

“863” 通信高技术丛书

“十一五”

国家重点图书出版规划项目

软件无线电 原理与技术

Software Radio
Principle and Technology

□ 栗欣 许希斌 编著

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

“863”通信高技术丛书

“十一五”
国家重点图书出版规划项目

软件无线电 原理与技术

Software Radio
Principle and Technology

□ 粟欣 许希斌 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

软件无线电原理与技术 / 粟欣, 许希斌编著. -- 北京: 人民邮电出版社, 2010. 5
(“863”通信高技术丛书)
ISBN 978-7-115-22197-1

I. ①软… II. ①粟… ②许… III. ①计算机通信—无线电通信 IV. ①TN92-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第007575号

内 容 提 要

本书在系统阐述软件无线电的基本概念、基本原理和体系结构的基础上,着重介绍了软件无线电关键技术,内容涉及软件无线电的射频技术、前端技术、基带技术、软件技术和安全技术等。同时,分析归纳了国内外十余种具有一定代表性的软件无线电产品和试验系统的研究情况,以及软件无线电在无线通信、广播电视、电子对抗和定位导航等诸多领域的广泛应用,展示了软件无线电的巨大技术潜力。此外,通过较为全面、深入地回顾认知无线电的产生、原理、现状和标准化等,揭示了软件无线电与认知无线电的密切关系。

本书内容全面系统、理论联系实际、选材较为典型、叙述深入浅出,可作为理工科大学高年级学生和研究生课程的教学参考书或教材,同时也适合从事与无线通信、广播电视、电子对抗和定位导航等工作相关的工程技术人员及企业管理人员阅读,还可用于电信和IT行业的培训教材。

“863”通信高技术丛书 软件无线电原理与技术

-
- ◆ 编 著 粟 欣 许希斌
责任编辑 杨 凌
 - ◆ 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>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 27.25
字数: 661千字 2010年5月第1版
印数: 1-3500册 2010年5月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-22197-1

定价: 79.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

“863” 通信高技术丛书

编 委 会

主 任：叶培大

委 员：(按姓氏笔画顺序排列)

卫 国 王志威 王 京 王柏义

韦乐平 尤肖虎 冯记春 朱近康

邬江兴 邬贺铨 孙 玉 纪越峰

杜肤生 李少谦 李世鹤 李红滨

李武强 李 星 李默芳 杨千里

杨 壮 张 凌 陈俊亮 季仲华

周炯槃 郑南宁 赵梓森 赵慧玲

侯自强 姚 彦 郭云飞 曹淑敏

蒋林涛 谢麟振 强小哲 简水生

序

人类信息社会发展到今天，无线通信和光纤通信一起成为当今信息网络传输的两大基础平台，在工农业生产、人民生活和国家安全等领域发挥着越来越重要的作用。无线通信作为信息网络个人接入的一种主要手段，正面临着巨大的市场增长和崭新的技术飞跃。在此背景下，我国政府已经将此领域的发展任务列为国家重大专项。

由于技术的发展和市场的驱动，无线通信和其他技术领域一样，也经历了几个不同的发展阶段。比较普遍的一种阶段划分是：从模拟无线电到数字无线电的发展阶段，从数字无线电到软件无线电的发展阶段，以及从软件无线电到认知无线电的发展阶段。

软件无线电是在数字无线电基础上发展起来的，采用了大量数字无线电的数字处理技术及器件。众所周知，无线通信在发展过程中遇到了多种体制、多种标准、多种功能并存的问题，每逢新体制的变更、新标准的制订、新功能的实现，都要求对软硬件进行修改，以便提供新的产品。这给无线通信设备的设计、生产和使用带来了很大的麻烦，于是人们就从个人电脑（PC）的发展经历中获得了启发。早期的电脑是专用的，如用于科学计算的电脑、用于打字电脑、用于传真通信的电脑等，它们互不兼容。后来，人们将电脑的硬件进行标准化的统一设计及制造，将不同的功能通过在电脑上加载不同的软件来实现，就促使了个人电脑的极大普及。软件无线电正是借用了个人电脑的发展思路，将模块化、标准化的硬件单元组建成通用平台，通过在这种平台上加载合适的软件，实现无线通信的各种体制、各种标准和各种功能。这是无线通信领域的一次重大革命，对无线通信产业的发展有着深远的影响。

