



普通高等教育“十二五”规划教材

国家级特色专业 · 通信工程 · 核心课程规划教材

# 软件无线电原理与应用

*Software-Defined Radio: principles and Practice*

(第2版)

楼才义 徐建良 杨小牛 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介

普通高等教育“十二五”规划教材

# 软件无线电原理与应用

(第2版)

楼才义 徐建良 杨小牛 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

软件无线电的基本思想是以开放性、可扩展、可重构的硬件为通用平台,把尽可能多的功能用可升级、可替换的软件来实现。现在,软件无线电已成为无线电工程的现代方法,不仅在无线通信领域获得了广泛应用,在其他无线电工程领域也已显示出广阔的应用前景。本书全面系统地介绍了软件无线电的基本概念、基本理论、实现技术、软件算法及其在无线电工程领域中的典型应用。全书深入浅出、通俗易懂,理论与实际相结合,实用性强。

本书不仅可以作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的教材或学习参考书,也可作为通信、电子战、雷达、航空航天电子、消费电子等领域的工程技术人员的技术参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

软件无线电原理与应用 / 楼才义, 徐建良, 杨小牛编著. — 2版. — 北京: 电子工业出版社, 2014.8  
ISBN 978-7-121-23678-5

I. ①软… II. ①楼… ②徐… ③杨… III. ①无线电技术—高等学校—教材 IV. ①TN014

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第141634号

责任编辑: 竺南直

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.5 字数: 686千字

版 次: 2001年1月第1版

2014年8月第2版

印 次: 2014年8月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010)88258888。

## 第 2 版前言

经过 20 多年的发展,软件无线电 (Software Radio) 技术已深入人心,并得到了广泛应用。软件无线电已经成为无线电工程的一种通用的现代方法,是无线电工程领域的一种新的设计理念、设计思想。“软件定义”(Software Defined)更是由电子信息领域的专业技术人员大大扩展了其内涵和外延,软件定义雷达 (SDR),软件定义卫星 (SDS),软件定义网络 (SDN) 等新思想、新概念不断涌现,甚至有人大胆提出了“软件定义世界”(Software Defined World, SDW )”的概念,有理由相信,随着技术的不断进步,“软件定义世界”指日可待。

《软件无线电原理与应用》一书于 2001 年出版以来,受到广大读者的厚爱,据 2013 年引用检索,引用次数达 3000 次以上。本书中包含了杨小牛院士的许多原创性思想和理论,为推动软件无线电技术在国内各领域的应用和发展做出了重要贡献。受电子工业出版社竺南直老师的盛情相邀,根据软件无线电技术发展,结合作者编著的《软件无线电技术与应用》(北京理工大学出版社)的部分内容,作者对《软件无线电原理与应用》(第 1 版)进行了修订。与《软件无线电原理与应用》(第 1 版)相比,第 2 版有以下主要变化:

(1) 对第 1 版第 4 章做了较大调整,删除了对于器件及其应用方面的描述,增加了软件无线电可重构主要单元——FPGA 的介绍内容;

(2) 第 5 章中补充了均衡算法方面的内容;

(3) 考虑到智能天线方面的专著很多,为压缩本书篇幅,删除第 1 版中的“第 6 章 基于软件无线电的智能天线”;

(4) 为软件无线技术讨论的完整性,新增“信道编译码技术”相关内容,列为第 6 章;

(5) 新增第 7 章“软件体系结构”(SCA),对软件无线电的软件架构进行讨论;

(6) 对第 1 版中“第 7 章 软件无线电在电子系统中的应用”的部分内容进行了调整;

(7) 结合无线通信的最新发展,增加了“软件无线电的新发展——认知无线电”的介绍,列为第 9 章;

(8) 为了方便教学,在每章后面增加了一些习题与思考题。

第 2 版的编写工作由楼才义为主完成,杨小牛、徐建良、张永光共同参与编写工作。郑仕链、陈仕川、贾璐、张大海、李新付、李世杰、王挺、章军等同志为本书的完成提供了很多帮助,在此对他们所付出的辛勤工作一并表示衷心的感谢。还要特别感谢电子工业出版社竺南直博士,竺博士在本书第 1 版、第 2 版的出版过程中给予了大力支持和帮助。

由于编著者水平有限,技术更新飞速,尽管做了较大的努力,书中肯定还存在许多问题或错误,敬请各位读者批评指正。

编著者于嘉兴

2014 年 4 月 22 日



## 第 1 版前言

以现代通信理论为基础，以数字信号处理为核心，以微电子技术为支撑的软件无线电 (Software Radio) 或者称软件可定义的无线电 (Soft-Defined Radio) 自从 1992 年由 JeoMitola 提出以来，在最近几年取得了引人注目的进展，引起了包括军事通信、个人移动通信、微电子以及计算机等电子领域的巨大关注和广泛兴趣。人们普遍认为软件无线电将使无线通信，甚至整个无线电领域产生重大变革，并由此推动电子信息技术的快速发展，最终在全世界范围内形成巨大的软件无线电产业市场，产生巨大的经济效益，推动社会和技术进步。

