

移动通信前沿技术丛书

软件无线电 原理与应用

杨小牛 楼才义 徐建良 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

移动通信前沿技术丛书

软件无线电原理与应用

杨小牛 楼才义 徐建良 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

软件无线电是最近几年在无线通信领域提出的一种新的通信系统体系结构,它的基本思想是以开放性、可扩展、结构最简的硬件为通用平台,把尽可能多的通信功能用可升级、可替换的软件来实现。本书专门介绍软件无线电基本概念、基本理论,软件无线电数学模型,软、硬件平台与算法的工程实现,以及软件无线电在军、民电子领域中的应用。本书内容全面,通俗易懂,实用性、可读性强。

本书可供从事通信、个人移动通信、电子战、雷达、信号处理以及其他电子系统专业的工程技术人员作继续教育进修教材,也可用作高等院校相关专业高年级本科生或研究生的学习参考书。

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,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

软件无线电原理与应用/杨小牛等著. - 北京:电子工业出版社,2001.1
(移动通信前沿技术丛书)

ISBN 7-5053-6337-9

I. 软… II. 杨… III. 计算机通信;无线电通信-技术 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 57264 号

丛 书 名:移动通信前沿技术丛书

书 名:软件无线电原理与应用

著 者:杨小牛 楼才义 徐建良

责任编辑:竺南直

特约编辑:詹晓耕

排版制作:电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:河北省涿州桃园装订厂

出版发行:电子工业出版社 URL:<http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:17 字数:435.2 千字

版 次:2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5053-6337-9
TN·1416

印 数:5 000 册 定价:29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换;
若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

721565

出版说明

移动通信是当前发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一,有专家预测到 2003 年全球移动用户数将达到 10 亿。移动通信的最终目标是实现任何人可以在任何地点、任何时间与其他任何人进行任何方式的通信。移动通信技术现在已经发展到了以 WCDMA 为代表的第三代,而相互兼容各种移动通信技术的第四代标准目前已经悄然来临。为了促进和推动我国移动通信产业的发展,并不断满足社会各界和广大通信技术人员系统学习和掌握移动通信前沿技术的需求,电子工业出版社特约请国内从事移动通信科研、教学、工程、管理等工作并具有丰富的理论和实践经验的专家、教授亲自编著或翻译国外金典著作组成了这套《移动通信前沿技术丛书》,于新世纪之初相继地推出。

该丛书从我国移动通信技术应用现状与发展情况出发,以系统与
技术为中心,全面系统地介绍了当今移动通信领域涉及的有关关键技术
热点技术,如软件无线电原理与应用、智能天线原理与应用、蓝牙技
术、移动 IP、通用无线分组业务(GPRS)、移动通信网络网络规划与优
化、移动数据通信以及典型的第三代移动通信系统等内容。其特点是
力求内容的先进性、实用性和系统性;突出理论性与工程实践性紧密结
合;内容组织循序渐进、深入浅出,理论叙述概念清晰、层次清楚,经典
实例源于实践。丛书旨在引导读者将移动通信的原理、技术与应用有
机结合。

这套丛书的主要读者对象是广大从事通信技术工作的工程技术人员,也适合高等院校通信、计算机等学科各专业在校师生和刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书过程中,参与编著、翻译和审定的各位专家都付出了大量心血,对此,我们表示衷心感谢。欢迎广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议,或推荐其他好的选题(Email:david.zhu@phei.com.cn),以便我们今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术图书。

电子工业出版社

2001年1月

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Jeo Mitola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。这样,用户在同一硬件平台上可以通过选购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。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,适时地适应市场变化,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须的一些基础理论,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作深入的研究。

