

CMP 科技经典

3G/B3G

核心技术丛书

01010101100
01010101100

软件无线电 原理与工程应用

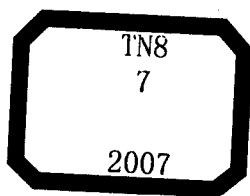
姜宇柏 游思晴 等编著

3G/B3G核心技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

3G/B3G 核心技术丛书



软件无线电原理与工程应用

姜宇柏 游思晴 等编著



机械工业出版社

软件无线电强调技术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。本书作为一本软件无线电方面的参考书,在内容上力求做到全面和系统,在风格上力求工程化、实用、通俗易懂。本书介绍了软件无线电的基本概念、基本理论、数字信号的生成、同步技术、数/模转换器和模/数转换器、软/硬件平台与算法的工程实现,以及智能天线等方面的内容。

本书内容详尽,理论与实践相结合,适合从事现代通信系统设计、开发和研究的工程师和相关研究人员阅读,也可作为高等院校通信等相关专业师生学习软件无线电的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

软件无线电原理与工程应用/姜宇柏,游思晴等编著. —北京:机械工业出版社, 2006.10

(3G/B3G 核心技术丛书)

ISBN 7-111-20110-8

I. 软... II. ①姜...②游... III. 计算机通信—无线电通信
IV. TN92-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 123952 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:张俊红 版式设计:霍永明 责任校对:王欣
封面设计:马精明 责任印制:杨曦
北京外文印刷厂印刷
2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·19.25 印张·474 千字
0001—4000 册
定价:33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)88379768
封面无防伪标均为盗版

3G/B3G 核心技术丛书

编 委 会

主任委员：袁超伟 姜宇柏

委 员(排名不分先后)：

程宝平 曾春亮 黄 韬 梁守青

贾 宁 赵 鑫 俞一鸣 汪裕民

杨睿哲 李美玲 张 宁 齐伟民

孙昌璐 刘 鸣 王旭莹 蒋建新

丛 书 序

目前，3G 已成为中国传统电信运营企业转型的关键之一，同时成为中国电信设备制造企业国际化发展的重要机遇。

然而，随着宽带数据和多媒体业务的迅猛发展，第三代移动通信原定目标规定的 2Mbit/s 的传输速率已经远远不能满足需求，3G 技术正在朝着 B3G、4G 技术方向发展。由于我国至今没有正式颁发 3G 业务牌照，一方面使得国内很多著名的 3G 设备制造企业不得不将更多的精力放在国际市场的开拓上；另一方面使得我国可以充分发挥后发优势，在 3G 网络的建设过程中可以引入各项成熟的新技术，即在我国 3G 网络中直接应用部分 B3G 乃至 4G 的核心技术，提高我国 3G 网络的业务能力。

因此，我们策划了这套“3G/B3G 核心技术丛书”，对 HSDPA/HSUPA 技术、IMS 技术、OFDM 技术、MIMO 技术、智能天线技术、软件无线电技术和 WiMAX 技术等主流的新技术进行阐述，内容涉及 3G/B3G 网络的无线接入、核心网、智能天线、频分复用、系统设计等多个方面。

希望通过阅读本套丛书，读者能够比较全面地了解 3G/B3G 系统的各项核心技术，更希望本套丛书能对我国 3G/B3G 系统的网络建设和产业发展作出一定的贡献。

由于通信技术发展十分迅速，加上编写时间相对紧张，书中难免存在不足，恳请广大读者和专家批评指正，联系信箱 buptzjh@163.com。

3G/B3G 核心技术丛书编委会

2006 年 8 月

前 言

软件无线电 (Software Radio) 技术是 20 世纪末提出的一种设计思想, 它突破了传统电台以硬件为核心的设计模式, 将宽带 A/D 转换器尽可能靠近射频天线, 尽可能早地将接收到的模拟信号转化为数字信号, 在通用的硬件平台上最大程度地通过软件来实现不同的通信方式。

软件无线电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, 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, 强调以可编程的硬件作为通用平台, 尽量地用可升级、可重配置的软件来实现各种无线电功能的设计新思路。软件无线电技术一经提出, 就得到了广泛的关注, 并成为未来通信系统的发展方向。本书针对软件无线电的若干关键技术——软件无线电体系结构、高速 ADC、信噪比估计技术、同步技术、频率合成技术以及智能天线技术等进行了探讨。在探讨技术的同时, 本书注重理论的介绍, 使读者不仅对当前工程中常用的软件无线电技术有所了解, 而且对理论也有较为深刻的理解, 这对技术开发工程师是很有必要的。作者作为软件无线电开发工程师, 在多年的开发过程中也深刻地感受到, 软件无线电是一个庞大的理论体系, 我们只能在其中某个部分做一些工作。然而, 做任何一部分工作都需要对软件无线电的技术有全面的、系统的理解。而就现在看来, 设计数字信号处理算法的很多工程师根本不懂射频, 射频工程师也对数字信号处理知之甚少, 这在很大程度上减缓了软件无线电的工程实现进展。作者查阅了大量的资料, 力图做到全面、系统、深刻地介绍软件无线电的关键技术, 希望通过对本书的学习, 读者能够对软件无线电的技术有全面系统的认识。

