件无线电对于这些器件的要求非常高。第5章的主要内容是关于对转换过程的理解，以及针对所要设计的系统，如何在其精度、抽样频率和动态范围之间进行折衷。

软件无线电的重要好处是能够将复杂的算法（例如智能天线）整合到无线电系统中来提

高性能。第 6 章回顾了各种自适应阵算法及其硬件实现问题。

第 7 章讨论了用于数字信号处理的微处理器、现场可编程门阵列 (FPGA) 和专用集成电路 (ASIC) 的基础知识, 以及怎样选择这些器件来构建软件无线电系统。

创建软件的系统设计方法是无线电功能可扩展的基本保证。另外, 当在软件无线电系统中运行新创建的应用程序时, 无线电系统本身对于新的应用程序应该是透明的。第 8 章研究了用于构建软件无线电系统的面向对象的编程方法, 包括 Java 和公共对象请求代理体系结构 (CORBA)。

第 9 章分析了某些已经实现的软件无线电系统的实例。软件定义无线电 (SDR) 论坛是由许多公司、大学和研究机构组成的协会。该论坛定义了用于构建软件无线电的指导原则和标准, 本章描述了这种标准化的软件无线电。

如果用作教材, 本书在章节选择方面有很大的灵活性, 以适应实际课程的需要。对于一个学期的课程, 作者建议选择第 1~3 章、4.1~4.8 节、5.1~5.4 节、6.1~6.6 节、7.1~7.3 节以及第 8、9 章。对于一个季度的课程, 作者建议选择第 1、2 章和第 5 章, 6.1~6.6 节, 第 8 章以及 9.1~9.3 节。尽管在选择和搭配章节定制符合教师目标的课程方面有很大的自由度, 作者还是建议应该将第 8 章和第 9 章作为一个整体来选择。在基本电路分析 (一般为初级)、计算机体系结构 (初级或者高级) 和通信 (高级) 等方面具有电子工程背景的学生, 完全具备阅读本书所有章节所需的背景知识。

在编写本书的时候, 包含在正文和引用中的 URL 都是有效的。然而, 由于 WWW 的动态特性, 某些 URL 可能不再有效了。对本书的周期性的更新、提供给相关教师的信息以及本书的勘误表可以在 <http://www.mprg.org/publications/pubs.shtml#Book> 找到。关于软件无线电的其他信息可以在 <http://www.softradios.com> 中获得。



# 目 录

第 1 章 软件无线电概述	1
1.1 对软件无线电的需求	1
1.2 什么是软件无线电	2
1.3 软件无线电的特征和优势	2
1.4 软件无线电的设计原理	4
1.5 习题	6
第 2 章 射频实现问题	8
2.1 射频前端的用途	8
2.2 动态范围：接收机设计的主要挑战	9
2.3 射频接收机前端拓扑结构	10
2.3.1 拓扑结构的特性	10
2.3.2 拓扑结构	11
2.4 使用软件无线电增强射频链路的灵活性	15
2.5 各种组件对整体性能的重要性	17
2.5.1 天线	17
2.5.2 双工器与同向双工器	19
2.5.3 射频滤波器	20
2.5.4 低噪声放大器	20
2.5.5 镜像抑制和中频滤波器	20
2.5.6 射频混频器	20
2.5.7 本地振荡器	21
2.5.8 自动增益控制	21
2.5.9 模数转换器	24
2.6 发射机结构及其有关问题	24
2.7 射频链路的噪声和失真	26
2.7.1 噪声特性	26
2.7.2 失真特性	28
2.8 模数转换器与数模转换器的失真	30
2.9 预矫正	32
2.10 使用微机电系统的灵活性射频系统	36
2.11 小结	38
2.12 习题	38
第 3 章 多速率信号处理	40