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 软件无线电概念的由来	(1)
1.2 软件无线电的发展概况	(2)
1.3 软件无线电的基本结构	(5)
第 2 章 软件无线电理论基础	(8)
2.1 信号采样理论	(8)
2.1.1 基本采样理论——Nyquist 采样定理	(8)
2.1.2 带通信号采样理论	(11)
2.2 软件无线电中的采样理论	(14)
2.2.1 窄带中频采样数字化	(14)
2.2.2 宽带中频采样数字化	(15)
2.2.3 射频直接带通采样原理	(16)
2.3 软件无线电的理论基础——多速率信号处理	(21)
2.3.1 整数倍抽取	(21)
2.3.2 整数倍内插	(24)
2.3.3 取样率的分数倍变换	(26)
2.3.4 取样率变换性质	(26)
2.3.5 抽取内插器的实时处理结构——多相滤波结构	(28)
2.3.6 取样率变换的多级实现	(30)
2.3.7 带通信号的取样率变换	(31)
2.4 软件无线电中的高效数字滤波	(36)
2.4.1 数字滤波器设计的理论基础	(36)
2.4.2 适合于 $D = 2^M$ 倍抽取或内插的半带滤波器	(41)
2.4.3 积分梳状(CIC)滤波器	(43)
2.5 软件无线电中的数字信号正交变换理论	(48)
2.5.1 窄带信号的正交分解与模拟域实现	(50)
2.5.2 数字混频正交变换	(53)
2.5.3 基于多相滤波的数字正交变换	(53)
第 3 章 软件无线电数学模型	(57)
3.1 软件无线电的三种结构形式	(57)
3.1.1 射频全宽开低通采样软件无线电结构	(57)
3.1.2 射频直接带通采样软件无线电结构	(58)
3.1.3 宽带中频带通采样软件无线电结构	(60)
3.1.4 三种软件无线电结构的等效数字谱	(61)
3.2 软件无线电接收机数学模型	(63)
3.2.1 单通道软件无线电接收机数学模型	(64)
3.2.2 并行多通道接收机数学模型	(68)

3.3	多相滤波器组信道化接收机数学模型	(68)
3.3.1	数字滤波器组与信道化基本概念	(69)
3.3.2	复信号的多相滤波器组信道化接收机数学模型	(72)
3.3.3	实信号的多相滤波器组信道化接收机数学模型	(73)
3.4	软件无线电发射机数学模型	(74)
3.4.1	单通道软件无线电发射机数学模型	(75)
3.4.2	多通道软件无线电发射机数学模型	(78)
3.5	信道化软件无线电发射机数学模型	(79)
3.5.1	发射机信道化的基本概念	(79)
3.5.2	信道化发射机复信号数学模型	(80)
3.5.3	信道化发射机实信号数学模型	(83)
第4章	软件无线电的硬件实现	(88)
4.1	软件无线电前端电路	(88)
4.1.1	软件无线电接收部分前端电路的结构	(88)
4.1.2	接收部分性能分析	(95)
4.1.3	软件无线电发射部分的硬件电路	(98)
4.2	软件无线电中的 A/D/A 技术	(100)
4.2.1	A/D 转换器原理	(100)
4.2.2	A/D 转换器的性能指标	(103)
4.2.3	A/D 转换器的选择	(109)
4.2.4	数据采集模块的设计	(115)
4.2.5	D/A 转换器的基本原理	(118)
4.3	软件无线电中的数字下/上变频器	(122)
4.3.1	软件无线电中的数字下变频器	(122)
4.3.2	软件无线电中的数字上变频器	(138)
4.4	高速数字信号处理器	(147)
4.4.1	概述	(147)
4.4.2	几种典型 DSP 器件介绍	(149)
4.4.3	DSP 器件软件编程	(161)
4.4.4	DSP 器件在软件无线电中的应用举例	(162)
4.4.5	高速 DSP 系统设计应注意的几个问题	(166)
4.5	一个实际的软件无线电试验平台	(167)
4.5.1	软件无线电试验平台接收机方案设计	(167)
4.5.2	软件无线电试验平台接收机的具体实现	(170)
4.5.3	发射部分硬件设计	(172)
4.5.4	软件无线电试验平台性能测试	(173)
第5章	软件无线电中的信号处理算法	(179)
5.1	软件无线电中的调制算法	(179)
5.1.1	信号调制通用模型	(179)
5.1.2	模拟信号调制算法	(180)
5.1.3	数字信号调制算法	(183)
5.2	软件无线电解调算法	(189)
5.2.1	信号解调通用模型	(189)