软件无线电突破了传统的无线电台以功能单一、可扩展性差的硬件为核心的设计局限性，强调以开放性的最简硬件为通用平台，尽可能地用可升级、可重配置的应用软件来实现各种无线电功能的设计新思路。用户在同一硬件平台上可以通过配置不同的应用软件来满足不同时期、不同使用环境的不同的功能需求；投资商则可以在通用的可扩展的硬件平台上，通过开发新的应用软件来满足用户或市场的新要求，适应不断发展的技术进步。这样，不仅可以节省大量硬件投资，而且可以大大缩短新产品的开发研制周期，实时地适应市场变化，从中获取巨大的经济效益。由此可见，软件无线电这种体系结构是一种“双赢”的体系结构，无论是用户还是投资开发商都将从中获得好处，赢得利益。软件无线电这一新概念之所以一经提出就受到全世界的广泛关注，其重要原因之一就是人们一开始就注意到了它的潜在的商业价值。人们已经意识到软件无线电很可能会像目前的 PC 一样形成不可预测的巨大的赢利市场。有人把软件无线电称之为“超级无线计算机”也并不过分，因为无论从软件无线电的体系结构，还是从它的潜在市场来看，都与 PC 有着很多相似之处。所以，开展软件无线电的研究不仅具有重要的科研价值，也具有重大的经济价值，如果意识不到这一点，就有可能在已初露端倪的巨大的软件无线电市场上失去机遇。

软件无线电经过不到 10 年的研究，尽管已取得了很多成果，但对于建立一套完整的理论和技术体系来说，还是远远不够的，况且软件无线电涉及的领域多、面广、发展快，如现代通信理论（含调制解调、信源 / 信道编码、均衡、加密解密等）、宽带天线理论、数字信号处理、微电子、计算机等，可以说其技术发展日新月异。另外，在以往公开发表的软件无线电文献资料中论述更多的是有关软件无线电的基本概念、体系结构等，很少系统介绍相关理论及其实现技术，有关软件无线电的专著也尚未面世。在这种情况下，无论是全书的选题与组织还是整体构思都面临了极大的困难，这是我们清醒认识到的。但是为了推动软件无线电的研究，我们还是鼓足勇气将其出版，并真诚希望本书在大家的帮助下，不断完善、改进和提高。

本书作为国内第一部软件无线电专著，在内容上力求做到全面和系统，并初步形成理论体系；在风格上力求工程化、实用、可读，除非必要时尽量免去繁琐冗长的数学推导。书中包含了作者多年来的研究成果和个人观点，有的还属首次发表。

本书结构如下：

第1章为概述,介绍软件无线电的基本概念、基本结构以及发展概况。

第2章为软件无线电理论基础,主要介绍研究软件无线电所必需的一些基础理论,包括信号采样理论、多速率信号处理基本理论、软件无线电中的高效数字滤波以及信号正交变换理论等,其中,射频直接带通采样理论是本书论述软件无线电的核心思想。

第3章为软件无线电的数学模型,主要介绍单通道/多通道软件无线电接收机、发射机以及信道化软件无线电接收机、发射机的数学模型。通过本章的讨论,使读者能够形成有关软件无线电比较系统的理论框架,为开展软件无线电的研究与开发奠定坚实的理论基础。

第4章主要介绍与软件无线电硬件平台有关的内容,主要包括射频前端电路、A/D、D/A、数字上/下变频器以及数字信号处理器等的组成结构及其工作原理。最后介绍工作频段为0.5MHz~1GHz的一个实际的软件无线电试验平台。第5章主要介绍与软件无线电中的信号处理算法(软件)有关的内容,主要包括调制解调算法、同步算法以及信号样式识别算法等。第6章主要讨论基于软件无线电的智能天线,讨论了智能天线的基本概念、基于软件无线电的组成结构以及智能天线的波束形成算法等,使读者对智能天线有一个初步了解。

第7章介绍软件无线电的应用,主要内容包括在个人移动通信、军事通信、电子战、雷达系统以及在信息化家电产品中的应用。本章的大部分内容都属作者本人的一些基本观点和设想,内容是粗线条的、轮廓性的,只能起到抛砖引玉的作用,对相关领域有兴趣的读者可在此基础上再做深入的研究。