本书内容丰富、技术新颖、实用性强, 可以使读者对软件无线电的关键技术及其工程实现有系统的认识。本书可作为高等院校通信电子类高年级本科生、研究生的教材或教学参考书。同时对于通信、雷达、程控交换、医疗器械、消费电子、工业控制和航空航天等各个领域的设计工程师和科研人员来说, 本书也是一本具有指导和实用价值的技术参考书。本书结构如下:

第 1 章为软件无线电概述, 介绍了软件无线电的基本概念、基本结构及发展概况。

第 2 章为软件无线电的体系结构, 主要介绍了规范的软件无线电节点体系、可编程数字电台 (PDR) 实例研究及软件无线电电台的设计准则——分段权衡。通过本章的讨论, 使读者能够对软件无线电及其研究方法有整体的了解, 为开展软件无线电的研究与开发奠定基础。

第 3 章为软件无线电的理论基础, 主要介绍了软件无线电所必需的一些理论, 包括信号采样理论、软件无线电中的高效滤波器以及多抽样率信号处理理论。本章的理论是学习软件无线电的基础知识, 后续的章节都基于本章的理论。

第4章为信号的数字生成，主要介绍了数字成形技术、数字上变频技术及数字频率合成技术。

第5章为高速ADC，高速模/数转换器、数/模转换器都是软件无线电的关键器件，软件无线电对这些器件的要求很高。本章主要介绍了转换过程、性能参数以及如何在精度、动态范围等参数之间权衡。

第6章为射频及模拟前端，介绍了射频前端设计的基本知识和基本指标，讨论了主要模拟前端器件的基本原理及应用。

第7章为数字下变频及同步技术，主要介绍了数字下变频技术和同步技术。数字下变频技术和同步技术是软件无线电接收机设计和实现的关键部分，也是最困难的部分。通过本章的讨论，使读者能够了解下变频技术和同步技术的数字实现方法以及对系统的性能影响。

第8章为软件无线电中的信号处理算法及有关内容，主要包括调制解调技术、同步算法以及信噪比估计技术等。

第9章为硬件平台介绍，主要介绍了DSP和FPGA以及软件开发平台。

第10章讨论了基于软件无线电的智能天线，讨论了智能天线的基本概念、智能天线的结构、智能天线中的波束赋形DOA估计技术。

本书由姜宇柏和游思晴编写，书中包含着作者多年来软件无线电设计技术开发工程项目的经验总结。但作为软件无线电开发实现方面的工程师，作者很难精通软件无线电所有的关键技术。因此从这种意义上说，本书可以看成对当前的应用比较广泛的软件无线电技术的一个总结，这实际上是软件无线电工程师们共同的成果，这里向广大同行表示由衷的感谢。同时，在本书的编写过程中，张学静、吴鹏、潘天保、张博、赵鑫、李晓凯、张凯、齐兆群、张蓬、蒋建新、姜海燕、尤晓丽、夏钦东和杜平完成了全书的资料收集和整理工作，并完成了全书的文字校对和部分章节的编写工作，这里对他们的辛勤劳动一并表示感谢！

由于软件无线电技术发展迅速，各种相关新技术不断涌现，同时限于作者的理论水平和实际开发经验，书中难免存在一些错误或不足之处，恳望广大读者和相关专家批评指正。

作者

目 录

丛书序

前言

第 1 章 软件无线电概述	1
1.1 软件无线电的概念	1
1.2 软件无线电技术的发展概况	2
1.2.1 目前国际上软件无线电技术的 研究水平	2
1.2.2 通用及专用 DSP 芯片的发展 现状	3
1.2.3 软件无线电技术在 3G 及 4G 中 的应用	3
1.3 理想的软件无线电及其限制的 解决思路	5
第 2 章 软件无线电的体系结构	7
2.1 体系结构简介	7
2.2 体系结构研究	8
2.3 评价软件无线电系统的软件程度 的“矢量”	9
2.4 可编程数字电台 (PDR) 实例研究	10
参考文献	11
第 3 章 软件无线电的理论基础	13
3.1 信号采样理论	13
3.1.1 基本的采样理论——Nyquist 采样定理	13
3.1.2 自然抽样的脉冲调幅	16
3.1.3 平顶抽样的脉冲调幅	17
3.1.4 带通采样技术	17
3.1.5 带通采样对信号的影响	20
3.2 采样率变换原理	24
3.2.1 整数倍抽取	25
3.2.2 整倍数内插	29
3.2.3 比值为有理数的采样率变换	30
3.3 高效数字滤波器	38
3.3.1 积分梳状滤波器	39
3.3.2 半带滤波器	42
3.3.3 FIR 低通滤波器	44
参考文献	52