5.2.2	模拟调制信号解调算法	(190)
5.2.3	数字调制信号的解调算法	(193)
5.3	软件无线电中的同步技术	(197)
5.3.1	载波同步	(197)
5.3.2	位同步(定时提取)	(199)
5.3.3	帧同步	(200)
5.3.4	载波相位和定时相位联合估计的最大似然算法	(200)
5.4	信号调制样式自动识别	(201)
5.4.1	模拟调制信号的自动识别	(201)
5.4.2	数字调制信号的自动识别	(204)
5.4.3	模拟数字调制信号的联合自动识别	(205)
5.4.4	信号调制样式自动识别中应注意的几个问题	(206)
5.4.5	基于人工神经网络的调制识别	(210)
第6章	基于软件无线电的智能天线	(213)
6.1	智能天线的基本概念	(213)
6.1.1	智能天线基本原理——线阵波束形成	(214)
6.1.2	圆形阵的多波束形成	(216)
6.1.3	多波束形成天线的实现方法	(217)
6.2	基于软件无线电的智能天线组成结构	(219)
6.2.1	单信道智能天线结构	(219)
6.2.2	多信道智能天线的组成	(220)
6.2.3	多相滤波信道化智能天线?	(221)
6.3	智能天线基本算法	(221)
6.3.1	Capon 波束形成算法	(222)
6.3.2	空间零点预处理波束合成	(223)
第7章	软件无线电在电子系统中的应用	(227)
7.1	软件无线电在个人移动通信中的应用	(227)
7.1.1	软件无线电基站接收分系统	(228)
7.1.2	软件无线电基站发射分系统	(233)
7.1.3	软件无线电基站的技术挑战	(236)
7.1.4	软件无线电手持终端(移动手机)	(238)
7.2	软件无线电在军事通信中的应用	(240)
7.2.1	软件无线电的先驱——MBMMR 电台	(241)
7.2.2	联合战术无线电系统(JTRS)	(242)
7.3	软件无线电在电子战中的应用	(245)
7.3.1	软件化电子战侦察接收机	(245)
7.3.2	基于多相滤波的软件信道化接收机	(249)
7.3.3	软件化通信电子战干扰发射机	(251)
7.3.4	新一代阵列处理软件化电子侦察系统	(252)
7.4	软件无线电在雷达和信息家电中的应用	(255)
7.4.1	软件无线电在雷达中的应用——“软件雷达”	(255)
7.4.2	软件无线电在数字电视系统中的应用——信息化家电	(257)
参考文献	(260)

第 1 章 概 述

1.1 软件无线电概念的由来

无线通信在现代通信中占据着极其重要的位置,被广泛应用于商业、气象、军事、民用等领域。当代无线通信系统很多,例如,卫星通信系统、蜂窝移动通信系统、无线寻呼系统、短波通信系统、微波通信系统,等等。各种无线通信系统的调制方式也很多,有 AM、FM、LSB、USB、ISB、FSK、PSK、MSK、GMSK、QAM,等等。其多址方式有:时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)和码分多址(CDMA)等。各种通信系统由于自身的特点而应用于不同场合。短波电台适合远距离传输,其所需的发射功率不大,传输的“中继系统”——电离层不会被摧毁;卫星通信能传播高质量的信息,所能提供的频带很宽;微波通信抗干扰能力强,适合大量的数据传输,但只能在点与点之间传输。由于无线通信具有设备简单、便于携带、易于操作、架设方便等特点,在军事通信领域是不可或缺的重要通信手段。然而,军用电台往往是根据某种特定的用途而设计的,功能单一,有些电台的基本结构相似,而信号特征差异很大。例如,工作的频段不同,有的在 HF 频段,有的在 VHF、UHF 频段,调制方式不同,波形结构不同,通信协议不同,数字信息的编码方式、加密方式不同,等等。电台之间的这些差异极大地限制了不同电台之间的互连互通。而且,由于不同频段的电台只能满足某些特定的要求,无法满足部队各种各样的军事需求,给协同作战带来了困难。

经过几十年的发展,无线通信有了长足的进步。通信系统由模拟体制不断向数字化体制过渡,出现了许多中频数字化接收机。例如,德国 R/S 公司研制的宽带数字化接收机 EBD 900,主要用于无线电监视,其工作频率范围为 20 MHz~2 GHz,搜索速度为 4 GHz/s(25 kHz 带宽),动态范围为 80 dB。又如,英国研制的 PVS 3800 接收机,工作频率范围为 0.5 MHz~1 GHz,是一种用于电子战环境中的宽带无线电通信监测接收机,可以实现搜索、监听、分析识别等功能;还可以根据需要,通过加载不同的软件,灵活地配置成各种不同功能的接收机,如 PV 3830 截获接收机,PV 3840 分析接收机,PV 3850 监视接收机,等等。这些接收机尽管能够覆盖多个频段,但它们只能工作于单一的频段和模式,功能相对较少,灵活性不够,可扩展能力也较差,不同电台之间仍不能完全互通,无法完全满足现代军事通信的需要。