本书第2、3、6、7章以及5.4节由杨小牛撰写,并由其负责全书的统稿;第1章以及4.1、4.2、4.4节和5.1、5.3节由楼才义撰写;徐建良撰写了4.5节和5.2节,并和楼才义共同撰写了4.3节;陆安南同志为本书编写了波束形成算法软件,并进行了仿真模拟;俞书峰同志为本书初稿做了繁重的录入工作。本书在撰写过程中还得到了作者单位的支持以及其他同志的帮助,同时也得到了电子工业出版社的大力支持,特别是参与本书编辑的同志为此付出了辛勤的劳动,没有他们的支持,本书是无法完成和出版的,在此一并深表感谢。

由于作者理论和技术水平有限,再加上时间紧,书中肯定存在各种各样的问题和错误,诚挚希望相关领域的专家和读者提出批评指正。

著者

2000年8月10日

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 无线移动通信简述	1
1.1.1 模拟无线电	1
1.1.2 窄带数字无线电	3
1.1.3 宽带数字无线电	4
1.1.4 软件无线电	6
1.2 软件无线电的定义与特点	7
1.2.1 软件无线电的定义	7
1.2.2 软件无线电的特点	8
1.3 软件无线电的发展历程	10
1.3.1 软件无线电的提出	11
1.3.2 软件无线电 (SDR) 论坛	12
1.3.3 软件无线电的先行者: SPEAKeasy	12
1.3.4 软件无线电的推动者: JTRS 与 SCA	13
1.3.5 软件无线电发展展望	14
1.4 软件无线电体系框架与本书结构	14
习题与思考题 1	15
第 2 章 软件无线电理论基础	17
2.1 信号采样基本理论	17
2.1.1 Nyquist 采样定理	17
2.1.2 带通信号采样理论	20
2.2 软件无线电中的信号采样	24
2.2.1 允许过渡带混叠时的采样定理	24
2.2.2 软件无线电中的正交低通采样	25
2.2.3 软件无线电中的宽带中频带通采样	26
2.2.4 软件无线电中的射频直接带通采样	28
2.2.5 带通采样对采样频率的精度要求	33
2.3 多率信号处理 (Multirate Signal Processing)	34
2.3.1 采样信号的等效基带谱与抽取基本概念	35
2.3.2 低通信号的整数倍抽取	36

2.3.3	数字带通信号的抽取	38
2.3.4	整数倍内插	44
2.3.5	取样率的分数倍变换	46
2.3.6	取样率变换性质	47
2.3.7	抽取、内插器的多相滤波实现	49
2.3.8	取样率变换的多级实现	51
2.4	软件无线电中的高效数字滤波	53
2.4.1	数字滤波器设计基础	53
2.4.2	适合于 $D=2^M$ 倍抽取或内插的半带滤波器	58
2.4.3	积分梳状 (CIC) 滤波器	61
2.5	软件无线电中的正交信号变换	66
2.5.1	正交变换基本概念	66
2.5.2	窄带信号的正交分解与模拟域实现	68
2.5.3	数字混频正交变换	71
2.5.4	基于多相滤波的数字正交变换	73
2.5.5	基于正交变换的瞬时特征提取: CORDIC 算法	76
2.5.6	多信号正交变换	79
	习题与思考题 2	80
<b>第 3 章</b>	<b>软件无线电体系结构</b>	<b>84</b>
3.1	软件无线电的三种结构形式	84
3.1.1	低通采样软件无线电结构	85
3.1.2	射频直接带通采样软件无线电结构	86
3.1.3	宽带中频带通采样软件无线电结构	87
3.1.4	三种软件无线电结构的等效数字谱	88
3.2	软件无线电接收机体系结构	90
3.2.1	单通道软件无线电接收机	91
3.2.2	多通道软件无线电接收机	94
3.3	多相滤波信道化接收机体系结构	95
3.3.1	数字滤波器组与信道化基本概念	96
3.3.2	复信号的多相滤波信道化接收机	99
3.3.3	实信号的多相滤波信道化接收机	100
3.4	软件无线电发射机体系结构	103
3.4.1	单通道软件无线电发射机	103
3.4.2	多通道软件无线电发射机	106
3.5	信道化软件无线电发射机体系结构	107
3.5.1	信道化发射机的基本概念	108
3.5.2	复信号输出的多相滤波信道化发射机	109