第 4 章 信号的数字生成	53
4.1 基带成形滤波	53
4.1.1 基带成形原理	53
4.1.2 成形滤波器的设计	53
4.1.3 基带成形滤波器的实现	56
4.2 频率合成技术	59
4.2.1 直接数字频率合成器的工作原理	61
4.2.2 数字锁相频率合成器工作原理	64
4.2.3 直接数字频率合成器和数字锁相 频率合成器的特点	68
4.2.4 直接数字频率合成器和数字锁相 频率合成器的性能分析	74
4.2.5 参考时钟对 DDS 输出信号的 影响	82
4.2.6 直接数字频率合成器的硬件 实现	85
4.2.7 直接数字频率合成器的性能 改进	89
4.2.8 设计和实现频率合成器的考虑 因素	90
4.2.9 高性能 DDS 芯片 AD9854 简介	97
4.2.10 AD9854 在数字调制中的典型 应用	98
参考文献	100
第 5 章 高速 ADC	101
5.1 D/A 转换原理	102
5.1.1 权电阻 D/A 转换器	102
5.1.2 倒 T 形电阻网络	103
5.1.3 权电流型 D/A 转换器	104
5.1.4 D/A 转换器的主要指标	105
5.2 A/D 转换器原理	105
5.2.1 采样和保持	105
5.2.2 量化与编码	106
5.2.3 采样—保持电路	106
5.2.4 并行比较型 A/D 转换器	107
5.2.5 双积分型 A/D 转换器	109
5.2.6 逐次比较型 A/D 转换器	109

5.3 ADC 的技术指标分析	111	6.2.2 混频器常用技术指标	147
5.3.1 ADC 分辨率与量化电平	111	6.2.3 混频器设计	150
5.3.2 无杂散动态范围	111	6.3 小信号低噪声放大器	152
5.3.3 量化方法与量化误差	111	6.3.1 主要指标分析	152
5.3.4 互调失真	113	6.3.2 宽带放大器	154
5.3.5 信噪比	113	6.3.3 LNA 的设计流程	156
5.3.6 转换时间	114	6.3.4 低噪声放大器的设计理念	157
5.3.7 有效位数	114	6.3.5 放大器的级连	158
5.3.8 D/A 转换器的转换精度	114	6.4 自动增益控制环路	160
5.3.9 总谐波失真	115	6.5 抗混叠滤波	162
5.3.10 信纳比	115	6.6 高频功率放大器的原理和特性	163
5.3.11 全功率模拟输入带宽	116	6.6.1 工作原理	163
5.4 超高速数据采集系统	116	6.6.2 负载特性	167
5.4.1 超高速视频闪烁 A/D 转换器	116	6.6.3 调制特性和放大特性	168
5.4.2 基于流水线的 ADC 结构	117	参考文献	169
5.4.3 时间扩展型 A/D 转换器	121	第 7 章 数字下变频及同步技术	171
5.4.4 $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC	122	7.1 数字下变频	171
5.5 孔径时间抖动及其对 ADC 精度的影响	124	7.1.1 数字下变频过程的时域分析	171
5.5.1 孔径抖动的概念	125	7.1.2 数字下变频过程的频域分析	172
5.5.2 孔径抖动对系统信噪比的影响	126	7.1.3 数字下变频的实现	175
5.5.3 减小孔径抖动的措施	128	7.1.4 一个基于 FPGA 全数字下变频模块的实例	176
5.6 高速 ADC 的性能测试	128	7.2 同步技术	180
5.7 Dither 技术及其应用	130	7.2.1 概述	180
5.7.1 Dither 信号的种类	130	7.2.2 载波同步	181
5.7.2 各种 Dither 信号的加入方式	130	7.2.3 不同载波同步的算法设计对比	186
5.7.3 Dither 信号对 ADC 性能的影响	130	7.2.4 载波同步系统的性能及相位误差对解调性能的影响	188
5.7.4 产生 Dither 信号的具体电路	131	7.2.5 全数字锁相环路	189
5.8 高速 ADC 对系统性能的影响及高速 ADC 芯片的选择	132	7.2.6 数字科斯塔斯环的分析与设计	192
5.9 高速 ADC 的硬件设计	136	7.2.7 数字锁相环抗干扰性能的改善	194
参考文献	138	7.2.8 位同步	195
第 6 章 射频及模拟前端	139	7.3 HSP50210 专用 DCL 芯片	200
6.1 无线收发系统的主要技术指标	139	7.3.1 基本特征	200
6.1.1 三阶交调	139	7.3.2 基本结构	200
6.1.2 级连交调	141	7.3.3 基本单元的原理与功能	200
6.1.3 噪声系数	141	参考文献	205
6.1.4 无杂散动态范围	143	第 8 章 软件无线电中的信号处理算法	207
6.1.5 灵敏度	144	8.1 软件无线电中的调制解调算法	207
6.1.6 接收机动态范围	145	8.1.1 AM 调制解调	207
6.1.7 邻道功率抑制比	146	8.1.2 FM 调制解调	208
6.2 混频器的技术指标设计	147		
6.2.1 混频器基本原理	147		

