

# 软件无线电技术导论

Introduction to Software Radio Technology

张健 向敬成 编著



电子科技大学出版社

[Http://www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

# 软件无线电技术导论

Introduction to Software Radio Technology

张 健 向敬成 编著

电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书以近年来国内外软件无线电领域的研究成果为基础,系统地阐述了软件无线电的基本原理。主要内容包括:软件无线电技术概述、中频(射频)数字化原理、基于信号空间映射的多模式调制解调原理、信道估计原理、智能天线原理、软件无线电系统的体系结构和软件无线电技术的应用等。

本书可作为从事软件无线电技术研究人员的引论性参考书,也可供通信、测控、雷达和信号处理等专业的高年级本科生和研究生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

软件无线电技术导论/张健,向敬成编著. —成都:电子科技大学出版社,2001.6

ISBN 7—81065—675—9

I. 软... II. ①张...②向... III. 计算机通信:无线电通信—技术  
IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 033182 号

## 软件无线电技术导论

张 健 向敬成 编著

---

出 版: 电子科技大学出版社(成都建设北路二段四号,  
邮编: 610054)

责任编辑: 吴艳玲

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川导向印务有限公司

开 本: 850 × 1168 1/32 印张 6.1875 字数 155 千字

版 次: 2001 年 6 月第一版

印 次: 2001 年 6 月第一次印刷

书 号: ISBN 7 - 81065 - 675 - 9/TN·32

印 数: 1—2000 册

定 价: 10.00 元

---

# 前 言

1992年5月 Joe Mitola 在美国电信系统会议(IEEE National Telesystem Conference)首次提出了“软件无线电”(Software Radio, SR)的概念, IEEE Comm. Magazine 在1995年第5期正式推出了第一个软件无线电专集,掀起了软件无线电的研究热潮。软件无线电被称为无线电领域的第三次革命,第一次革命是从模拟通信到数字通信,第二次革命是从固定通信到移动通信,第三次革命是从硬件定义的无线电通信到软件定义的无线电通信。

软件无线电系统是一种复杂的数字信号处理系统,它极大地拓展了数字信号处理的研究领域。软件无线电是目前国内外的研究热点,我国许多单位也开展了相应的研究,并已取得了大量的研究成果,但仍有待于系统性地深入研究。围绕“软件无线电”,即全数字化和软化通信信号处理这一主题,来阐述通信信号产生和处理过程,形成系统化的软件无线电理论,是一个尚未很好解决的课题。本书拟作一个初步的尝试,在消化大量国内外文献和总结科研成果的基础上,阐述了软件无线电的基本原理及其应用。本书第一章对软件无线电的基本概念和发展概况进行了概述,第二章讨论中频(射频)数字化原理,第三章讨论基于信号空间映射的多模式调制解调原理,第四章讨论信道估计原理,第五章讨论智能天线原理,第六章讨论软件无线电系统的体系结构,第七章讨论软件无线电在军用通信、移动通信、CDMA 多目标遥测和 PCM/FM 遥测中的几个应用例子。

软件无线电尽管是一个新概念,但其许多思想与方法早已提出,并得到了大量的研究。本书是在消化大量文献的基础上,结合

科研成果,进行了归纳整理,围绕全数字化通信信号处理这一线索对软件无线电的基本原理进行了较为系统的表述。由于作者水平有限和时间仓促,许多内容未能深入展开,只是对软件无线电技术的基本原理进行了架构性描述,远远未能形成完整的理论体系。作者期望本书能起到一个抛砖引玉的作用,对于推动我国的软件无线电技术研究尽一份微薄之力,同时对于初涉软件无线电领域的人来说,本书可作为一本引论性教材。本书的阐述难免会有错误或不尽合理之处,敬请同行专家批评指正。另外软件无线电本身是一个正在发展的领域,新观点、新概念层出不穷,许多问题均有待进一步深入研究。本书直接参考和引用了大量国内外文献,这些文献均尽量在每一章的参考文献中一一列出,在此对被参考和引用文献的作者表示诚挚的谢意。如果没有他们发表的这些成果,本书就不可能完成。

本书在完成过程中得到了电子科技大学电子工程学院 706 教研室、研究生院和出版社的许多领导、老师和同学的帮助,另外中国工程物理研究院电子工程研究所的各位领导和同事也给予了各方面的大力支持。在此,对于他们付出的辛勤劳动和无私帮助致以最真诚的感谢!