3.5.3	实信号输出的多相滤波信道化发射机	111
附录:	8 路多相滤波信道化软件无线电发射机 MATLAB 仿真程序	114
	习题与思考题 3	116
<b>第 4 章</b>	<b>软件无线电硬件平台设计</b>	<b>118</b>
4.1	软件无线电硬件系统设计	118
4.1.1	软件无线电硬件系统设计原则	118
4.1.2	软件无线电硬件系统结构设计	124
4.2	软件无线电的射频前端	130
4.2.1	射频前端的组成结构	130
4.2.2	射频前端各功能模块的设计	131
4.2.3	射频前端的指标	140
4.3	软件无线电中的 A/D/A 技术	148
4.3.1	A/D 转换器原理与分类	148
4.3.2	A/D 转换器性能指标	152
4.3.3	A/D 转换器的选择	158
4.3.4	数据采集模块的设计	159
4.3.5	D/A 转换器的基本原理及性能指数	161
4.4	软件无线电数字前端	163
4.4.1	软件无线电数字前端的定义	163
4.4.2	软件无线电中的数字接收前端 (数字下变频 DDC)	166
4.4.3	软件无线电中的数字发射前端 (数字上变频 DUC)	169
4.4.4	软件无线电数字前端的 FPGA 实现	170
4.4.5	软件无线电数字前端的 ASIC 实现	177
4.5	高速数字信号处理器	179
4.5.1	软件无线电信号处理的特点	179
4.5.2	数字信号处理器的选择技巧	180
4.5.3	数字信号处理器 (DSP) 介绍	182
4.5.4	通用处理器 (GPP) 介绍	184
4.6	高速 FPGA 设计技术	185
4.6.1	软件无线电中的高速 FPGA	185
4.6.2	FPGA 基本原理	189
4.6.3	基于高速 FPGA 的软件无线电系统设计	191
4.7	软件无线电系统设计实例	202
	习题与思考题 4	205
<b>第 5 章</b>	<b>软件无线电信号处理算法</b>	<b>207</b>
5.1	软件无线电中的调制算法	207

5.1.1	信号调制通用模型	207
5.1.2	模拟信号调制算法	208
5.1.3	数字信号调制算法	212
5.2	软件无线电解调算法	218
5.2.1	信号解调通用模型	218
5.2.2	模拟调制信号解调算法	220
5.2.3	数字调制信号解调算法	222
5.3	软件无线电中的同步算法	227
5.3.1	数字锁相环	228
5.3.2	同步参数估计	229
5.3.3	软件无线电中的载波同步算法	232
5.3.4	软件无线电中的位同步算法	241
5.3.5	载波和位同步的联合最大似然估计算法	245
5.3.6	软件无线电中的帧同步算法	246
5.4	软件无线电的中均衡算法	247
5.4.1	线性均衡算法	247
5.4.2	判决反馈均衡算法	250
5.4.3	自适应均衡算法	251
5.4.4	盲均衡算法	255
5.5	调制样式自动识别算法	259
5.5.1	模拟调制信号的自动识别	259
5.5.2	数字调制信号的自动识别	262
5.5.3	模拟数字调制信号的联合自动识别	264
5.5.4	信号调制样式自动识别中应注意的几个问题	265
5.5.5	基于人工神经网络的调制识别	269
	习题与思考题 5	271
<b>第 6 章</b>	<b>信道编译码技术</b>	<b>272</b>
6.1	信道编译码基础	272
6.2	信道编码概述	274
6.2.1	扰码	274
6.2.2	纠错码及交织	276
6.2.3	信道编码的应用及性能	281
6.3	几种简单的检纠错码	283
6.4	RS 码的编译码	287
6.4.1	RS 码的编码	287
6.4.2	RS 码的译码	289
6.5	卷积码的编译码	292

6.5.1	卷积码的编码	292
6.5.2	Viterbi 译码法	294
6.5.3	误码率检测	298
6.6	Turbo 码的编译码	298
6.6.1	Turbo 码的编码	298
6.6.2	Turbo 码的译码	301
	习题与思考题 6	302
<b>第 7 章</b>	<b>软件通信体系结构 (SCA)</b>	<b>304</b>
7.1	SCA 规范介绍	304
7.1.1	SCA 的基本概念	304
7.1.2	SCA 规范介绍 <sup>[1]</sup>	306
7.2	SCA 系统工作原理	319
7.2.1	SCA 系统的运行及管理	319
7.2.2	波形应用的安装和卸载	321
7.2.3	波形应用的实例化和控制	322
7.3	波形应用开发	323
7.3.1	波形描述语言 (WDL)	323
7.3.2	SCA 波形应用的开发过程	326
7.3.3	基于 OSSIE 的 SCA 波形应用开发	327
	习题与思考题 7	336
<b>第 8 章</b>	<b>软件无线电在无线工程中的应用</b>	<b>337</b>
8.1	软件无线电在军事通信中的应用	337
8.1.1	软件无线电的先驱——MBMMR 电台	338
8.1.2	联合战术无线电系统 (JTRS)	339
8.2	软件无线电在移动通信中的应用	341
8.2.1	软件无线电基站接收分系统	342
8.2.2	软件无线电基站发射分系统	347
8.2.3	软件无线电基站的技术挑战	351
8.2.4	软件无线电手持终端 (移动手机)	352
8.3	软件无线电在电子战中的应用	353
8.3.1	软件无线电侦察接收机	354
8.3.2	基于多相滤波的电子战信道化接收机	358
8.3.3	软件无线电干扰发射机	361
8.4	软件无线电在雷达中的应用——“软件雷达”	364
8.4.1	“软件雷达”的基本概念	365
8.4.2	软件雷达的实现原理	365