在格林纳达冲突中,美军各种通信设备的不兼容性暴露无遗。在“沙漠风暴”行动中,由于盟军联合作战,需要及时有效的通信联络,这大大增强了通信保障的复杂程度,不得不借助许多额外的无线电台,才得以保证高效的通信联络。

在民用通信中也存在互通性差的问题。在欧洲(主要是北欧、西欧)的第一代模拟网发展过程中,基本上各自为政,加入欧洲邮电会议(CEPT)的 16 个国家,分别共使用 6 种不同的制式。这些模拟通信体系的制式、频率各不相同,不能互通、兼容。虽然这些国家领土不大,但车一出国门电话就不通了,给喜欢周末驾车到邻国旅游的人们带来极大的不便。在第二代数字移动通信中,仍有许多种不同的通信体制,如 GSM、AMPS、ETACS、PDC、DAMPS、CT2 等,这些体制互不兼容,无论给用户还是给经营者都带来了极大的不便。

为了解决互通性问题,各国军方进行了积极的探索,努力使不同设备既能满足互通的要求,又能满足抗干扰、保密性好的要求;既能使通信设备跟上无线电飞速发展的步伐,又能延长设备的使用寿命。其中一种设想是研制多频段、多功能电台,用一个系列的电台来代替其他所有电台。这种想法固然可以解决互通问题,然而开支庞大,而且其使用寿命也成问题,因为通信技术的发展是相当迅速的,过不了多久这些电台就会落伍。

1992年5月,MILTRE公司的Jeo Mitola首次明确提出了软件无线电(soft radio)的概念。其中心思想是:构造一个具有开放性、标准化、模块化的通用硬件平台,将各种功能,如工作频段、调制解调类型、数据格式、加密模式、通信协议等用软件来完成,并使宽带A/D和D/A转换器尽可能靠近天线,以研制出具有高度灵活性、开放性的新一代无线通信系统。可以说这种电台是可用软件控制和再定义的电台。选用不同软件模块就可以实现不同的功能,而且软件可以升级更新,其硬件也可以像计算机一样不断地升级换代。由于软件无线电的各种功能是用软件实现的,如果要实现新的业务或调制方式只要增加一个新的软件模块即可。同时,由于它能形成各种调制波形和通信协议,故还可以与旧体制的各种电台通信,大大延长了电台的使用周期,也节约了开支。有些人也把软件无线电称为“超级计算机”。

软件无线电的主要特点可以归纳如下:

(1)具有很强的灵活性 软件无线电可以通过增加软件模块,很容易增加新的功能。可以与其他任何电台进行通信,并可以作为其他电台的射频中继。可以通过无线加载来改变软件模块或更新软件。为了减少开支,可以根据所需功能的强弱,取舍选用的软件模块。

(2)具有较强的开放性 软件无线电由于采用了标准化、模块化的结构,其硬件可以随着器件和技术的发展而更新或扩展,软件也可以随需要而不断升级。软件无线电不仅能和新体制电台通信,还能与旧体制电台兼容。这样,既延长了旧体制电台的使用寿命,也保证了软件无线电本身有很长的生命周期。

软件无线电这一新概念一经提出,就得到了全世界无线电领域的广泛关注。由于软件无线电所具有的灵活性、开放性等特点,使其不仅在军、民无线通信中获得了应用,而且将在其他领域例如电子战、雷达、信息化家电等领域得到推广(详见第7章),这将极大促进软件无线电技术及其相关产业(集成电路)的迅速发展。

1.2 软件无线电的发展概况

软件无线电作为未来通信乃至未来无线电技术的发展方向,世界各国都在进行深入的研究,美国尤为突出。美国军方制定了具体的发展计划,来研制三军通用软件无线电台,即基于数字信号处理器、软件可编程、模块化、多频段、多模式,并具有波形重新配置能力的电台—Speakeasy(易通话)。这个研究工作分几个阶段实施。第一阶段已于1994年8月结束,并向美国政府代表作了汇报演示,目前正在进行第二阶段的研究工作。易通话电台工作频段为2MHz~2GHz,利用可编程处理技术,计划与15种在役或在研电台兼容,具备AM、FM、PM以及各种数字调制解调方式,含有许多无线电台特定的调制和专用的软件模块,还可以作为各种不同模式电台之间通信的中继转发电台。