软件无线电既是一种崭新的理论与技术，也是一种先进的产品设计思路与方法，最近十年来在新一代无线系统中得到了广泛的应用。如军用的软件电台、软件雷达和电子对抗设备，民用的多模手机、通用基站、通用网关、第三代和第四代移动通信系统等，都大量采用了软件无线电技术。在此背景下，为了进一步普及软件无线电的基本知识，提高该领域的研究和应用水平，更好地将软件无线电的方法用于新一代无线产品的设计、制造和应用，将软件无线电原理及技术更系统、更深入地编写成一本书出版是很有必要的。

清华大学是我国最早从事软件无线电研究的单位之一。本书作者在清华大学期间，先后承担了国家“863”计划、国家自然科学基金支持的软件无线电课题，并在技术开发及标准化工作中将软件无线电技术应用于工程实际，具有很好的理论背景和实践经验。本书是作者多年来在无线通信领域潜心研究的成果之一，其内容选取全面，原理叙述清楚，理论联系实际，系统举例丰富，是一本很好的软件无线电著作，可以作为大学高年级学生和研究生相关课程的参考书或教材，也适合从事无线领域工作的工程技术人员及企业管理人员阅读。

姚彦

2010年1月

前 言

从 20 世纪 70 年代开始，随着数字处理技术的发展和微电子技术的进步，传统的无线通信设备逐步实现了从模拟到数字的转换，绝大多数部件由性能可靠、功耗较低、体积较小的数字电路组成，它们将模拟信号数字化，运用数字处理技术，完成信息的无线接收和发送，使得数字无线通信设备的性能远远超过模拟无线通信设备。然而，数字无线通信设备也存在着许多不足，如它的功能实现对硬件有很强的依赖性，特定的无线通信设备只能在特定的无线通信体制中使用，新、老无线通信设备的兼容很困难等。为此，一种能兼容多种体制无线通信设备，尽可能满足未来个人通信需求的无线通信体系结构被提出，称为软件无线电（Software Radio），也称软件定义的无线电（Software Defined Radio）。它主张以软件为主完成各种无线通信功能，促成了无线通信技术继数字化之后的第二次革命。

软件无线电将模块化、标准化和通用化的硬件单元以总线或交换方式连接起来构成通用平台，通过在这种平台上加载模块化、标准化和通用化的软件，实现各种无线通信功能。软件无线电提出了一种崭新的通信思想，摆脱了面向用途的传统无线电设计思路，由模块化的通用硬件平台把系统提供的业务从长期依赖于固定电路的方式中解放出来，利用软件可编程、易修改、成本低和开发周期短的优势，把无线通信技术的水平提升到一个新的高度。一旦无线通信系统的硬件和软件实现了模块化、标准化和通用化，其主要功能由软件来确定和完成，工作参数具有可编程特性（包括可编程的无线频段、信道接入方式、信号调制/解调类型和数据传输速率等），并由软件提供操作、控制、管理和维护等功能，则软件无线电的技术思想就得到了实现，这样的系统即可称之为软件无线电系统。因此，软件无线电是与原来单纯由硬件电路构成的无线通信系统完全不同，也与用软件方式控制的数字无线通信系统不尽相同的一种信息处理和传送的技术体系。

美国和前苏联冷战的结束导致了全球军事通信设备市场的一度萎缩，军事研究资金投入的减少使通信应用研究的重点向民用方向发生转移。而商业无线电应用需求为具备低价格的、快速适应市场的无线电系统开发技术的出现提供了新的动力。事实上，软件和硬件的结合已经在无线通信设备上存在了相当长一段时间，软件无线电技术在军事和民用通信方面的应用前景，使人们对这一技术的研究产生了广泛的兴趣。在军用方面，软件无线电技术可实现各种军用电台的互联互通和军用雷达的软件化与智能化，基于软件无线电技术的设备可接入各种军用移动通信网。在民用方面，多频段/多模式移动电话通用手机、移动电话通用基站、通用无线局域网及通用无线网关等都是软件无线电的应用方向。软件无线电技术有希望成为更便宜、更灵活、用途更广泛的无线通信技术的首选，而应用于商业无线电行业。