8.1.3	相移键控信号	210	9.1.2	DSP 的选择	251
8.1.4	正交振幅调制	213	9.1.3	TMS320VC5402 介绍	252
8.1.5	最小频移键控	216	9.2	现场可编程门阵列及开发环境简介	259
8.1.6	高斯最小频移键控	221	9.2.1	现场可编程门阵列	259
8.1.7	正交频分复用	225	9.2.2	ISE 开发系统	260
8.2	利用 CORDIC 计算特殊函数	231	9.3	选择 ASIC、FPGA 或 DSP 的原则	261
8.2.1	CORDIC 算法的原理	232	参考文献	262	
8.2.2	利用 CORDIC 实现直角坐标到极 坐标转换	233	第 10 章 智能天线	263	
8.3	软件无线电中的数字正交技术	233	10.1	引言	263
8.3.1	I、Q 通道幅相不平衡的影响 分析	234	10.2	智能天线的优点及应用	264
8.3.2	几种数字正交分解技术	235	10.3	智能天线提高系统性能的原理	265
8.4	数字化接收技术	239	10.4	智能天线的理论研究	267
8.4.1	信号的数字检测原理	239	10.5	智能天线的工程实现进展	268
8.4.2	数字检测技术的应用	240	10.6	智能天线分类	269
8.5	信噪比估计算法	242	10.7	智能天线的理论简介	270
8.5.1	系统模型	243	10.7.1	波束成形的原理	270
8.5.2	误差矢量幅度算法	243	10.7.2	波束成形的结构	276
8.5.3	估计 DQPSK 信噪比的 4 种 算法	245	10.8	波束成形算法	279
8.5.4	信号二阶统计量的多项式近似 算法	246	10.8.1	Bartlett 波束形成器	280
8.5.5	PSK 信号的高阶累量信噪比估计 算法	247	10.8.2	Capon 波束形成器	280
参考文献	248	10.8.3	自适应波束形成算法	281	
第 9 章 软件无线电的数字信号处理硬 件平台	250	10.9	波达方向估计	290	
9.1	DSP 简介	250	10.9.1	传统 DOA 估计的发展	290
9.1.1	DSP 的结构	250	10.9.2	高阶统计量 DOA 的发展	291
			10.9.3	循环统计量 DOA 估计的发展	291
			10.9.4	MUSIC 方法	291
			10.9.5	求根 MUSIC 方法	293
			10.9.6	ESPRIT 方法	293
			10.9.7	高阶累积量方法	294
			参考文献	296	

第 1 章 软件无线电概述

1.1 软件无线电的概念

软件无线电思想是 20 世纪 90 年代以后逐渐兴起的一种全新的设计思想，其完整的概念和结构体系是由 MITRE 公司的美国科学家 Joseph Mitola 于 1992 年 5 月在 NTC (National Telesystems Conference) 上明确提出，其核心是在通用的通信硬件平台上加载不同的通信软件，以实现不同的通信方式间的转换。这种全新的设计思想使通信中的无线电台可以适应各种不同的通信方式，软件无线电台良好的兼容性和可编程性使得通信系统的开发主要成为 DSP (数字信号处理) 软件的研究。这将极大地缩短通信系统开发的时间和成本，可以说未来采用软件无线电技术的软件无线电台在通信系统中的作用完全可以同通用 PC (个人电脑) 在计算机领域所起的作用相提并论。

软件无线电技术的出现是电子设计领域中的一次巨大飞跃，将会给电子技术带来深刻变革。软件无线电台的实现采用了全数字技术，但其与第 2 代全数字接收机有着根本的不同。这种技术采用了通用的 DSP 硬件平台，具有完全的可编程性。这与全数字接收机专用的硬件芯片结构完全不同，是电子技术领域继模拟与数字技术之后第 3 次重大的飞跃，必将在未来对电子技术的发展及设计思想的变革产生深远的影响，并且在军用和民用两个方面都将有着广泛的应用。

软件无线电技术的基本思想是将宽带的 A/D 转换器尽可能地靠近射频天线，即尽可能早地将接收到的模拟信号转化为数字信号，在最大程度上通过 DSP 软件来实现通信系统的各种功能，其基本的结构框图如图 1-1 所示。

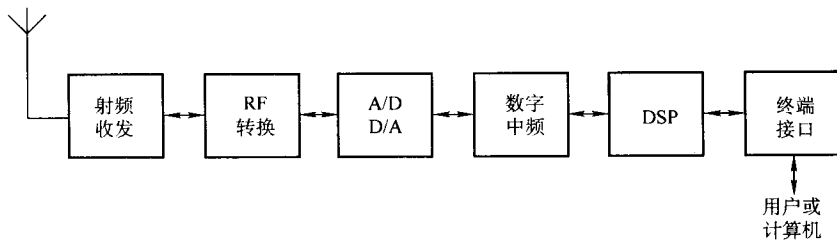


图 1-1 软件无线电系统结构框图

显然，理想的软件无线电台是对天线接收的模拟信号经过放大后直接采样，实现完全的可编程性，其后所有的信号处理，包括下变频混频、带通滤波、载波提取、IQ (同相与正交) 解调、低通滤波、位同步提取、信道编码、信源编码、加密等，全部由 A/D 转换器之后的 DSP 芯片处理。可见理想的软件无线电台可实现完全的可编程性，因此可以实现通信中的各种调制方式，完全可以根据要求实现 FDMA (频分多址接入)、TDMA (时分多址接入) 和 CDMA (码分多址接入) 等各种多址方式。