易通话电台试图通过全数字、软件可编程、基带信号处理、多频段、小功率射频收发信机、大功率放大器和天线分系统来实现各种功能。该电台的硬件和软件均采用模块化、开放式的结构形式。模块之间通过容错、高速控制和数据总线互连,以提高灵活性和可靠性。每个模块的

物理接口或电器接口的技术规范都要符合开放性的标准。随着技术的进步,可以通过更新某些模块,使电台升级。易通话的信号处理流程如图 1.1 所示。

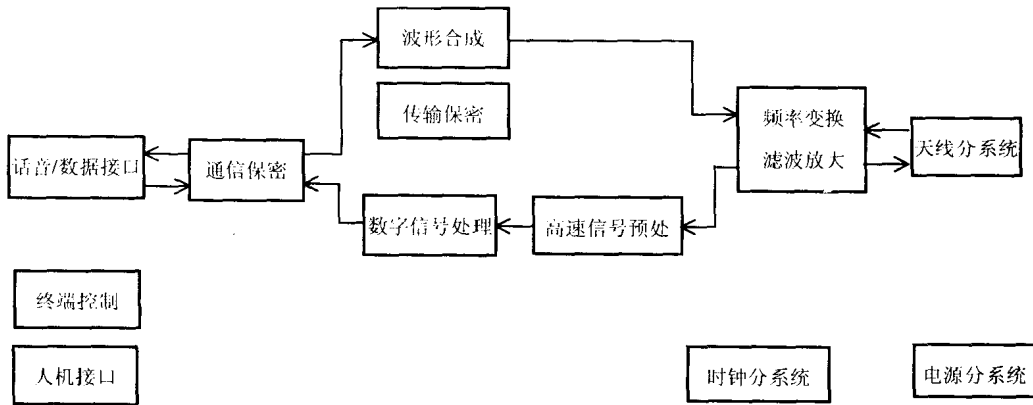


图 1.1 易通话电台信号处理流程

易通话电台第一期工程为高级开发模型,其硬件以 VME 总线为基础。通过总线进行指令、控制和低速数据流的传输。各模块之间的高速数据的交换是利用高速数据线来完成的。这些模块包括多处理器模块、波形产生模块、高频控制模块、基带转换模块、干扰抑制模块、加密模块、输入/输出模块等,如图 1.2 所示。在第一期工程中,采用了 TI 公司的 TMS320C40 处理器,利用多芯片模块(MCM)技术,把 4 片 TMS320C40 处理器和 5 MB 的存储器集成在一起,使得每个处理器可用 1 MB 的局部存储器、1 MB 的全局存储器。整个多处理器芯片的处理能力可达 200MFLOPS,而其功耗却不到 10 W。

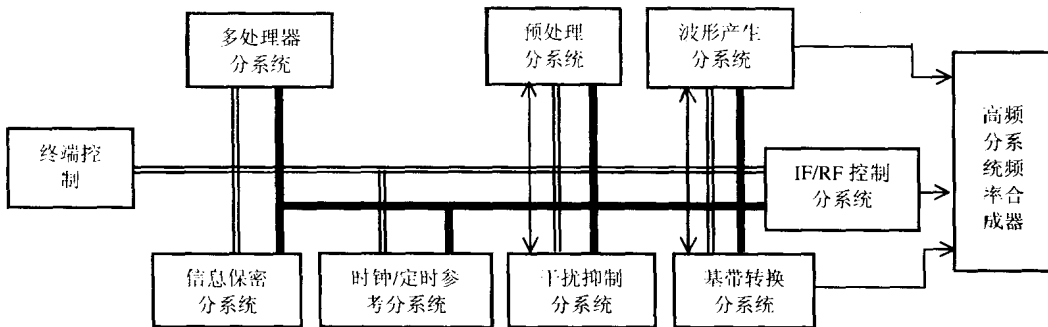


图 1.2 易通话第一期工程功能方框图

易通话采用软件编程来实现各种波形。在处理时间要求比较高的场合,为提高效率用汇编语言编写。在可编程 INFOSEC 模块中关键的密码,也采用符合美国国家安全局要求的汇编语言编写。用于易通话的普通窄带波形有:

- 调幅 跳频和常规方式下的双边带信号(调制信号频率为 50 Hz~20 kHz);
跳频和常规方式下的上、下边带信号(调制信号频率为 50 Hz~20 kHz);
常规方式下的振幅键控信号(ASK)、等幅报(CW)。
- 调频 普通调频信号(调制信号频率为 50 Hz~20 kHz);