软件无线电在移动通信系统中，特别是在 3G 和 B3G 新一代移动通信系统中的应用已成为研究的热点。欧洲的先进通信技术与业务计划中，有 3 项计划是将软件无线电技术应用在 3G 中的，分别是：灵活的综合无线电系统和技术（FIRST）计划，未来的无线宽带多址系统（FRAMES）计划和软件无线电技术（SORT）计划。在我国提出的 TD-SCDMA 无线传输 3G

国际标准中，就明确采用了软件无线电技术。从一定程度上说，TD-SCDMA 标准及系统代表了国际上无线移动通信的发展方向。同时，软件无线电技术在 3G 中的应用早已是国家“863”计划的研究重点，后来又列入了国家“863”计划通信主题的 B3G 研究项目中，成为中国著名的“FuTURE 计划”项目的主要支撑技术之一。当前，软件无线电已经被公认为新一代无线移动通信系统的支撑技术之一，正在无线通信领域得到广泛的研究和开发。

近年来，对软件无线电理论研究的需求随着时间的推移逐步增强，而且各种软件无线电解决方案的提出和论证工作也从未间断过，将理论研究成果付诸实际，从已有软硬件条件出发开展软件无线电系统的研制工作也在紧锣密鼓地进行着。毕竟，研究软件无线电的最终目的是希望能在实际通信环境中拥有真正的软件无线电系统。国外对软件无线电的研究已更多地倾向于较完整的实用或仿真系统的建立，除美国军方的“易通话 (SPEAKeasy)”和麻省理工学院的“频谱件 (SpectrumWare)”系统外，陆续见诸文献的还有美国其他大学、公司以及欧洲和日本的相关系统研究，所做工作都比较全面、深入，更接近实用环境。这一方面是由于发达国家对软件无线电的研究起步较早，另一方面与所在国家的政府、军方、企业和科研单位间的通力合作有很大的关系。当然，他们在项目中对人员和资金的巨大投入也是非常重要的有利因素。

国内在软件无线电的研究方面起步较早的是一些著名的大学、军事院所和科研机构，如清华大学首次完成的国家“863”软件无线电项目就开始于 1996 年年初，后来又于 1999~2001 年完成了国家自然科学基金重点项目“软件无线电理论与技术及其在个人通信中的应用”，以及 2007~2009 年完成了国家“863”项目“软硬件可重构的新一代无线通信统一平台”研究，实现了能够兼容多种常用 2G、3G 和 B3G 移动通信体制的软件无线电试验系统，所具有的“网络结构”更接近理想软件无线电的目标。尽管国内对软件无线电广阔的应用前景充满期待，政府、军方和科研单位都投入了一定的人力、物力加以开发和研究，但限于技术、器件和资金等各方面的不利因素，真正建立起来并通过文献报道的软件无线电实用系统为数不多（不包括未解密的军方直接资助项目）。因此，国内研究提出最多的是实现软件无线电系统的方案，且其中的大多数方案提出的是建立基于“总线结构”的软件无线电系统。虽然这种体系结构实现起来相对较简单，可采用已有的工业总线标准，如 VME、PCI 总线等，而且采取类似于流水方式的体系结构是与无线通信的逻辑一致的，但是却使得系统各个模块之间的耦合相当紧密，修改某一模块时可能牵涉一系列模块的变动，甚至总体结构的改变，离理想软件无线电的目标要求较远。

应该指出，由软件无线电兴起和推动的新的无线通信技术革命是一个渐进的过程，在真正实现理想的软件无线电目标之前，软件无线电的设计思想已经广泛应用于当前的诸多产品中，对相关领域的技术革新和进步都起到了十分巨大的推动作用。目前，软件无线电已从一种无线通信系统的设计思想发展成为一个内容丰富、实用性强的研究和应用方向，其原理和技术建立在现代数学、信息科学、微电子科学、计算机科学、软件工程学和现代通信科学等广泛而坚实的理论与实践基础上，其本身又成为了 3G 和 B3G 等现在与未来无线通信研究与开发必不可少的核心技术之一。据了解，国内高校已有不少开设了软件无线电方面的课程或讲座，一些设备制造商和运营商也在对员工进行软件无线电方面的知识培训，人们一般采用的是查阅到的零散参考文献或市面上为数不多的参考书，在进行相应的教学或培训时，对教材内容的取舍困难，教材的针对性也不强。为了使从事和即将从事无线移动通信及相关行业