8.4.3	相控阵软件雷达系统	367
8.5	软件无线电在天基信息系统中的应用——“软件星”	368
8.5.1	“软件星”基本概念	369
8.5.2	“软件星”有效载荷的组成原理	370
8.5.3	基于“软件星”的综合一体化天基信息系统	371
106	习题与思考题 8	373
<b>第 9 章 软件无线电的新发展——认知无线电</b>		<b>375</b>
9.1	认知无线电基本概念	375
9.1.1	认知无线电的提出背景	375
9.1.2	认知无线电的定义及特点	376
9.1.3	认知无线电关键技术	377
9.2	认知无线电的认知循环过程	377
9.2.1	频谱感知	378
9.2.2	频谱分析	378
9.2.3	频谱决策	379
9.2.4	频谱会聚	379
9.2.5	频谱监视	380
9.2.6	频谱切换	380
9.3	频谱感知技术	380
9.3.1	接收机检测频谱感知	381
9.3.2	发射机检测频谱感知	381
9.3.3	协作频谱感知	384
9.3.4	多维频谱感知	384
9.4	IEEE802.22 标准	385
9.4.1	物理层接口	385
9.4.2	MAC 层接口	386
9.4.3	其他接口要求	387
142	习题与思考题 9	388
<b>参考文献</b>		<b>389</b>



# 第1章 概述

“软件无线电 (Software Radio)”的概念最早是由美国 MITRE 公司的 Joseph Mitola III 博士在 1992 年 5 月美国的全国电信系统会议 (National Telesystem Conference) 上提出的, 主要用于解决军事通信的“通话难”(美国三军或盟军之间互连互通困难)问题<sup>[1,2]</sup>。但是到现在软件无线电这个术语已经不再是通信专业人士的专有名词, 它已经从军事通信领域渗透到了包括民用移动通信、雷达、电子战、测控, 甚至电视广播等无线电工程各个领域<sup>[3]</sup>。正如 Jeffrey H.Reed 的专著《软件无线电: 无线电工程的现代方法》<sup>[4]</sup>的书名所蕴涵的意思那样, “软件无线电”是无线电工程中的新方法, 是一种设计理念, 也是一种思想体系。

本章以最具代表性的民用移动通信的发展为例, 介绍软件无线电的概念、软件无线电的由来、软件无线电的特点以及软件无线电的体系框架等内容。

## 1.1 无线移动通信简述

无线通信领域让大家感受最深的是民用移动通信的快速发展。民用移动通信在短短的二十年时间里已发展了三代: 20 世纪 80 年代的模拟体制 (TACS/AMPS) 为第一代移动通信 (简称 1G); 20 世纪 90 年代的数字体制 (GSM/CDMA/TDMA) 为第二代移动通信 (简称 2G); 第三代移动通信体制包括我国提出的 TD-SCDMA 和美国提出的 CDMA2000 以及欧洲提出的 WCDMA 等体制 (简称 3G); 目前第四代移动通信 (4G) 已全面推广, 软件无线电非常适合 4G。由此可见, 移动通信经历了从模拟无线电到数字无线电, 再从数字无线电到软件无线电的发展过程。下面以移动通信发展为例来介绍无线电技术的发展历程, 从而回答什么是软件无线电, 以及为什么要提出软件无线电概念等问题。

### 1.1.1 模拟无线电

第一代移动通信系统的主要目标是为在大范围内有限的用户提供移动电话服务。第一代移动通信系统的特点是: 用户数量相对较少; 业务密度相对较低; 小区半径较大, 一般从几千米到几十千米; 每个小区使用一定数量的无线信道频率。在 20 世纪 70 年代末, AT&T 贝尔实验室开发了称为高级移动电话业务 (AMPS) 的美国第一个蜂窝电话系统。AMPS 于 1983 年末在芝加哥第一次投入使用。欧洲的全接入通信系统 (TACS) 在 80 年代中期开发成功, 除信道带宽为 25kHz 与 AMPS 的 30kHz 不同外, 它实际上与 AMPS 是基本一致的。我国于 80 年代后期引进了欧洲的 TACS 移动通信体制 (就是在当时流行一时的“大哥大”)。无论是美国的 AMPS 还是欧洲的 TACS, 都采用模拟技术体制, 多址方式为频分多址 (FDMA), 即分配给每个移动基站一定数量的载频, 用于与手机用户之间的话音通信; 话音调制采用普通的模拟调频 (FM) 体制。AMPS 使用了 800~900MHz 频段中 20MHz 带宽的 666 个信道, 其中 624 个话音信道, 42 个控制信道 (AMPS 采用 10kbps 的 FSK 调制, TACS 则为 8kbps 的 FSK 调制)。除了 AMPS