移频键控(调制信号频率为 50 Hz~10 kHz);

最小相移键控(MSK);

连续相移频键控(CPSK)。

• 调相 普通多进制相移键控(相位数目 2~8 个);

跳频和常规方式下的差分、正交相移键控;

交错正交相移键控。

• 相位/幅度调制 4,16,64 和 256QAM(数据速率为 20 kb/s)。

数字调制时采用 Reed Solomen 码(16,7)和(31,15)及卷积码($k=7, R=1/2, T=122, 177$)进行检错和纠错。除了上述普通波形外,还有 HF 调制解调器(MIL-STD-188-110A)、HF 自动链路建立(MIL-STD-188-141A)、VHF 的跳频语音和数据通信(PACER BOUNCE)、UHF 频段的跳频语音和数据通信(HAVE QUICK I/II)等专用模块,这些模块已在第一期计划中实现。在第二期工程中准备扩充的专用波形有 L 波段的 GPS,UHF 频段卫星通信的时分多址、增强型 EPLRS、无线通信网接入(WNA)、VHF 频段的 SINCGARS、蜂窝电话等。

软件无线电在民用、商业等方面的应用也取得了很大的进展。例如已研制成功的 220 MHz 地震遥测系统,采用 16QAM 的调制方式,信道带宽为 20 kHz(数据速率达 60 kb/s),频带利用率为 3 b/(s·Hz)。利用此系统的灵活性,能使其中的任何一台无线电设备既可成为标准设备又可成为射频中继器。这样,如果有的设备所处的位置不好,就可用别的设备进行射频中继,把数据以实时方式转发回基地台。因此,利用这种设备不必专门设计中继设备,不但降低了成本,还提高了系统的灵活性。

美国 800/900 MHz 的专用移动无线电(SMR)系统为了实现 FCC 频谱规范,并和现有业务共存的要求,也采用了软件无线电技术。系统除采用目前的调频标准外,还采用了 16QAM,模拟语音和 FSK 等调制方式。它能与现有的和将来的系统兼容,并确保系统能平稳、低成本地过渡到新的大系统。欧洲还推出了 ACTS FIRST 计划,以研究探讨硬件开发的方法,把真正的软件无线电的灵活性用于新一代的 UMTS 系统(主要是手机)。

在移动通信方面,无论是第二代还是第三代移动通信,都有多种接口标准,给全球通信造成了一定的困难。如果采用软件无线电技术的基站和手机,通过选择不同的软件模块,就可以工作于不同的模式。美韩合资的 AIRCOM 公司于 1996 年 11 月在北京召开的国际通信展览会上展出了它的软件无线电基站。这种基站采用开放式的硬件和软件结构,减小了体积,增强了可扩展性。

总之,目前人们对软件无线电的研究日趋深入细致,理论上已基本成熟,正在进行各种应用的具体实践。人们已经提出了一些解决关键元器件的方法,目前已出现了大量的数字中频产品,尤以 Harris 公司和 Gray 公司为代表。Gray 公司的产品包括数字发射芯片(GC4114)、数字接收芯片(GC1011A)、数字滤波芯片(GC2011)、数字重采样芯片(GC3011)、宽带数字调谐芯片(GC1012A),还有四通道数字接收芯片(GC4014)、四通道数字发射芯片(GC4114)等产品。Harris 公司的主要产品有可编程数字上变频器(HSP50215)、可编程数字下变频器(HSP500214)、数字下变频器(HSP50214)、数字滤波器(HSP53168)、NCO(HSP45102)、数字科斯塔斯环(HSP50210)、数字正交调谐器(HSP50110)、数字 PSK 解调器(HSP50306)等产品。还有高速数字信号处理器 TMS320C6x、ADSP21160,高速高分辨率的 A/D 转换器 AD6640、AD9432 等都为软件无线电的实现奠定了必要的硬件基础。但有些问题还将继续研究,例如在移动通信中,多频带系统中所需的双工问题,手持式软件无线电设备要小而轻、电池

寿命要长、费用要低等软件无线电工程化所带来的一些具体问题。

1.3 软件无线电的基本结构

软件无线电的基本思想是以一个通用、标准、模块化的硬件平台为依托,通过软件编程来实现无线电台的各种功能,从基于硬件、面向用途的电台设计方法中解放出来。功能的软件化实现势必要求减少功能单一、灵活性差的硬件电路,尤其是减少模拟环节,把数字化处理(A/D和D/A变换)尽量靠近天线。软件无线电强调体系结构的开放性和全面可编程性,通过软件的更新改变硬件的配置结构,实现新的功能。软件无线电采用标准的、高性能的开放式总线结构,以利于硬件模块的不断升级和扩展。理想软件无线电的组成结构如图 1.3 所示。