工作的人们尽快掌握软件无线电原理和技术内容，推动我国在软件无线电领域研究水平的提高，更好地利用软件无线电原理和技术为我国新一代无线通信设备的设计、制造和应用服务，将软件无线电原理和技术以及进展编撰成书是一件很有意义的事情。

本书在系统阐述软件无线电的基本原理和关键技术的基础上，着重介绍了软件无线电在国内外无线通信中的研究和应用情况，特别是国内企业、高校和科研单位在软件无线电研究和应用方面的进展。其材料来源主要是国内外公开发表的学术论文和专著，也包括未曾公开发表的研究报告等。本书力图将国内外软件无线电技术的研究和应用情况及时地呈现在读者面前，为读者全面、系统地了解软件无线电基本原理和关键技术，以及软件无线电技术研究和应用的进展，提供比较可靠的参考。本书的主要内容涵盖软件无线电的概念、基本原理、体系结构、关键技术、典型系统和相关领域应用等，同时引入了近年来兴起的认知无线电的概念和相关情况综述。与国内外同类书籍比较，本书的特点主要体现在以下几方面。

- 内容全面系统。既包括了软件无线电的基本原理和关键技术等传统的内容，又吸收了国内外软件无线电近年来的研究成果。特别值得一提的是，收入了清华大学 1996 年至今在国家“863”计划和国家自然科学基金项目中进行软件无线电理论和实践探讨的内容。

- 理论联系实际。书中穿插了许多具体的样例来帮助消化和理解软件无线电的理论内容。本书的作者长期在软件无线电项目研究中从事实际工作，一些样例取材于作者撰写的软件无线电研究论文、报告和文档。

- 选材较为典型。在全面、系统、深入的基础上做到材料有代表性，没有得到业界公认、不具有普遍影响和有待时间检验的研究和应用结果一律不予选入。

- 叙述深入浅出。全文在翔实充分的原理叙述基础上，避免烦琐的数学推导，有针对性地区分初学者和进阶者各自感兴趣的内容，力图将读者群尽可能地扩大，使本书起到科普推广和研究指引的双重作用。

- 文字通俗易懂。便于读者课内阅读或自学，使读者在较短时间内就能掌握软件无线电的基本原理与技术思路，为进一步的研究或相关工作打下坚实的基础。

总之，与国内同类书籍相比，本书取材内容更新颖，能够全面反映软件无线电发展的情况。同时，本书从内容取舍到编排体系都便于读者全面、系统地学习软件无线电知识。与国外同类书籍相比，本书对国内的研究情况进行了较为全面的介绍，能够使读者了解中国软件无线电技术的研究和发展情况。

随着我国通信事业的迅猛发展，从事无线与移动通信行业工作的人员迅速增加，需要学习和了解无线通信技术及其最新发展的读者群体在高校、电信和 IT 行业中不断扩大。本书可作为理工科大学高年级学生和研究生课程的教学参考书或教材；同时也适合从事与无线通信、广播电视、电子对抗和定位导航等工作相关的工程技术人员及企业管理人员阅读；也可用于电信和 IT 行业的培训教材，便于从事相关工作的人员了解软件无线电技术的基本内容和思想，协助他们将软件无线电技术应用到所研究和开发的产品中，使他们通过阅读本书认识到软件无线电技术在即将或正在使用的产品中所具有的商业价值，为提升企业的产品竞争力、提高服务质量发挥积极的作用。

本书从选题、立项、撰写到审阅、校对和出版，历经了 5 个春秋。字里行间不仅凝聚了清华大学软件无线电课题组全体师生的心血，而且融入了人民邮电出版社领导的亲切关怀和编辑们的悉心帮助。本书在撰写过程中，得到了国家“863”项目“软硬件可重构的新一代无

线通信统一平台研究”(2007AA01Z289)课题组的大力支持,先后参加资料搜集、文字整理和内容撰写的师生有20余位,他们是:粟欣、许希斌、曾捷、王海军、张汉毅、徐翼、李朝峰、刘莉莉、颜宇、王宽、宋宇宁、马莉、程青燕、夏亮、辛艳、毛炜、张进、李明全、邓博韬、刘惜吾、吴佳、卢鑫和胡莉丽。在此,对直接或间接参与本书撰写和出版工作的各位同仁表示衷心的感谢!