目前软件无线电接收的发展主要还受到硬件发展水平的限制,其主要的技术中涉及以下几项核心技术:宽带天线技术、宽带 A/D 技术、高速 DSP 技术以及高性能的互连结构等。

1. 宽带智能天线

软件无线电台工作在较宽的频率范围(2MHz~2GHz)内,所配备的天线也必须能够覆盖整个频段。只有宽带智能天线才能完成此功能,它既有宽的频率范围,又具有能自动感知干扰源的存在并抑制其影响的能力,还具有自动增强所需信号的能力,并可兼容各种无线电通信制式。它是在自适应天线基础上发展起来的新型无线系统,其核心技术主要是智能化接收和智能化发射。

2. 高速宽带 A/D 和 D/A 转换

数字化是软件无线电的基础,模拟信号必须经过采样才能转化为数字信号,以及用软件来处理。然而这些功能均是由 A/D 和 D/A 转换器来实现的。A/D 和 D/A 转换器在软件无线电中的位置非常关键,直接反映了软件无线电台软件化的程度。因此,理想的软件无线电应该直接在 RF(射频)上进行采样。但在目前,这样的器件还很难达到要求。只能通过一定时间和技术的发展,逐步提高 A/D 转换器件的性能,使其位置越来越接近天线,才能最终实现软件无线电的理想目标。

3. 高速 DSP

高速 DSP 是软件无线电台的核心部分,包括了变频、滤波、成形等一系列操作。对于每一个采样点至少要进行 100 次操作。一个 10MHz 的信号,当以 25MHz 进行采样后,至少需要 2500MIPS(百万条指令/秒)的处理速度,这是单片 DSP 难以完成的,工程上一般采用多片高速 DSP 并行的方法实现信号的处理。

4. 高性能互连

为了实现一个开放的、可扩展的软件无线电平台,必须打破传统通信平台的流水线结构。因此,要求采用一种全新的交换互连结构来实现各个功能模块之间的互连。

基于软件无线电技术的软件无线电台可以实现目前广泛应用的公用电话交换网(PSTN)、GSM 移动通信系统和未来的第 3 代移动通信系统(3G)的所有应用协议,为实现各种通信系统的相互兼容提供了一种理想的方法。在军事通信领域,由于软件无线电台所具有的完全可编程性,对于未来多军种协同作战的整体指挥和相互通信具有传统通信方式不可比拟的优势。

1.2 软件无线电技术的发展概况

1.2.1 目前国际上软件无线电技术的研究水平

软件无线电技术目前在全世界范围内才刚刚起步,其最终的公认标准体制尚未形成,世界各国正对此技术进行积极的研究,国外的研究主要沿着实现和前瞻两个方向展开。

20 世纪 90 年代初期,美国军方开始的 Speakeasy 军用软件无线电台系统是国际上软件无线电技术成功实现的典型代表。此系统在当时技术允许的条件下,采用了可行的方法对理想的软件无线电结构进行了适当的调整,实现了多频段多模式无线电(MBMMR)电台。它能同时处理 4 种不同的调整方式(从 AM 到 QAM),能够兼容美军 15 种以上电台。此系统

大部分功能均由软件实现，具有可编程性，取得了很好的效果。

美国 MIT（麻省理工学院）计算机实验室的 Spectrum Ware 项目是目前国际上软件无线电技术前瞻研究的代表，Spectrum Ware 提供了无线通信和分布式信号处理的、以软件为核心的研究方法。处理器和 A/D 技术的发展是“虚拟”无线电实现的基础。所谓“虚拟”无线电，是指直接从 RF 频段进行下变频和宽带采样，并把采样数据用软件进行处理。Spectrum Ware 系统从通用计算机体系网络角度出发，实现软件无线电的功能，与 DSP 芯片相比，虽然这在短期内难以实用化，但是这种研究的方法更接近软件无线电技术的理想，具有非常深远的意义。

由于软件无线电技术近几年来迅速发展，许多通信公司都认识到这种技术本身广泛的应用前景，并且开发出了一系列的具有实用价值的软件无线电产品。美国 Spectrum 和 Blue Wave 等公司开发的、基于 TI（德州仪器）公司通用 DSP 芯片和 Harris 公司 DDC（双下变频器）芯片的软件无线电板级产品已经比较成熟。Spectrum 公司板级产品采用了 8 片 TMS320C6201 型 DSP 芯片和 30 片 DDC 芯片，可以同时处理多达 30 路的 FDMA 信号。Blue Wave 公司的板级产品采用了 1 片 C6701 型 DSP 芯片和 1 片 DDC 芯片以及 1 片 DUC（双上变频器）芯片，可以实现 1 路 10MHz 带宽信号的全双工通信。这些板级产品都具有良好的可扩展性，可以根据用户的不同要求对产品配置进行更改。

1.2.2 通用及专用 DSP 芯片的发展现状

通用及专用 DSP 芯片是软件无线电技术发展的基础和前提，因此其发展水平很大程度上决定了软件无线电技术的发展水平。

通用 DSP 具有极好的灵活性，是软件无线电技术中不可或缺的部分。世界上第 1 个单片 DSP 芯片是 1978 年问世的。目前国际上最成功的 DSP 芯片生产商当数美国德州仪器（Texas Instruments, TI）公司和美国模拟器件（Analog Devices, AD）公司。TI 公司是世界上最大的 DSP 芯片供应商，其 DSP 市场份额占全世界份额近 50%。