3.1	引言	40
3.1.1	成本	40
3.1.2	灵活性	41
3.1.3	本章概述	41
3.2	样本速率转换原理	41
3.2.1	抽取	42
3.2.2	内插	45
3.2.3	两个多速率恒等式	55
3.2.4	非整数速率转换	56
3.2.5	多级抽样频率转换	57
3.2.6	级联积分梳状滤波器	62
3.3	多相滤波器	66
3.3.1	多相抽取	66
3.3.2	多相内插	68
3.4	数字滤波器组	71
3.4.1	实现	71
3.4.2	离散傅里叶变换滤波器组	72
3.4.3	多路转换器	78
3.5	在采用多速率数字滤波器的数字接收机中的定时恢复	81
3.5.1	典型模拟接收机中的定时恢复	81
3.5.2	仅在数字域的定时恢复	82
3.5.3	迟早门同步器	83
3.5.4	采用迟早门原理的定时偏差控制	83
3.6	小结	85
3.7	习题	85
第4章	信号的数字生成	87
4.1	引言	87
4.2	直接数字合成与模拟信号合成的比较	88
4.3	直接数字合成的方法	89
4.3.1	脉冲输出直接数字合成	90
4.3.2	只读存储器查找表方法	91
4.3.3	相位截断失真	92
4.3.4	输出序列分析	96
4.4	杂散信号分析	97
4.5	周期抖动引起的杂散分量	99
4.6	带通信号的生成	100
4.7	直接数字合成系统的性能	101
4.7.1	实验研究结果	102
4.7.2	混合系统的使用	102

4.8	混合的直接数字合成——锁相环系统	102
4.9	直接数字合成的应用	103
4.10	随机序列的生成	104
4.10.1	序列的种类及其特性	104
4.10.2	采用 Wheatley 过程随机化	106
4.11	只读存储器压缩技术	109
4.11.1	采用泰勒级数展开的插值技术	109
4.11.2	采用三角恒等式的插值技术	112
4.12	正弦相位差算法	113
4.13	修正的正弦相位差方法(抛物线逼近)	114
4.14	小结	115
4.15	习题	116
<b>第5章</b>	<b>模数和数模转换</b>	<b>117</b>
5.1	引言	117
5.2	理想数据转换器的参数	118
5.2.1	抽样过程	118
5.2.2	量化	126
5.3	实际数据转换器的参数	133
5.3.1	一般数据转换器的物理模型	134
5.3.2	对实际传递特性的考虑	135
5.3.3	对动态范围的考虑	137
5.3.4	实际的定时问题	142
5.3.5	模拟带宽	147
5.3.6	功耗	147
5.3.7	噪声和干扰对动态范围需求的影响	149
5.4	改进数据转换器性能的技术	152
5.4.1	抖动	153
5.4.2	自动增益控制(AGC)	155
5.5	通用模数转换器和数模转换器的结构	158
5.5.1	并行结构: 闪速模数转换器、串状数模转换器和二元结构	159
5.5.2	分段结构: 折叠和内插模数转换器与分段梯形数模转换器	161
5.5.3	迭代结构: 分区/流水线/半闪速模数转换器, 逐次逼近型模数转换器	165
5.5.4	$\Sigma$ - $\Delta$ 结构: 模数转换器和数模转换器	168
5.6	小结	173
5.7	习题	175
<b>第6章</b>	<b>智能天线</b>	<b>179</b>
6.1	引言	179
6.2	向量信道建模	180
6.2.1	阵列导向向量	181

6.2.2	多径信道模型	184
6.2.3	多用户信道模型	187
6.3	智能天线的优势	188
6.3.1	波束形成	188
6.3.2	空时均衡	188
6.3.3	分集	189
6.4	波束形成系统的结构	189
6.4.1	多固定波束天线阵列	190
6.4.2	全自适应阵	191
6.4.3	开关波束和自适应阵系统的相对优点和折衷	192
6.5	智能天线的算法	192
6.5.1	分集组合技术	193
6.5.2	使用训练序列的自适应算法	197
6.5.3	盲算法	200
6.6	分集和空时自适应信号处理	206
6.6.1	接收机空时自适应处理算法	206
6.6.2	超载阵列处理	212
6.7	发射空时自适应处理算法	213
6.7.1	空时预滤波	213
6.7.2	空时格状编码	213
6.7.3	一种简单的发射分集方式	215
6.8	智能天线的硬件实现	217
6.8.1	数字波束形成接收机的实现	217
6.8.2	数字波束形成发射机的实现	218
6.8.3	组件问题	219
6.9	阵列校准	220
6.9.1	远程发射机法	220
6.9.2	测音法	221
6.10	弗吉尼亚工学院空时自适应无线电系统的实例研究	222
6.10.1	VT-STAR 体系结构概述	222
6.10.2	VT-STAR 的射频设计	223
6.10.3	VT-STAR 的软件问题	226
6.10.4	VT-STAR 设计的关键问题	228
6.11	小结	230
6.12	习题	230
第 7 章	数字硬件的选择	234
7.1	引言	234
7.2	主要的硬件单元	235
7.3	数字信号处理器 (DSP)	236