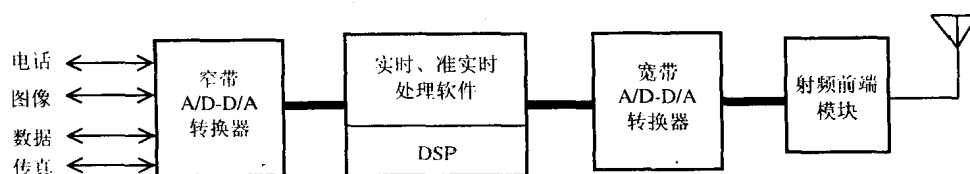


图 1.3 软件无线电结构框图

软件无线电主要由天线、射频前端、宽带 A/D-D/A 转换器、通用和专用数字信号处理器以及各种软件组成。软件无线电的天线一般要覆盖比较宽的频段,例如 1 MHz~2 GHz,要求每个频段的特性均匀,以满足各种业务的需求。例如,在军事通信中,可能需要 VHF/UHF 的视距通信、UHF 卫星通信, HF 通信作为备用通信方式。为便于实现,可在全频段甚至每个频段使用几付天线,并采用智能化天线技术(智能天线将在第 6 章进行讨论)。

射频前端在发射时主要完成上变频、滤波、功率放大等任务,接收时实现滤波、放大、下变频等功能。在射频变换部分,宽带、线性、高效射频放大器的设计和电磁兼容问题的处理是较困难的。当然,如果采用射频直接数字化方式(见第 2 章),射频前端的功能可以进一步简化,但对数字处理的要求提高。要实现射频直接带通采样,要求 A/D 转换器有足够的工作带宽(2 GHz 以上),较高的采样速率(一般在 60 MHz 以上),而且要有较高的 A/D 转换位数,以提高动态范围。目前 8 位 A/D 转换器的工作带宽已做到 1.5 GHz 以上。

模拟信号进行数字化后的处理任务全由 DSP 软件承担。为了减轻通用 DSP 的处理压力,通常把 A/D 转换器传来的数字信号,经过专用数字信号处理器件(如数字下变频器 DDC)处理,降低数据流速率,并把信号变至基带后,再把数据送给通用 DSP 进行处理。通用 DSP 主要完成各种数据率相对较低的基带信号的处理,例如信号的调制解调,各种抗干扰、抗衰落、自适应均衡算法的实现等,还要完成经信源编码后的前向纠错(FEC)、帧调整、比特填充和链路加密等算法。由于 DSP 技术和器件的发展,高速、超高速的数字信号处理器不断涌现,如 TMS320C6X, ADSP21160 等, DSP 已能基本满足软件无线电的技术需求。如果采用多芯片并行处理的方法,其处理能力还将大大提高。

软件无线电的结构基本上可以分为 3 种:射频低通采样数字化结构、射频带通采样数字化结构和宽带中频带通采样数字化结构,如图 1.4~图 1.6 所示。

射频低通采样数字化的软件无线电,其结构简洁,把模拟电路的数量减少到最低程度,如

图 1.4 所示。从天线进来的信号经过滤波放大后就由 A/D 进行采样数字化,这种结构不仅对 A/D 转换器的性能如转换速率、工作带宽、动态范围等提出了非常高的要求,同时对后续 DSP 或 ASIC(专用集成电路)的处理速度要求也特别的高,因为射频低通采样所需的采样速率至少是射频工作带宽的两倍。例如,工作在 1 MHz~1 GHz 的软件无线电接收机,其采样速率至少需要 2 GHz,这样高的采样率,A/D 能否达到暂且不说,后续的数字信号处理器也是难以满足要求的。图 1.5 所示的射频带通采样软件无线电结构可以较好地解决上述射频低通采样软件无线电结构对 A/D 转换器、高速 DSP 等要求过高、以致无法实现的问题。