特别感谢清华大学姚彦教授在百忙之中为本书作序,并给予本书作者许多鼓励和支持!

本书的出版得到了人民邮电出版社出版基金的资助,在此亦表示衷心的感谢!

本书在撰写过程中,虽已尽最大努力将所引用的资料名称列入参考文献条目,但由于本书的资料内容不仅来源丰富,而且数量较大,难免出现引用疏漏或错误的情况,故在此向相关作者表示深深的歉意。

由于作者水平有限,本书一定存在许多不足之处,恳请读者予以批评指正。作者联系电话:86-10-62773353,电子邮件:suxin@wireless.mdc.tsinghua.edu.cn。

作 者

2009年秋于北京清华园

目 录

第 1 章 软件无线电概论	1
1.1 软件无线电的产生背景	1
1.1.1 现实需求	1
1.1.2 技术进步	5
1.2 软件无线电的关键技术	13
1.2.1 射频技术	13
1.2.2 前端技术	14
1.2.3 基带技术	14
1.2.4 软件技术	16
1.2.5 安全技术	17
1.3 软件无线电的技术优势	18
1.4 软件无线电的研究情况	20
1.4.1 国外研究情况	20
1.4.2 国内研究情况	22
1.5 本章小结	23
参考文献	24
第 2 章 软件无线电基本原理	29
2.1 天线原理	29
2.1.1 智能天线原理	29
2.1.2 波束形成算法	35
2.1.3 基于软件无线电的智能天线	40
2.2 模数/数模变换	43
2.2.1 模数/数模变换方法	43
2.2.2 转换器的参数	46
2.2.3 通用模数/数模转换结构	49
2.3 多速率信号处理	52
2.3.1 整数倍抽取重采样	53
2.3.2 整数倍内插重采样	55
2.3.3 采样率的有理数倍变换	57
2.3.4 多相结构与多级实现	58
2.3.5 积分梳状滤波器与半带滤波器	61

2.4	自适应信号处理	65
2.4.1	自适应信号处理的概念	65
2.4.2	自适应信号处理的原理	66
2.4.3	自适应信号处理的应用	70
2.4.4	软件无线电中的自适应信号处理	72
2.5	信号的编解码和调制解调	79
2.5.1	软件无线电中信号的编解码	80
2.5.2	软件无线电中的信号调制通用模型及算法	83
2.5.3	软件无线电中的信号解调通用模型及算法	93
2.6	信号的数字频率合成	101
2.6.1	数字频率合成概述	101
2.6.2	直接数字频率合成	102
2.6.3	直接数字频率合成的方法	104
2.6.4	锁相频率合成	105
2.6.5	直接数字频率合成与锁相频率合成的结合	106
2.7	面向对象编程	108
2.7.1	关于对象	109
2.7.2	类与对象实现	110
2.7.3	对象请求代理	113
2.8	软件协议和组网	116
2.8.1	协议分层	116
2.8.2	协议栈重构	119
2.8.3	组网	121
2.9	信息安全策略和算法	124
2.9.1	安全问题	124
2.9.2	安全策略	128
2.9.3	安全业务	129
2.9.4	安全技术	130
2.10	本章小结	134
	参考文献	136
第3章	软件无线电体系结构	139
3.1	软件无线电体系结构的演进	139
3.1.1	体系结构简述	139
3.1.2	体系结构分类	140
3.1.3	体系结构演进	141
3.2	软件无线电的功能结构	142
3.2.1	软件无线电功能	142
3.2.2	射频功能结构	145