7.3.1	DSP 核	236
7.3.2	DSP 的体系结构	236
7.3.3	数字表示	240
7.3.4	寻址	242
7.3.5	流水线操作	244
7.3.6	外设和其他组件	245
7.3.7	多处理	246
7.3.8	使用实时操作系统的多处理	247
7.3.9	软件设计流程	248
7.3.10	性能最大化	249
7.3.11	基准和性能评估	255
7.3.12	实例研究: TMS320C54x 系列数字信号处理器	257
7.4	现场可编程门阵列 (FPGA)	257
7.4.1	基于静态随机存储器的现场可编程门阵列单元的作用	258
7.4.2	在现场可编程门阵列上实现数字信号处理器	259
7.4.3	现场可编程门阵列的结构	259
7.4.4	现场可编程门阵列在软件无线电系统中的应用	261
7.4.5	使用 FPGA 的设计原则	263
7.5	对数字信号处理器、现场可编程门阵列和专用集成电路的使用进行折衷	263
7.6	功率管理问题	264
7.6.1	DSP 的功率管理	265
7.6.2	低功率超大规模集成电路的设计	265
7.6.3	体系结构/系统级方法	267
7.7	数字信号处理器、现场可编程门阵列和专用集成电路的混合使用	269
7.8	小结	270
7.9	习题	270
<b>第 8 章</b>	<b>无线电和网络资源的面向对象描述</b>	<b>273</b>
8.1	引言	273
8.2	网络	273
8.2.1	系统层	274
8.2.2	交换	275
8.2.3	服务质量	276
8.2.4	因特网协议 (IP)	276
8.2.5	异步传输模式 (ATM)	280
8.2.6	网络和软件无线电系统	281
8.3	面向对象编程	283
8.3.1	对象	284
8.3.2	Java	287
8.3.3	Java 和软件无线电系统	290

8.3.4	无线电虚拟机	290
8.3.5	面向对象软件和软件无线电系统	291
8.4	对象代理	292
8.4.1	公共对象请求代理体系结构	293
8.4.2	软件无线电系统的实现问题	296
8.4.3	对象代理和软件无线电系统	297
8.5	移动应用环境	298
8.5.1	MExE	300
8.5.2	业务发现	303
8.5.3	移动应用环境和软件无线电系统	304
8.5.4	软件无线电的安全性	304
8.6	联合战术无线电系统	305
8.6.1	硬件类	305
8.6.2	软件通信体系结构的构成	306
8.7	小结	308
8.8	习题	309
第9章	软件无线电设计的实例研究	310
9.1	引言和历史观点	310
9.1.1	软件无线电系统内在的体系结构特征	311
9.1.2	软件无线电系统重要的体系结构特征	312
9.1.3	实际软件无线电系统的体系结构特征	314
9.2	SPEAKeasy	315
9.2.1	SPEAKeasy 第1阶段	316
9.2.2	SPEAKeasy 第2阶段	320
9.2.3	SPEAKeasy 总结	326
9.3	联合战术无线电系统	326
9.3.1	软件通信体系结构的目标	328
9.3.2	软件通信体系结构的属性	328
9.3.3	软件通信体系结构的详述	330
9.3.4	联合战术无线电系统的总结	335
9.3.5	软件定义无线电论坛的体系结构详述	336
9.3.6	小结	341
9.4	无线信息传输系统	341
9.4.1	体系结构的目标	343
9.4.2	体系结构概述	343
9.4.3	软件体系结构	343
9.4.4	硬件体系结构	345
9.4.5	体系结构详述	345
9.4.6	无线信息传输系统总结	348