和 TACS 这两大系统外，国际上还有很多其他体制的第一代移动通信系统，如法国的 Radiocom 2000 系统、北欧的 NMT 系统、日本的 NTT 等。表 1-1 列出了第一代移动通信系统的无线接口概况。

表 1-1 第一代移动通信系统无线接口概况

系统名称	AMPS	TACS	Radiocom2000	NMT900	NAMTS
多址方式	FDMA	FDMA	FDMA	FDMA	FDMA
使用频段： 下行链路（MHz）	869~894	935~960	424.8~428	890~915	870~885
上行链路（MHz）	824~849	890~915	414.8~418	935~960	925~940
信道间隔（kHz）	30	25	12.5	12.5	25/12.5
调制方式	FM	FM	PM	FM	FM
信道数	832	1000	1999	256	600
控制信令	FSK±8kHz	FSK±6.4kHz	FFSK/NRZ	FSK±3.5kHz	FSK±4.5kHz
使用地区	美国	欧洲/中国	法国	北欧	日本

图 1.1 给出了第一代（模拟）移动通信系统接收机组成框图<sup>[5]</sup>。经天线接收的无线电信号首先通过带通滤波器的滤波和低噪声放大器的信号放大，送给第一混频器进行射频到中频的频率变换，把射频信号变换为 45MHz 的中频信号；该中频信号经过中频放大后再与第二本振混频，把 45MHz 的第一中频信号变换为 462.5kHz 的第二中频信号，中频滤波器的带宽取决于信号带宽，对于 AMPS 系统为 30kHz，TACS 系统则为 25kHz，其他系统则选择 12.5kHz；第二中频信号经过中频放大后送到锁相环 FM 解调器进行解调，最后通过耳麦输出话音信号。

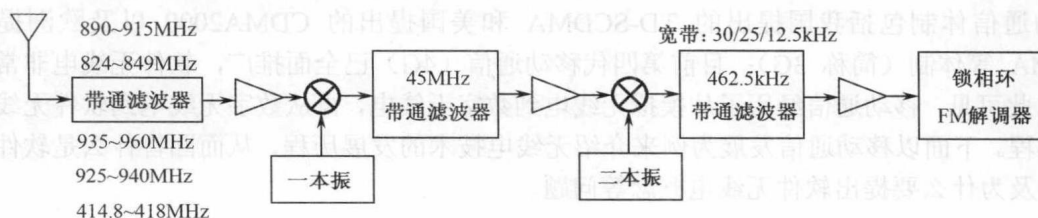


图 1.1 第一代（模拟）移动通信系统接收机组成框图

图 1.1 所示的接收机看起来似乎非常简单，它的特点是全部采用模拟技术来完成整个接收解调过程。所以，第一代移动通信系统可以称其为模拟无线电。这种模拟体制无线电存在的最大问题是无法适应多种通信体制：首先，包括带通滤波器、一本振在内的低噪声前端电路必须按照不同移动通信体制所对应的工作频段来设计，比如对应表 1-1 给出的 5 种体制不同的工作频段就需要设计 5 种射频前端；第二，由于不同的通信体制采用了不同的信号带宽和调制参数，图 1.1 中的中频滤波器也需要设计成与其相匹配的带宽，后续的解调器也同样需要按照不同体制所采用的调制方式（FM、PM）和调制参数（如 AMPS 的话音调制频偏±12kHz，TACS 的话音调制频偏±12.726kHz，NAMTS 的话音调制频偏±5kHz）来设计。也就是说按照某一标准设计的接收机只能适用于特定的通信体制，除非增加包含各种不同的滤波器、解调器、射频前端等硬件电路，通过开关切换来选择其工作频段、带宽和解调方式。但是，这样做势必大大增加硬件的复杂性、体积和成本，尤其对手机是非常不可取的。总之，受制于当时的技术水平，第

一代移动通信系统采用了模拟无线电技术体制，特点是中频带宽为单信道窄带体制，一部接收机同时只能解调处理一个用户的信号，通信功能完全由定制的硬件决定，信号适应能力差、缺乏灵活性，更无法满足可扩展、可升级的高要求。

### 1.1.2 窄带数字无线电

随着第一代移动通信系统的推广使用，移动通信在全球范围内取得了飞速的发展。第一代移动通信系统由于受模拟技术体制的限制已无法满足越来越广泛的用户需求，于是就提出了基于数字体制的第二代移动通信系统。第二代移动通信系统相比于第一代移动通信系统的主要区别是：