3.2.3	中频功能结构	147
3.2.4	基带功能结构	149
3.3	软件无线电的分层结构	152
3.3.1	软件无线电的分层	152
3.3.2	物理层结构	154
3.3.3	中间层结构	156
3.3.4	应用层结构	157
3.4	软件无线电的网络结构	158
3.4.1	基于交换网络的结构	158
3.4.2	基于计算机网络的结构	159
3.4.3	基于自组织网络的结构	161
3.5	本章小结	162
	参考文献	163
第 4 章	软件无线电关键技术	165
4.1	软件无线电的射频技术	165
4.1.1	软件无线电的射频数字化问题	165
4.1.2	软件无线电接收机的射频模块	166
4.1.3	软件无线电发射机的射频模块	168
4.1.4	可编程射频模块部件	169
4.1.5	射频链路的噪声与失真	173
4.2	软件无线电的前端技术	176
4.2.1	软件无线电前端	176
4.2.2	模/数和数/模转换器	177
4.2.3	数字上/下变频	179
4.2.4	数控振荡器	183
4.2.5	数字脉冲成形	187
4.3	软件无线电的基带技术	190
4.3.1	基带处理基本技术	190
4.3.2	基带处理的器件	203
4.3.3	基带重配置技术	214
4.4	软件无线电的软件技术	221
4.4.1	软件工程方法	221
4.4.2	软件结构设计	225
4.4.3	软件组件技术	227
4.4.4	软件总线技术	231
4.4.5	软件下载技术	233
4.4.6	统一建模语言	238
4.4.7	波形描述语言	240

4.4.8 软件开发环境	243
4.5 软件无线电的安全技术	245
4.5.1 软件无线电的安全需求	245
4.5.2 重构的安全技术	246
4.5.3 软件下载的安全技术	247
4.5.4 软件无线电安全技术研究	251
4.6 本章小结	253
参考文献	253
第 5 章 软件无线电系统	257
5.1 “易通话”联合战术电台	257
5.1.1 SPEAKeasy I	258
5.1.2 SPEAKeasy II	262
5.2 “频谱件”测试平台	267
5.2.1 SpectrumWare 简介	267
5.2.2 SpectrumWare 方法	267
5.2.3 SpectrumWare 的发展	269
5.3 PHS 和 WLAN 试验系统	270
5.3.1 软件无线电原型机	270
5.3.2 系统重配置和空中下载功能	272
5.3.3 系统性能	272
5.4 软件无线电 GMSK 非相干接收机	274
5.4.1 GMSK 信号的线性近似表示	274
5.4.2 线性非相干 GMSK 接收机算法结构	275
5.5 软件无线电试验平台	277
5.5.1 平台的组成和结构	278
5.5.2 平台采用的关键技术	282
5.5.3 平台研究的进一步扩展	287
5.6 虚拟无线电系统	289
5.6.1 虚拟无线电概述	289
5.6.2 虚拟无线电架构	290
5.6.3 虚拟无线电的应用	293
5.7 软件化 cdma2000 收发信机	296
5.7.1 cdma2000 系统特点	296
5.7.2 全模拟 cdma2000 收发信机的原理	297
5.7.3 软件无线电 cdma2000 收发信机的设计方案	298
5.7.4 软件无线电 cdma2000 收发信机的硬件设计	300
5.8 WCDMA 和 WLAN 试验系统	301
5.8.1 软件无线电原型机	301

5.8.2	软件配置	304
5.8.3	系统演示	310
5.9	MIMO-OFDM 试验系统	312
5.9.1	MIMO 与 OFDM 简述	312
5.9.2	Fraunhofer 学院的 MIMO-OFDM 试验系统	313
5.9.3	Texas 大学的快速 MIMO-OFDM 系统	315
5.9.4	加州大学洛杉矶分校的开放式多天线试验系统	317
5.10	WiMAX 的软件化系统	319
5.10.1	WiMAX 标准简介	319
5.10.2	WiMAX 物理层技术说明	321
5.10.3	WiMAX 系统的软件化实现	324
5.11	本章小结	327
	参考文献	328
第 6 章	软件无线电应用	331
6.1	软件无线电在移动通信中的应用	331
6.1.1	软件无线电在移动通信中的地位	331
6.1.2	软件无线电在 3G 中的应用	332
6.1.3	软件无线电在 4G 中的应用	332
6.1.4	软件无线电在移动通信领域的产业化	333
6.1.5	软件无线电在移动通信中的应用实例	333
6.2	软件无线电在广播系统中的应用	340
6.2.1	软件无线电在数字电视广播中的应用	340
6.2.2	软件无线电在数字调幅广播中的应用	342
6.3	软件无线电在定位系统中的应用	343
6.3.1	无线定位的原理和分类	343
6.3.2	基于软件无线电技术的无线定位系统	346
6.4	软件无线电在雷达系统中的应用	350
6.4.1	雷达系统的特点	350
6.4.2	雷达系统的分类	350
6.4.3	软件无线电应用于雷达的优势	351
6.4.4	软件无线电在雷达系统中的应用情况	353
6.5	软件无线电在卫星通信中的应用	355
6.5.1	卫星通信的优点	355
6.5.2	软件无线电在卫星通信中的应用	356
6.5.3	基于软件无线电的卫星通信系统	357
6.6	软件无线电在电子对抗中的应用	362
6.6.1	软件无线电与电子对抗	362
6.6.2	软件无线电在电子侦察中的应用	363