本书有关工作得到了国家自然科学基金、中国博士后科学基金和中国工程物理研究院科学基金的资助。

编者

2000 年 12 月

# 目 录

第一章 软件无线电概述	1
1.1 软件无线电的基本概念	1
1.2 软件无线电的研究内容	2
1.3 软件无线电的发展概况	4
参考文献	8
第二章 中频(射频)数字化原理	9
2.1 采样量化序列及其噪声与杂散抑制	9
2.2 多采样率数字信号处理	21
2.3 实值带通信号的正交表示	30
2.4 正交采样	36
2.5 数字下变频(DDC)	41
2.6 免混频正交解调	44
2.7 多信道滤波器组	48
2.8 直接数字波形合成与数字上变频	53
参考文献	56
第三章 基于信号空间映射的多模式调制解调原理	59
3.1 信号空间的概念	59
3.2 已调信号的正交分解与矢量表示	63
3.3 信号调制	69

3.4	信号解调	78
3.5	多模式调制解调器的通用结构	86
	参考文献	88
<b>第四章</b>	<b>信道估计原理</b>	<b>90</b>
4.1	信道估计问题	90
4.2	载波相位估计与载波同步	93
4.3	符号定时估计与符号同步	103
4.4	信道特性估计与干扰抑制	110
	参考文献	123
<b>第五章</b>	<b>智能天线原理</b>	<b>125</b>
5.1	相控阵天线	125
5.2	数字波束形成	130
5.3	DOA 估计	132
5.4	自适应天线和智能天线的概念	138
5.5	智能化接收天线	140
5.6	智能化发射天线	145
	参考文献	148
<b>第六章</b>	<b>软件无线电系统的体系结构</b>	<b>150</b>
6.1	硬件平台结构	150
6.2	软件平台结构	155
6.3	系统软件化程度的评价	160
6.4	虚拟无线电的体系结构	161
	参考文献	164

第七章 软件无线电技术的应用·····	166
7.1 易通话 Speakeasy 系统·····	166
7.2 软件无线电在移动通信中的应用·····	171
7.3 CDMA 多目标遥测及其全数字化解扩解调与多 用户检测·····	174
7.4 PCM/FM 遥测及其全数字化解调·····	179
参考文献·····	187



# 第一章 软件无线电概述

## 1.1 软件无线电的基本概念

1992年5月 Joe Mitola 在美国电信系统会议(IEEE National Telesystem Conference)首次提出了“软件无线电”(Software Radio, SR)的概念, IEEE Comm. Magazine 在1995年第5期正式推出了第一个软件无线电专集,掀起了软件无线电的研究热潮。软件无线电被称为无线电领域的第三次革命,第一次革命是从模拟通信到数字通信,第二次革命是从固定通信到移动通信,第三次革命是从硬件定义的无线电通信到软件定义的无线电通信。

“软件无线电”的基本概念包含三层含义:

第一是“全数字化”,将宽带 A/D 和 D/A 向射频(RF)端靠近,由基带移到中频,甚至射频;不仅在基带数字化,而且要在中频甚至射频数字化;不仅接收机数字化,发射机也要数字化。

第二是把硬件作为无线电通信的基本平台,而尽可能多的通信功能用软件实现,通信体制由软件定义,故软件无线电也称 Software-defined Radio(SDR)。

第三,软件无线电不仅仅是一种实现方法,更代表了一种新型的体制和开放的、可扩展的、模块化的软硬件平台体系结构,实现多频段、多模式、多业务、多个性。

软件无线电系统是一种复杂的数字信号处理系统,软件无线电极大地拓展了数字信号处理的研究领域。过去,通信功能基本上是模拟实现的,软件无线电的出现使调制解调、编码译码、信令规

则与处理、信道选择、天线波束形成等都由数字信号处理来实现，“无线电”不再是一堆各式各样的硬件，而是一个统一的外壳，其核心是各种灵活的算法和软件。软件无线电的最初研究是从美军的 Speakeasy 多频段多模式电台开始，其众多思想很快被应用于民用移动通信，之后软件无线电的概念已远远超出了无线通信，而是适应于整个广义的通信领域。从实现方法来说，无线电经历了三个阶段：第一阶段是模拟无线电，第二阶段是数字无线电，第三阶段是软件无线电。数字无线电是模拟无线电和软件无线电之间的一个承前启后的阶段，作为“全数字化”的可编程数字无线电与软件无线电相比，其信号处理的理论基础是一致的，即“全数字化”通信信号处理理论。只不过软件无线电更强调软件实现，硬件仅仅是提供一个标准化的平台，因而其可编程性、通用性、互换性和移植性更强。“全数字化”的系统不一定能“全软件化”实现，但“全软件化”的系统必须首先“全数字化”。由于这种关系，有的作者将数字无线电与软件无线电统称为软件无线电。