9.5	SDR-3000 数字收发机子系统 .....	349
9.6	SpectrumWare .....	352
9.6.1	SpectrumWare 系统描述 .....	352
9.6.2	输入/输出 .....	352
9.6.3	编程环境 .....	353
9.6.4	SpectrumWare 总结 .....	354
9.7	CHARIOT .....	355
9.7.1	CHARIOT 层次化无线电体系结构 .....	355
9.7.2	层次化无线电体系结构的实现实例 .....	359
9.7.3	CHARIOT 总结 .....	360
9.8	小结 .....	360
9.9	习题 .....	362
附录 A	射频工程的相关文献: 提供给射频电路设计人员的简要目录 .....	363
A.1	电子学 .....	363
A.2	射频电路设计和 S 参数 .....	363
A.3	滤波器 .....	363
A.4	微波 .....	364
A.5	振荡器 .....	364
A.6	锁相环和频率合成器 .....	364
A.7	接收机和系统 .....	364
A.8	PSpice .....	365
A.9	商业出版物和期刊 .....	365
A.10	可访问的网上综述资料 .....	365
附录 B	坐标旋转数字计算机算法 .....	366
B.1	引言 .....	366
B.2	CORDIC 概述 .....	366
B.3	CORDIC 算法的推导 .....	366
B.3.1	沿半径为 $R$ 的圆平移一个点 .....	367
B.3.2	通过迭代子旋转进行旋转 .....	368
B.3.3	简化迭代旋转的计算 .....	368
B.3.4	确定等式的最终形式 .....	369
B.3.5	定向模式 .....	370
B.4	CORDIC 算法的性能 .....	370
B.5	CORDIC 算法的扩展 .....	371
参考文献	.....	373
缩略语	.....	387
作者简介	.....	396

# 第 1 章 软件无线电概述

## 1.1 对软件无线电的需求

随着新的标准和协议的不断发布，无线通信正在以迅猛的速度向前发展。有线因特网的迅速推广导致了对无线因特网的需求，并且要求无线因特网应具有更多的功能，例如提供全球无缝隙覆盖和用户可控的服务质量等综合业务。人们期待出现禁得起未来考验的无线电系统，要求系统中的软件和硬件在随着新标准和技术的逐渐推广应用而不会被废弃，这使得构建先进的无线因特网所面临的挑战进一步复杂化。综合的全球无缝隙覆盖概念要求无线电系统具有两个明显的特征：第一，跨地理区域的全球漫游或者无缝隙覆盖；第二，实现与不同的系统和标准之间的接口，从而保证在确定的位置提供无缝隙服务。第 1 个特征要求支持能够在不同的蜂窝标准（例如 IS-95 和 GSM）之间进行切换的多模式手机，而第 2 个特征则要求具有与其他业务（例如蓝牙或者 IEEE 802.11 网络）的接口能力。另外，技术创新正在加速，而预测技术的发展及其对商业的影响是特别困难的。因此，为了保持系统的先进性，无线系统制造商和服务提供商应该随着技术的发展而不断作出响应，通过升级系统来集成新技术或者修正所发现的技术错误。许多制造商都曾谈到这样的可怕故事，发放了几十万部有技术错误的手机后而不得不召回并且丢弃。因为反复进行重新设计不仅成本高，浪费时间，而且对最终的用户也很不方便，所以，人们越来越关注禁得起未来考验的无线电系统。