6.6.3	软件无线电在电子干扰中的应用	364
6.6.4	软件无线电在电子防御中的应用	366
6.7	软件无线电在其他领域的应用情况	367
6.7.1	软件无线电引信	367
6.7.2	软件化无线电监测	368
6.7.3	高速铁路通信	368
6.7.4	定位导航系统	369
6.8	本章小结	369
	参考文献	370
第 7 章	从软件无线电到认知无线电	373
7.1	认知无线电的发展动因	374
7.1.1	无线通信频谱资源日趋紧张	374
7.1.2	认知无线电的基本思路	375
7.2	认知无线电的基本原理	376
7.2.1	认知无线电的定义	376
7.2.2	认知无线电的平台结构	379
7.3	认知无线电研究现状	381
7.3.1	物理层技术	381
7.3.2	介质访问控制层技术	385
7.3.3	网络层技术	388
7.3.4	相关项目研究	392
7.4	认知无线电的标准化	395
7.4.1	IEEE 的标准化工作	395
7.4.2	ITU 的研究工作	398
7.4.3	SDR Forum 的相关工作	399
7.5	认知无线电的应用	399
7.5.1	在 WRAN 中的应用	399
7.5.2	在 UWB 中的应用	400
7.5.3	在 WLAN 中的应用	401
7.5.4	在 Mesh 网络中的应用	403
7.5.5	在 Ad-hoc 中的应用	403
7.6	本章小结	404
	参考文献	405
	缩略语	410

第 1 章 软件无线电概论

软件无线电 (Software Radio), 也称软件定义的无线电 (Software Defined Radio), 是一种既能够兼容多种制式的无线通信设备, 也能够满足未来个性化通信需求的无线通信体系结构及技术。

20 世纪 90 年代初, 美国 MITRE 公司的首席科学家 J. Mitola 首先提出软件无线电的概念。软件无线电最初指一种宽频段多模式的无线电台, 利用加载在一定硬件上的软件来实现所需的无线通信功能。现在, 软件无线电是指将模块化、标准化和通用化的硬件单元以总线或交换方式连接起来构成通用平台, 通过在这种平台上加载模块化、标准化和通用化的软件实现各种无线通信功能的一种开放体系结构及技术。

软件无线电提出了一种崭新的设计、制造和使用无线通信系统与设备的思想, 它摆脱了面向用途而完全依赖硬件的传统无线电设计思路, 通过一种模块化的通用硬件平台, 把系统提供的业务从长期依赖于固定电路的方式中解放出来, 利用软件可编程、易修改和成本低 (硬件投入少) 的优势, 把无线通信技术水平提升到一个新的高度。

当无线通信系统的硬件和软件实现了模块化、标准化和通用化, 其主要功能由软件来确定和完成, 工作参数具有可编程特性 (包括可编程的无线频段、信道接入方式、信号调制解调类型和数据传输速率等), 并且由软件提供操作、控制、管理和维护功能时, 软件无线电的技术思想就得到了实现, 这样的系统即可称为软件无线电系统。因此, 软件无线电是与原来单纯由硬件电路构成的无线通信系统完全不同, 也与用软件方式控制的数字无线通信系统不尽相同的一种信息处理和传输的体系结构与技术。

1.1 软件无线电的产生背景

软件无线电的产生是 20 世纪无线通信领域的一次划时代的进步, 其规模和影响都非常巨大。人们普遍认为, 通信设备和业务从固定到移动是第一次革命, 从模拟到数字是第二次革命, 从以硬件为主到以软件为主是第三次革命。软件无线电在通信领域的第三次革命中, 扮演了非常重要和独特的角色。虽然促使其产生和发展的原因是多方面的, 但归纳起来主要有两方面, 一是现实需求, 二是技术进步。