通用 DSP 芯片可以按照下列两种方式进行分类：

1. 按数据格式分

这是根据 DSP 芯片工作的数据格式来分类的：数据以定点格式工作的 DSP 芯片称为定点 DSP 芯片，以浮点格式工作的称为浮点 DSP 芯片。

不同浮点 DSP 芯片所采用的浮点格式不完全一样：有的 DSP 芯片采用自定义的浮点格式，如 TMS320C3X；而有的 DSP 芯片则采用 IEEE（美国电气电子工程师学会）的标准浮点格式，如 Motorola 公司的 MC96002 等。

2. 按应用环境分

这是根据 DSP 芯片应用的场合来分类的：应用于通用目的的 DSP 芯片称为通用 DSP 芯片，应用于专门目的的 DSP 芯片称为专用 DSP 芯片。通用 DSP 芯片可以完成各种处理和和控制功能，具有完全的通用性。专用 DSP 芯片是为特定的 DSP 运算而设计的，更适合特殊的运算，如数字滤波、卷积和 FFT（快速傅里叶变换）。

1.2.3 软件无线电技术在 3G 及 4G 中的应用

当前，蜂窝移动通信系统已经发展到第 3 代。3G 系统进入商业运行，一方面需要解决

不同标准的系统间的兼容性；另一方面为了适应技术的飞速发展，3G 无线通信系统要求具有高度的灵活性和扩展升级能力。软件无线电技术无疑是最好的解决方案。作为 3G 移动通信三大主要标准中的两个，WCDMA（宽带码分多址接入）和 CDMA2000 都采用码分多址接入方式，且具有信道带宽宽、数据速率多样且支持高速率、不同业务采用信道编码不同等共同特性；同时，这两种标准之间在码片速率、信道带宽和信道选择码等方面也存在差异。为了解决这些问题并提高系统容量，在 3G 中将采用的智能天线（Smart Antenna）技术、多用户检测（MUD）技术等，将使得软件无线电技术在 3G 系统中有着广泛的应用空间。

首先，智能天线技术在我国 TD-SCDMA（时分同步码分多址接入）的方案中，利用数字信号处理技术识别用户信号到达方向，形成天线主波束；引入空分多址（SDMA）方式，根据用户信号不同的空间传播方向，提供不同的空间信道；采用数字方法对阵元接收信号进行加权处理，形成多个波束赋形，每一个波瓣对应于一个特别的手机用户（波束也可以动态追踪用户，使主波束对准用户信号方向，在干扰信号方向上，形成天线方向图零陷或功率增益较低，从而达到抑制干扰的目的）。

其次，在欧洲共同体的 ACTS（先进通信技术与服务计划）FIRST 项目中，软件无线电技术也用到了设计多频/多模可编程手机中。它可以自动检测接收信号，接入不同的网络，而且能满足不同的接续时间要求。软件无线电技术可用不同软件实现不同无线电设备的各种功能，可任意改变信道接入方式或调制方式。利用不同软件即可适应不同标准，构成多模手机和多功能基站，具有高度的灵活性。

除此之外，软件无线电出现了一些新的发展趋势，主要表现在体系结构分层化、软件模块化、结构数学分析化、面向对象化、计算机化、网络化和安全化等方面。

随着 3G 技术不断成熟并最终进入市场进行运营，国际电信联盟（ITU）已经开始研究制定第 4 代移动通信标准，并已达成共识：把移动通信系统同其他系统（例如无限局域网等）结合起来，产生 4G 技术，2010 年之前使数据传输速率达到 100Mbit/s，以提供更有效的多种业务，最终实现商业无线网络、局域网、蓝牙、广播、电视卫星通信的无缝衔接并相互兼容。

4G 的关键技术主要有：OFDM（正交频分复用）、软件无线电、智能天线和 IPv6 技术。在 4G 众多关键技术之中，软件无线电技术是通向未来 4G 的桥梁。由于各种技术的交叠有利于减少开发的风险，所以未来的 4G 技术需要适应不同种类产品的要求。而软件无线电技术则是适应产品多样性的基础，它不仅能减少开发风险，还更易于开发系列产品。此外，它还减少了硅芯片的容量，从而降低了运算器件的价格，其开放的结构也允许多方运营的介入；同时，由于 DSP 的使用，也弥补了廉价 RF 所造成的不足。在实际应用中，RF 部分是昂贵而缺乏灵活性的，宽带的 RF 是非线性的，而通过使用 SDR（软件无线电）技术可弥补其在灵活性上的不足。

在网络支持方面，由于 4G 通信系统选择了基于 IP 的全分组的方式传送数据流，因此 IPv6 技术将成为下一代网络的核心协议。而大量链路类型的不同链接可通过 SDR 进行互连。同时，动态频谱的分配也有利于在已占用带宽上实现新的服务。