- 第二代移动通信系统采用了数字调制技术，具有更强的抗干扰能力和更大的通信容量（可以通过语音压缩增加逻辑信道数）；
- 第二代移动通信系统采用了时分多址（TDMA）和码分多址（CDMA）体制，大大提高了频谱利用率，增加了系统容量；
- 第二代移动通信系统随着使用频段的提高，蜂窝小区半径可以减小到几百米，从而可以提高单位面积内的业务量；
- 第二代移动通信系统由于采用了数字体制，可以与数字化固定基础设施能更好地兼容，系统对漫游和切换的管理得到了显著的改善。

第二代移动通信系统以 GSM、IS-95、IS-54（D-AMPS）和 DCS1800 为典型代表，它们的无线接口主要特点如表 1-2 所示<sup>[6]</sup>。第二代移动通信系统的最大不同是采用了数字调制，这也就为采用新的 TDMA、CDMA 多址方式奠定了基础；另外信道带宽也从模拟体制的 30/25kHz 提高到了 200kHz 和 1.25MHz（D-AMPS 除外）。当然，这种在技术体制上的完全革新带来的问题是与第一代系统无法兼容，旧系统将被完全废弃（D-AMPS 可以部分保留旧系统），这显然是非常不经济的。

表 1-2 第二代移动通信系统无线接口概况

系统名称	GSM	IS-95	IS-54 (D-AMPS)	DCS1800
多址方式	TDMA/FDMA	CDMA/FDMA	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA
使用频段：				
下行链路 (MHz)	935~960	869~894	869~894	1710~1785
上行链路 (MHz)	890~915	824~849	824~849	1805~1880
信道间隔 (kHz)	200	1250	30	200
调制方式	0.3GMSK	BPSK/QPSK	$\pi/4$ DQPSK	0.3GMSK
信道速率 (kbps)	270.833	1228.8	48.6	270.833
语音编码 (kbps)	13	8 (可变)	7.95	13
帧长 (ms)	4.615	20	40	4.615

图 1.2 给出了 GSM 接收机的组成框图<sup>[7]</sup>，它的主要特点是通过二次变频的射频前端把射频信号变换为中频信号（图中的一中频频率为 71MHz，二中频频率为 6MHz）后，首先进行 A/D 采样数字化，把模拟中频信号变换为数字信号，再由信号处理器（DSP）完成解调任务。从图 1.2 的组成框图来看，第二代数字移动通信系统与第一代模拟移动通信系统相比较，在组成结构上似乎没有太大的区别，但第二代系统的最大不同是两个“数字化”：一是通信体制的数字

化，即把话音信号数字化后经过数字调制（MSK/PSK）进行信息传输；二是解调方式的数字化，即首先把接收的已调模拟信号进行 A/D 采样数字化，再对数字化信号进行“软件”解调。A/D 采样和“软件”解调功能都是由图中的数字化解调器完成的，而数字化解调器则由 ADC（模数变换器）和 DSP（信号处理器）构成，解调软件就驻留在 DSP 内。之所以称第二代移动通信系统为数字移动通信系统其原因是通信体制数字化和解调方式数字化。我们把第二代移动通信系统叫做数字无线电。

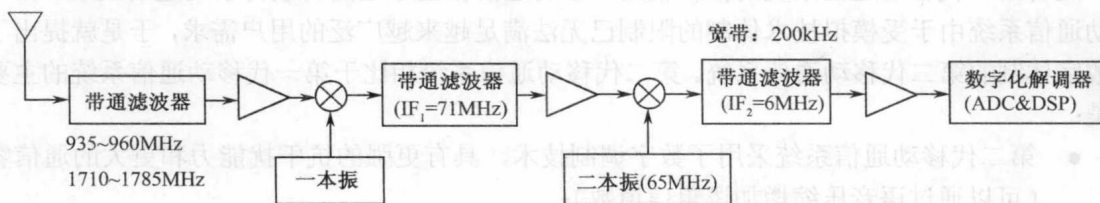


图 1.2 第二代数字移动通信系统（GSM）接收机的组成框图

第二代的数字无线电相对于第一代的模拟无线电虽然在技术体制上上了很大一个台阶，通信服务性能也随之大为提高，但它对不同通信体制（FDMA、TDMA、CDMA）、不同信号类型（FM、MSK、BPSK、QPSK）的适应能力还不是很强。主要表现在射频前端只能适用特定的频段，如 800MHz 频段或 900MHz 频段或 1800MHz 频段，无法实现多频段通用；其次是中频带宽还是按照不同通信体制的特定信号来设计的，比如在图 1.2 中就设计成了只适用于 GSM 和 DCS1800 的 200kHz 带宽，对于 IS-95 CDMA 体制的 1.25MHz 带宽就不适用了，必须重新设计；另外，数字化解调器也并不像前面所说的其解调功能完全是“软件化”的：解调虽然是由 DSP 中的软件来实现，但這些“软件”是被“固化”了的，要想修改它并不容易，更谈不上对软件功能的“在线重构”或“动态重构”。基于上述三大原因，我们认为第二代数字移动通信系统只能称为数字无线电，而不能叫做软件无线电。