1.1.1 现实需求

1. 军事需求

1991 年, 中东地区爆发了著名的海湾战争。作为主导力量的美军在战争中其各军兵种进行联合作战时, 遇到了通信联络难以达到互联、互通、互操作的问题, 严重影响战争效果。当时, 美军采用的无线电台无论是工作频段、通信体制、信息传输格式等, 在陆、海、空三

军间是互不兼容的。在联合作战时，各军兵种间无法进行直接通信和统一行动，导致联合作战的效果大打折扣。美军陆、海、空电台工作频段的这种不同划分，虽然解决了三军间电台的相互干扰问题，但联合作战时互联、互通、互操作问题却难于解决。

此外，从 20 世纪 70 年代开始，随着数字处理技术的发展和微电子技术的成熟，传统的军用无线电台逐步实现了从模拟到数字的转换，其绝大部分组件都由性能可靠、功耗较低和体积较小的数字电路组成，它们将模拟信号数字化，运用数字处理技术，完成信息的无线接收和发送，使得数字无线电台的性能远远超过模拟无线电台。然而，数字无线电台还存在着许多不足，如它的功能实现对于硬件有很强的依赖性，特定的无线电台只能在特定的体制中使用，新老无线电台的兼容很困难等。

因此，为实现各种军用电台的互联互通，要求无线电系统能接入各种军用移动通信网中，真正有效地完成各军兵种联合作战的任务。军事通信对于能达到这一目标的软件无线电技术产生了强烈的需求。

2. 民用需求

民用移动通信经历了以 AMPS 和 TACS 为主的模拟无线通信系统(1G),以 GSM 和 CDMA 为主的数字无线通信系统(2G),直至近年来发展起来的以 WCDMA、cdma2000 和 TD-SCDMA 为主的无线多媒体通信系统 (3G)。经过近 20 年的发展，民用移动通信已经成为通信领域最活跃、市场份额最大的产业。

然而，民用移动通信也开始表现出不少问题。如产品和标准耦合太紧密，各种标准之间难以互操作，特定芯片升级换代困难，各种民用移动通信标准的演进如图 1.1 所示。这些问题已经在 3G 系统商用化过程中逐步显露，终端用户和运营商都希望建立一个全球统一的标准来实现无缝覆盖通信体系。2008 年，国际电联向全世界开始征集 IMT-Advanced 系统标准建议，就是希望在新一代 (B3G) 移动通信领域形成这样一个全球统一的标准。

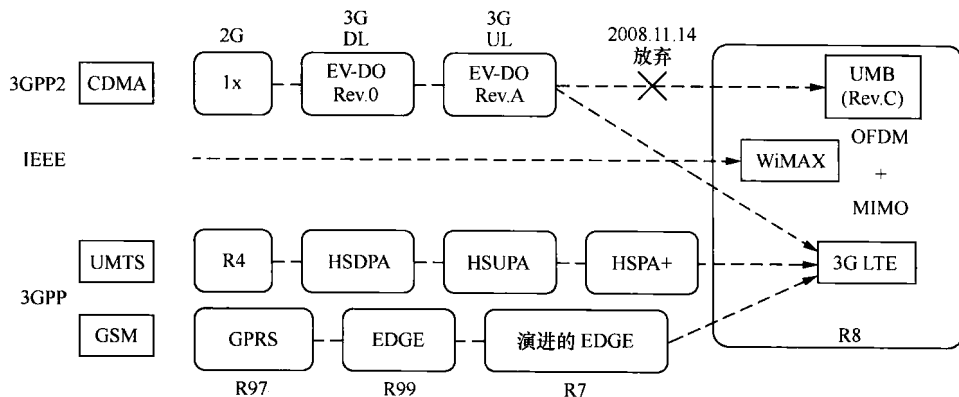


图 1.1 各种民用移动通信标准的演进^[55]

因此，为实现具有多频段、多模式、多功能的兼容体系，可以利用统一平台上的模块即插即用功能。民用移动通信对软件无线电寄予较大的期望，迫切希望得到并采用这一技术领域研究成果，如多频段多模式移动电话通用手机、多频段多模式移动电话通用基站和通用无线局域网及通用网关等，以满足民用移动通信的需求。

3. 技术需求

长期以来，各种无线通信系统在体制上有明显的区别，如在工作频段、调制方式、编码