用于语音、视频和数据业务的现有技术使用不同的分组结构、数据类型和信号处理方法。采用单个设备提供各种业务，或者采用一个无线电系统与提供补充业务的设备进行通信，都能够实现综合业务。无线电系统必须使用的支持技术和网络可能随着用户位置的变化而发生变化。为了能够成功地与不同的系统进行通信，无线电系统必须对采用不同空中接口的设备所发送的信号进行传输和解码。另外，为了适应管理网络协议、业务和环境的变化，支持可重构硬件的移动设备还需要无缝隙地支持多种协议，例如 IP（因特网协议）和 MExE（移动运行环境）。采用软件无线电体系结构能够有效地实现这种无线电系统。在软件无线电体系结构中，无线电系统根据与之接口的系统和所要支持的功能进行自我重构。

第二代（2G）移动通信技术包含了一些互不兼容的标准，而第三代（3G）标准的发展目标就是实现 3G 标准之间以及不同代标准之间的兼容性。即使蜂窝标准能够实现全球性一致，3G 系统也需要多模式操作和自动模式选择功能。采用第四代（4G）系统，甚至可能采用 3G 系统，用户获得的应用就可能具有控制服务质量的能力，并且能够以较高费用获得较高的服务质量。通过分组优先调度、数据封装改变、改进的保护编码、更好的信道均衡技术、智能



天线的实现等，无线电系统可提供更高的服务质量。移动用户应该能够选择网络提供商以及所需要的业务。

## 1.2 什么是软件无线电

软件无线电 (software radio) 是 Joe Mitola 于 1991 年提出的术语，指的是可重新编程或者可重构类型的无线电系统<sup>[1]</sup>。换句话说，同样的无线电系统硬件可以在不同的时候完成不同的功能。软件定义无线电 (SDR) 论坛定义了终极软件无线电 (USR)。这种无线电系统能够接收完全可编程的业务和控制信息，并且支持大范围内的频率、空中接口和应用软件。用户能够在几毫秒就从一个空中接口格式切换到另一个空中接口格式，利用全球定位系统 (GPS) 实现定位功能，采用智能卡技术进行储蓄，就可观看本地广播电视节目或接收卫星传输信号。

目前对于软件无线电的确切定义还存在争议，并且对于确定一个无线电系统为软件无线电所必须具有的可重构能力级别，还没有达成一致意见。含有微处理器或者数字信号处理器 (DSP) 的无线电系统未必符合软件无线电的要求。然而，一个采用软件来定义调制、纠错和加密过程的无线电系统显示出对射频硬件部分的某种控制能力，并且能够被重新编程，这显然是软件无线电。一个好的可行的软件无线电定义是，利用软件充分定义并且通过软件的变化能够有效改变其物理层行为的无线电系统。可重构能力级别主要取决于无线电系统设计中许多普通问题之间复杂的相互影响，包括系统工程、天线形状系数，射频电子线路、基带处理、硬件的处理速度和可重构能力以及电源管理等。

软件无线电这个术语通常指的是采用固定不变的硬件平台而通过软件的改变来实现其灵活性的无线电系统。另一方面，软件无线电表示能够利用软件进行编程来重新配置物理硬件的可完全配置的无线电系统。换句话说，通过对硬件进行特定的组合来适应即将出现的应用，同样的无线电系统硬件可以被调整，从而能够在不同的时候来完成不同的功能。尽管如此，软件无线电这个术语有时候也包括了软无线电。

传统无线电体系结构的功能通常主要由硬件来决定，这些硬件几乎不可能通过软件进行配置。硬件包括放大器、滤波器、混频器 (可能有几级) 和振荡器。软件被限制于控制与网络的接口，去除数据包的报头，和纠错码以及根据报头信息确定数据包的路由地址。因为硬件支配了整个设计，对传统的无线电系统设计进行升级实质上意味着完全放弃原有设计而重新开始设计。在对软件无线电进行升级时，绝大部分新内容是软件，其余部分是对硬件组件设计的改进。总而言之，软件无线电代表着从固定的硬件密集型无线电向多频带、多模式的软件密集型无线电的模式转变。

## 1.3 软件无线电的特征和优势

实现理想的软件无线电要求在天线处进行数字化，从而在数字域获得完全的灵活性，或者要求设计十分灵活的射频前端来处理大范围的载频和调制方式。然而，由于技术的局限性