## 1.2 软件无线电的研究内容

从功能模块来看，典型的软件无线电系统的构成如图 1-2-1 所示，软件无线电的主要研究内容包括：

### (1) 数字中频(射频)技术

研究宽带中频(射频)信号的采样量化和波形合成、多采样率数字信号处理、数字化信道选择、基带调制信号与带通调制信号通过正交调制(解调)的数字上(下)变频技术。

### (2) 基于信号空间映射的多模式调制解调

软件无线电的一个重要特征是在基带进行调制和解调，须从信号空间角度建立多模式调制解调理论，通过正交基函数集合来表征调制信号，从而实现基函数波形合成调制器和基函数相关解

调器,在此基础上研究数字信号的检测和模拟波形的估计。

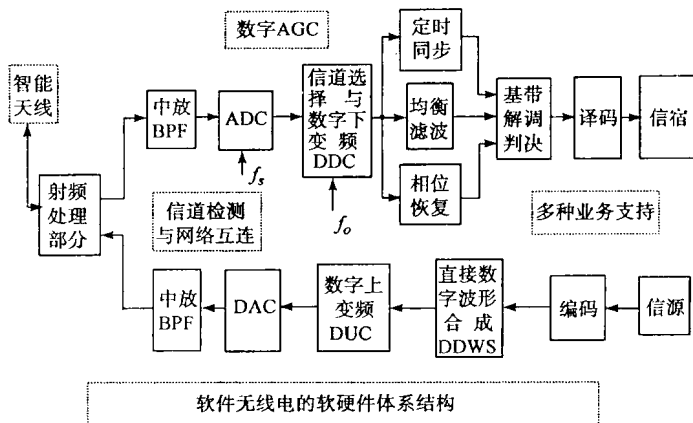


图 1-2-1 软件无线电的构成示意图

### (3) 全数字化和软化信道估计与监测

信道估计主要完成信道延迟、载波频率与相位、幅度衰减等参数的估计和各种干扰的波形估计与干扰抑制,它们是信号解调的基础。在模拟无线电和数字无线电中往往采用反馈环方法进行参数估计,在真正的软件无线电中将基于软化时钟概念采用直接计算方法进行信道估计和信号解调,这也是软件无线电的一个重要特点。由于软件无线电是一种多频段多模式并与多种网络接口的系统,对信道环境的分析和监测十分重要,包括实时频谱监控、动态频率分配、确定接收信号的方位和能量分布等。

### (4) 自适应波束形成与智能天线

智能天线是在相控阵和数字波束形成技术基础上发展而来的,包括空间特征矢量获取(尤其是估计到达方向 DOA, Direction of Arrival)、天线波束的数字形成等,从而实现自适应多用户跟踪、干扰抑制、智能化发射等。智能天线由天线阵列和数字信号处

理网络构成,所有的参数估计、波束形成、目标跟踪均由数字信号处理器实现。

#### (5) 软件无线电系统的体系结构

如果说上面几部分是软件无线电的数字化理论基础,那么软件无线电的体系结构是关于软件无线电系统实现的核心理论与技术。软件无线电的根本目标是要将多频段、多模式、多个性、多业务融入一个开放的、扩展的、可拆卸和重用的模块化平台中,包括硬件平台和软件平台,也因而需要用理论和数学模型来定义和描述这种平台。

#### (6) 软件无线电的应用技术研究

软件无线电的应用主要集中在三大方面:军用通信系统、第三代移动通信系统、雷达与无线电测控通信系统。

### 1.3 软件无线电的发展概况

在软件无线电的研究中,美国走在世界各国的前列。美国军方首先推出了第一个军用软件无线电电台 Speakeasy,并组建了 MMITS 组织和 SpectrumWare 项目进行软件无线电的基础性研究。欧洲对软件无线电的研究主要集中在第三代移动通信系统中的应用研究。软件无线电发展过程中有代表性的重要事件为:

- 1992年5月,在美国电信系统会议上,MITRE公司的 Joe Mitola 首次提出了软件无线电(SR)概念。
- 1994年,美国三军通用电台 Speakeasy(Phase I)开发完毕。
- 1995年5月,IEEE Comm Magazine 推出首期软件无线电专集。
- 1995年,欧洲 ETSI 举荐在通用移动通信系统(UMTS)中采用软件无线电。