### 1.1.3 宽带数字无线电

随着因特网的普及，人类对信息化的需求越来越高，尤其是对无线多媒体的需求更为迫切，如无线上网浏览、无线网上影院、无线视频会议、无线远程医疗诊断、无线支付等。面对快速增长的各种多媒体数据业务需求，第二代数字移动通信系统已明显感到力不从心，难以应对。移动通信领域面对新的用户需求提出了第三代移动通信系统的设想，3G 的目标是比第二代移动通信系统提供更高的比特率和更好的频谱利用率，以便为 3G 用户提供业务种类更加广泛、服务质量（QoS）更优的数据业务。

目前被 ITU 认可的第三代移动通信系统标准主要有三个：WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA。WCDMA 是以欧盟为主提出的宽带 CDMA 标准；CDMA2000 是以美国为主提出、并与 IS-95 能够平滑过渡的 3G 标准；TD-SCDMA 则是中国提出、具有自主知识产权的 3G 标准。这三大 3G 标准各有特点，但都符合 ITU 关于第三代移动通信系统 IMT-2000 的要求，因此也就得到了全世界的广泛认可。这三大标准的无线接口特点如表 1-3 所示<sup>[8]</sup>。



表 1-3 第三代移动通信系统无线接口概况

系统名称	WCDMA	CDMA2000	TD-SCDMA
双工方式	FDD	FDD	TDD
工作频段			
下行链路 (MHz)	2110~2170MHz	2110~2170MHz	1880~1920MHz
上行链路 (MHz)	1920~1980MHz	1920~1980MHz	2010~2025MHz
信道间隔	5/10 /20MHz	1.25/3.75/11.5/15MHz	$n \times 1.6$ MHz
调制方式	QPSK/BPSK	QPSK/BPSK	OQPSK/8PSK/16QAM
码片速率	3.84Mchip/s	1.2288Mchip/s	1.28Mchip/s
扩频因子	4~512	4~256	1/2/4/8/16
帧长	10ms	20ms	10ms (分两个子帧)

第三代移动通信系统的最大特点是高的数据速率，步行环境最小为 384kbps，室内环境可达 2Mbps，车载环境最高速率可达 144 kbps；同时为提高频谱利用率，采用了高效的多进制调制技术，如 QPSK、8PSK、16QAM 等；另外，这三大 3G 标准除了都统一采用 CDMA 多址方式外，在具体实现上还是有些差别的，比如 TD-SCDMA 采用的是 TDD（时分双工）体制，而 WCDMA 和 CDMA2000 采用的是 FDD（频分双工）体制。WCDMA 最初是以爱立信、诺基亚公司为代表的欧洲通信厂商提出来的。这些公司都在第二代移动通信技术和市场上抢占了先机，希望能在第三代移动通信领域依然保持世界领先地位。WCDMA 主要采用了信道带宽为 5MHz 的宽带 CDMA、上/下快速功率控制、下行发射分集、基站间可以异步操作等新技术。CDMA2000 是在 2G 系统（IS-95）的基础上由高通、浪讯、摩托罗拉和北电等美国公司一起提出。CDMA2000 技术的选择和设计最大限度地考虑和 IS-95 系统的后向兼容，很多基本参数和特性都是相同的，并在无线接口上采用了增强技术，例如：提供反向导频信道、前向链路中可以采用发射分集、增加了前向快速功率控制等。CDMA2000 最大的特点是只需要增加新的信号处理单元即可在原有的 2G 系统（IS-95）上实现向 3G 的平滑过渡，绝大部分的无线设备（由于信道带宽是一样的）和核心网设备都可以共用，升级成本最低。TD-SCDMA 是由我国的大唐电信集团在国家主管部门的支持下，根据多年的研究提出的 3G 标准。TD-SCDMA 由于采用了 TDD 模式，上/下行工作于同一频段，不需要大段的连续对称频谱，这一点在频谱资源日趋紧张的今天尤其重要，并采用了软件无线电、智能天线、联合检测等先进技术；另外，TD-SCDMA 在上述三大主流标准中具有最高的频谱效率。

第三代移动通信系统从 ITU 的最初愿望出发还是希望能够实现全球统一，但由于受各大利益集团的制约，要制定全球统一的 3G 系统标准难度是非常大的，最后 ITU 放弃了全球统一的思想。目前能够基本统一在这三大主流标准上也已实属不易。由于 3G 三大主流标准未能进行联合设计，无论是采用的技术体制、信号带宽，还是调制方式等都存在一定的差异，因此目前三大标准无论是无线射频系统还是基带信号处理设备都是不能通用的。图 1.3 给出了 WCDMA 移动通信系统接收机的组成框图。