智能天线技术也是 4G 中的关键，它与 SDR 技术同样紧密相连。它是在软件无线电基础上提出的天线设计新概念，是数字多波束形成（DBF）技术与软件无线电完美结合的产物。

一方面，软件无线电为智能天线的实现提供了一条有效可行的技术途径；另一方面，智能天线也为软件无线电的发展起到了推动作用。它们相互渗透、相互促进。基于软件无线电的智能天线主要包括单信道智能天线，即通过天线阵感应的射频信号，首先经过前端模拟预处理变换为适合于 A/D 采样的宽带中频信号。该宽带中频信号经 A/D 数字化后送到数字下变频器 (DDC)，对宽带数字中频内某一感兴趣的信号进行数字正交下变频和采样率变换，变换为与信号带宽相适应的低采样率的基带正交 (I/Q) 数字信号。这 N 路 I/Q 基带数据被同时送到 M 个数字波束形成器 (DBF)，分别进行不同指向的波束形成运算，最终获得所需的 M 个波束。信息解调 (DEMOD) 模块要么对所形成的这 M 个波束同时进行解调，要么选取其中信噪比最大的波束进行解调。前者可以实现同频空分复用；后者则可以实现定向接收，改善输出信噪比。其次多信道智能天线与单信道智能天线相比，只是在 A/D 数字化后设置多个单信道多波束形成器 (SCMBF)。此外还包括多相滤波信道化智能天线，它的最大特点是能够实现频域和空域上的全波束形成。

1.3 理想的软件无线电及其限制的解决思路

理想的软件无线电的定义是：软件无线电台是用软件定义波段、调制方式、信号波形的电台，信号波形由数字信号采样产生，用宽带的数/模转换器转换成模拟信号，可能还要由中频上变频到射频。类似地，接收机使用宽带的模/数转换器获得该软件无线电台节点所有波段的信号。接收机用通用处理器上的软件完成信号的提取、下变频和解调。

软件无线电技术的核心思想是将宽带的 A/D 转换器尽可能地靠近射频天线，即尽可能早地将接收到的模拟信号转化为数字信号，最大程度地通过 DSP 软件来实现通信系统的各种功能。

限制理想软件无线电实现的主要瓶颈有 3 个：

- 1) 天线带宽：2 ~ 2000MHz，覆盖多个 10 倍频程，目前无法实现；
- 2) 总线数据速率要大于 5Gbit/s (根据 Nyquist 定律， $f_s > 2.5f_H$)；
- 3) 数字处理部分的处理能力。

软件无线电技术的研究沿着两个思路进行：一个思路是在现有的硬件水平上，通过将 A/D 与天线之间增加模拟环节、应用并行处理技术、改进算法等，使软件无线电技术应用到实际中，比如 Speakeasy、JTRS、3G 等系统；另一个思路是通过多个 PC 或工作站实现对理想软件无线电技术的模拟 (虚拟无线电)，虽然不能立即投入实用，但为将来的软件无线电技术研究提供理论指导，比如 MIT 的 Spectrum Ware。

1. Speakeasy 系统

20 世纪 90 年代初期，美国军方开始的“易通话” (Speakeasy) 系统是国际上软件无线电技术成功实现的典型代表。此系统大部分功能均由软件实现，具有可编程性，取得了很好的效果。“易通话”第 1 阶段 (1991 ~ 1994 年) MBMMR 主要参数：工作频率为 4 ~ 400MHz；处理器为 TI 公司的 TMS320C40 浮点 DSP，处理速度为每秒 10 亿条整型指令，200 万条浮点指令；基于双总线结构——VME 总线和高速数据总线。“易通话”第 2 阶段 (1995 ~ 1997 年) MBMMR 主要参数：工作频率为 4 ~ 400MHz；处理器为奔腾膝上机，Windows 95 操作系统；基于 PCI 总线和 ISA 总线结构。

2. MIT 的 Spectrum Ware

美国麻省理工学院 (MIT) 的计算机科学实验室的 Spectrum Ware 项目从通用计算机体系结构实现软件无线电的角度出发, 引入了更多的软件成分, 提出并试图实现“虚拟”无线电。Spectrum Ware 并不是用软件无线电来实现一个实用的系统, 而是构造一个实验平台, 针对软件无线电中的一些问题, 研究解决的方法, 并实现一些简单的实验系统以验证。

他们的一些思路相对于目前的技术水平是超前的, 短时间内难以实用化。从另一个角度来看, 他们的方法可能更接近于理想的软件无线电, 具有深远的意义。通用机在许多方面与 DSP 系统不同, 最重要的区别在于它不是一个实时的同步系统, 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、计算机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, 却都大大超过 DSP 系统, 目前也开始将 DSP 的一些功能和特点融于通用 CPU 中 (类似于引入浮点协处理)。因此, 从通用机 (或通用机与 DSP 相结合) 实现软件无线电的角度研究软件无线电是很有意义的。

Spectrum Ware 主要研究了以下问题:

(1) 时间解耦 (Temporally Decoupling) 对采样序列做逐样点运算, 并保持严格同步是很困难的, 特别是当采样率很高时。而且, 这种处理方法对于通用机来说效率是很低的。Spectrum Ware 采用的时间解耦方法, 将采样数据粒化, 即利用大容量的多级高速缓存将数据分块 (每块可能包含多达几百千字节的数据), 然后对分块数据做集中处理, 只在输入、输出两端保持同步, 其中的关键是运算能力的动态调整分配和大容量缓存的使用。在软件无线电中, 接收信号的采样率虽然很高 (常大于几十 MSPS), 但实际的语音或数据信号速率一般不超过几十 Kbit/s, 加上对处理延迟的要求不是非常严格, 所以在整个处理过程中都保持同步是不必要的, 利用缓存保持输入与输出的大致同步也就可以了, 而且数据成块处理的效率高, 还可充分利用信号的统计特性。

(2) 并行处理 虽然某些 DSP (如 TI 公司的 TMS320 C40、INMOS 公司的 Transputer 系列) 具有一定的并行处理能力, 但相对于通用机结构还是很弱的, 特别是在并行处理软件上, 且大部分 DSP 不具备这一能力。根据现在的硬件工艺水平, 同时考虑到通信信号处理的特点, 利用并行计算机提高处理能力是非常必要的。

(3) 对编码调制方法的研究分为 3 部分 传统方法的实现; 传统方法中新的适合于软件无线电实现的算法研究; 新的编码调制方法的研究。一方面充分利用软件无线电带来的好处, 另一方面也使软件无线电更容易实现。他们在讨论 A/D 转换器时, 特别提到目前低分辨率的 ADC 采样率非常高, 且提高的趋势明显, 认为应考虑研究适合于低分辨率和高采样率的编码调制方案。

(4) Spectrum Ware 的信号处理是在工作站上实现的, 几个实现的实验系统带宽都不高, 实现的功能也较简单。一般认为由通用机结构实现软件无线电在目前还很困难, 即使是实现的简单系统, 代价却很高, 但这方面的研究是非常必要的。软件无线电的实现还有很大的局限性, 适用条件也较严格。首先, 宽带天线/RF、高速 A/D 及 D/A 转换和多个高速的 DSP/CPU 使得软件无线电系统的造价过高, 简单的应用 (如单用户单模式的电台) 在目前是不值得的, 实际能完成的复杂应用很大程度上受当前硬件水平的限制, 实际处理带宽不超过几十兆赫。

第 2 章 软件无线电的体系结构

2.1 体系结构简介

软件无线电体系结构的定义为：功能、组件及设计规则的一个综合的、统一的集合（其三要素为功能、组件及设计规则）。由于包括了功能以及设计规则，所以体系结构支持部件的重用，甚至可以跨越实现硬件及软件之间的移植。软件无线电和传统无线电在体系结构方面具有显著的不同：传统无线电的设计，是基于用硬件搭建的模块来实现通信功能的硬件体系结构；软件无线电则是采用基于硬件平台和软件分层的软件无线电结构，它是通过管理与分配软件和硬件资源来实现通信功能的全新体系结构。

软件无线电关键技术包括：射频天线设计、模数（A/D）转换器设计、射频（RF）前端设计、数据管理程序、资源分配等。其具体表现为：

1) 与传统的无线电相比，软件无线电技术中的智能天线技术成为新的技术亮点。软件无线电系统中采用了智能天线技术，用数字的方法实现波束成形和波达方向估计，这使得软件无线电的天线系统比传统无线电的天线系统有了无可比拟的优势。在软件方面，主要通过自适应算法修改权重系数，达到适应空间和时间参数变化的目的。由于采用智能天线技术，软件无线电系统才真正达到了设计的初衷，不用改动任何硬件，只改变软件算法就可以适应不同的需求。

2) 对于移动性要求很高的系统，由于体积和功率的限制，射频部分和 ADC 的设计是整个设计的关键部分。目前的硬件水平还很难满足理想软件无线电模型的射频直接采样技术的要求，因此射频前端的模拟低噪声放大器、模拟下变频等都还需要保留，这给软件无线电在移动终端中的应用带来了很大的技术挑战。最近有些研究机构将超导模数转换技术用于 ADC 中，其射频频率可达 10 ~ 100GHz，有望实现射频数字化。

3) 软件无线电可以被看成一个统一的有机整体，需要各个模块的紧密配合才能完成高速率的数据处理，因此高水平的数据管理程序是必不可少的。资源分配还与数据流特性有关，必须以最小时延和开销对数据进行处理。

软件无线电技术复杂，功能强大，要成功地将软件无线电技术应用于实际中，进行必要的结构级分析是必要的。然而当前，众多提出的软件无线电结构都缺乏通用的设计方法，许多实际设备只能适用于某些特定系统。因此对软件无线电的体系结构需求非常大，要使软件无线电系统能够真正达到理想软件无线电系统的通用性，必须对软件无线电体系结构进行必要的研究，目前世界各国都已经有了新的进展。

软件无线电技术在第三代移动通信系统中得到了广泛的应用，美国正在研究第三代移动通信系统中的各种软件无线电的关键技术，同时还注意到软件无线电技术与计算机技术的融合，为第三代移动通信系统提供友好的用户界面，使软件无线电技术在第三代移动通信系统中发挥关键作用，如麻省理工学院的 Spectrum Ware 计划。