- 1996年,美国组建SR标准化组织MMITS Forum(最近重新定义为SDR论坛),并于1997年5月召开了第一次SR专题研讨会。
- 1998年4月,第一届亚洲专题研讨会在日本Keio大学举行;1998年5月,欧洲举办了第一届国际SR专题研讨会。
- 1999年2月,IEEE Comm Magazine推出第二个SR专集;1999年4月IEEE JASC推出第三个SR专集。
- 1999年,美国完成Speakeasy(Phase II)的开发。
- 2001年,预计基于软件无线电的第三代移动通信系统IMT2000将初步形成。

软件无线电的理论基础是“全数字化”通信信号处理理论,其核心是各种灵活的算法。国外在这方面的研究较早,已取得较大进展,目前主要进行高性能专用芯片和高速算法的研究。软件无线电研究的另一个重点内容是其实现理论与技术,即软硬件体系结构和构成方式,这是国外最近两年的研究热点。它提出了诸如分层分布虚拟机结构、拓扑数学模型、软件Plug&Play、CORBA总线应用等思想。在国内,清华大学提出了一种基于交换的硬件平台结构。软件无线电系统的设计途径是首先采用Cadence SPW或Synopsis COSSAP等通信系统仿真软件进行EDA设计,然后用FPGA/ASIC或DSP来实现,在算法级仿真时,Matlab是一种广泛应用的工具。软件无线电应用的主要限制是器件水平的制约,尤其是DSP的处理速度。现在软件无线电的应用处于数字无线电与软件无线电交叉结合的阶段,“全软件化”只能应用于低速率系统、延迟时间较长的准实时或事后处理的高速率系统,但“全数字化”已能够在许多场合实现。

下面列出美国、欧洲对软件无线电的主要研究机构<sup>[1,7]</sup>。

美国对软件无线电的主要研究机构有:

(1)MMITS([www.mmitsforum.org](http://www.mmitsforum.org))

该论坛成立于 1996 年 3 月,主要成员来自与美国军方有关的厂家、供应商,是一个非营利性组织,主要任务是开发用先进的技术来构筑无线系统所必需的开放结构,并使其推广应用。它由技术委员会、市场委员会和标准化咨询委员会组成。

(2) SpectrumWare 项目 ([www.sds.lcs.mit.edu/spectrumware](http://www.sds.lcs.mit.edu/spectrumware))

美国麻省理工学院计算机科学实验室的 SpectrumWare 项目从通用计算机体系结构实现软件无线电的角度出发,引入更多的软件成分,提出并试图实现“虚拟无线电”。通用机与 DSP 系统的主要区别在于它不是一个实时同步系统,不像 DSP 适合于对一序列的有严格定时的采样信号作实时处理,只能通过中断来保持一定的同步;然而在可编程性、体系结构的开放性和灵活性、并行处理以及人机界面等方面通用机大大超过了 DSP 系统。

(3) Speakeasy 项目 ([www.vl.af.mil:8000/Technology/Demos/Speakeasy](http://www.vl.af.mil:8000/Technology/Demos/Speakeasy))

这是美国开发的军用多频段多模式无线电台 (MultiBand MultiMode Radio, MBMMR),不仅可以适应各种调制方式,还具有“Voice Bridge”功能,使不同的无线电台之间相互通信。开发过程分为两个阶段:第一阶段到 1994 年,完成了试制样机;到 1999 年为第二阶段,完成了小型化、高性能、多功能的产品。

(4) PMCS ([www.dtic.mil/c3i/pmcs/pmcspage.htm](http://www.dtic.mil/c3i/pmcs/pmcspage.htm))

PMCS (Programmable Modular Communication Systems) 是美国在防卫无线台中引入可编程通信系统的项目。

欧洲对软件无线电的主要研究机构有:

(1) UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems)  
(<http://www.umts-forum.org>)

欧洲的第三代移动通信系统 IMT2000 的标准化论坛。

(2) ACTS (Advanced Communications Technologies &

Services)

[www.de.infowin.org/ACTS](http://www.de.infowin.org/ACTS))

它是为 UMTS 进行开发研究的计划,由 157 个规划团体组成。

(3) FIRST(Flexible Integrated Radio Systems Technology)

[www.era.co.uk/first/first.htm](http://www.era.co.uk/first/first.htm))

该计划将软件无线电技术应用到设计 IMT2000 的多频/多模可编程手机,能自动检测接收信号以接入不同网络,是 ACTS 程序的第 5 号规划(AC005)。

(4) FRAMES (Future Radio Wideband Multiple Access Systems)

[www.de.infowin.org/ACTS/RUS/PROJECTS/FRAMES](http://www.de.infowin.org/ACTS/RUS/PROJECTS/FRAMES))

它是 ACTS 程序的第 90 号规划(AC090),研讨无线接口标准化,为 UMTS 提供高速大容量的信息传输技术。

(5) RAINBOW (Radio Access Independent Broadband On Wireless)

[www.cselt.stet.it/sonah/RAINbow/index.html](http://www.cselt.stet.it/sonah/RAINbow/index.html))

它是 ACTS 程序的第 15 号规划(AC015),研讨面向 UMTS 的无线多址系统的协议和体制规划。

(6) SORT(Software Radio Technology)

[www.ifn.et.tudresden.de/sort](http://www.ifn.et.tudresden.de/sort))

该计划研究灵活的有效的软件无线电台,具有无线自适应接入功能,并符合 UMTS 的标准。

除了军用电台和移动通信外,软件无线电在雷达探测、无线电测控系统(Tracking Telemetry & Command, TT&C)中的应用也是一个重要研究领域,以期构成多频段多模式协同工作的地面站。

总的来说,软件无线电是目前国内外的研究热点,我国在这几

个方面也开展了研究,并已取得了大量的研究成果,但仍有待于系统地深入研究。围绕“软件无线电”(即全数字化和软化通信信号处理)这一主题,来阐述通信信号产生和处理过程,即系统阐述软件无线电的基本原理,是一个尚未很好解决的课题。本书拟作初步的尝试,在消化大量国内外文献和总结科研成果的基础上,形成了软件无线电技术导论。

### 参 考 文 献

[1.1] J. Mitola, Software Radios: Survey, Critical Evaluation and Future Directions, Proceedings of National Telesystem Conference, NY: IEEE Press, 1992. 5

[1.2] J. Mitola, The Software Radio Architecture, IEEE Communications Magazine, May 1995:26~38

[1.3] Joseph Mitola III, Technical Challenge in the Globalization of Software Radio, IEEE Communications Magazine, Feb 1999:84~89

[1.4] Walter H. W. Tuttlebee, Software Radio Technology: A European Perspective, IEEE Communications Magazine, Feb 1999:118~123

[1.5] Joseph Mitola III, Software Radio Architecture: A Mathematical Perspective, IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol. 17, No. 4, April 1999:514~538

[1.6] 军事通信技术(软件无线电专题),1997. 6

[1.7] 新编软件无线电专集,信息产业部电子七所,1999. 10

[1.8] 吴启辉等. 第三代移动通信系统中的软件无线电技术. 移动通信,2000. 2:35~39

[1.9] 鲁艳玲等. 软件无线电结构模型与关键实现技术. 数字通信,2000. 1:33~34

[1.10] 肖维民,许希斌. 软件无线电(上、下). 微波与卫星通信,1997年第1、2期

[1.11] 软件无线电技术,《电讯技术》2000年特刊3,2000年8月



## 第二章 中频(射频)数字化原理

### 2.1 采样量化序列及其噪声与杂散抑制

对连续时间模拟信号进行采样、量化,变为数字序列进行处理,是软件无线电的前提。

#### 2.1.1 采样

采样是把连续时间模拟信号转换成离散时间模拟信号,采样分为3种<sup>[2,3]</sup>:

##### (1)理想采样与采样定理

设连续时间模拟信号为  $x(t)$ ,其频谱为  $X(\omega)$ 。理想采样序列为周期性冲激脉冲序列  $c(t)$ ,其周期为  $T_s$ ,频率为  $f_s=1/T_s$ ,频谱为  $C(\omega)$ ,则  $c(t)$ 和  $C(\omega)$ 可表示为

$$c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (2-1-1)$$

和

$$C(\omega) = \frac{2\pi}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s) \quad (2-1-2)$$

采样过程为  $x(t)$ 与  $c(t)$ 相乘的过程,即采样后得到离散时间序列  $x_s(nT_s)$ 为

$$x_s(nT_s) = x(t)c(t) \quad (2-1-3)$$

由频域卷积定理可得  $x_s(nT_s)$ 的频谱  $X_s(\omega)$ 为

$$X_s(\omega) = \frac{1}{2\pi} [X(\omega) * C(\omega)]$$