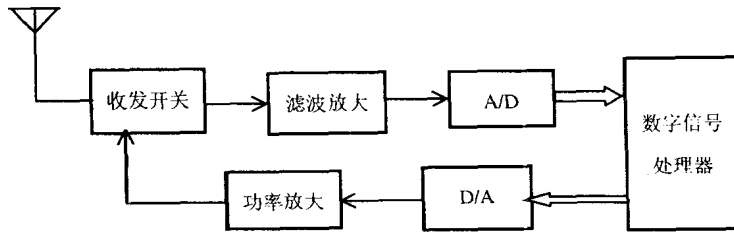


图 1.4 射频低通采样数字化的理想软件无线电结构

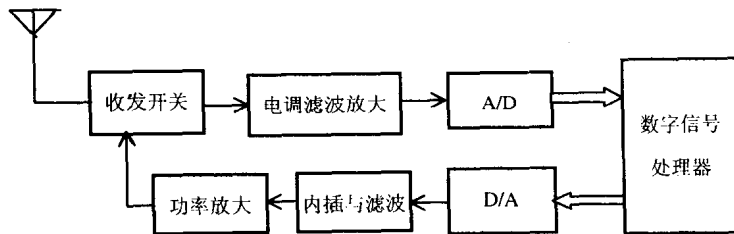


图 1.5 射频带通采样软件无线电结构

这种射频带通采样软件无线电结构与低通采样软件无线电结构的主要不同点是,A/D 前采用了带宽相对较窄的电调滤波器,然后根据所需的处理带宽进行带通采样。这样对 A/D 采样速率的要求就不高了,对后续 DSP 的处理速度也可以随之大大降低。但是需要指出的是,这种射频带通采样软件无线电结构对 A/D 工作带宽的要求(实际上主要是对 A/D 中采样保持器的速度要求)仍然还是比较高的。

宽带中频带通采样软件无线电结构与目前的中频数字化接收机的结构是类似的,都采用了多次混频体制或叫超外差体制,如图 1.6 所示。这种宽带中频带通采样软件无线电结构的主要特点是中频带宽更宽(例如 20 MHz),所有调制解调等功能全部由软件加以实现。中频带宽宽是这种软件无线电与普通超外差中频数字化接收机的本质区别。显而易见,这种宽带中频带通采用软件无线电结构是上述三种结构中最容易实现的,对器件的性能要求最低,但它离理想软件无线电的要求最远,可扩展性、灵活性也是最差的(本书将重点讨论第二种和第三种软件无线电结构,但书中叙述的基本原理也同样适用于第一种软件无线电结构,即最理想的软件无线电结构)。

软件无线电的硬件具有开放性,其硬件必将采用总线式的结构。工业控制总线的总线标准

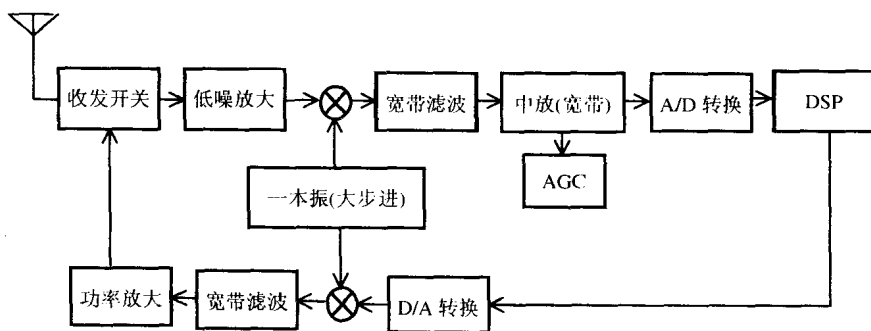


图 1.6 软件无线电的中频数字化结构

很多,例如 ISA、PCI、EISA、VESA、VME 等。ISA 总线和 VME 总线在目前的数字信号处理和工业控制中用得较多,而 VME 总线比 ISA 总线更有优势。ISA 总线的数据为 16 位,地址总线为 24 位,地址空间 16 MB,其总线带宽仅有几兆赫;而 VME 总线数据宽度为 32 位,地址线共有 32 根,地址空间有 4 GB,总线带宽为几十兆赫。VME 总线针对多处理器系统设计,而 ISA 总线是单处理器系统总线,故在采用多处理器时系统的调度能力较低,而在软件无线电中为了提高处理能力往往采用多处理器系统。因此,VME 总线已经被广泛用于工业控制之中,具有众多的支持者和强大的生命力。下面给出一种基于 VME 总线结构的软件无线电硬件系统框图,如图 1.7 所示。

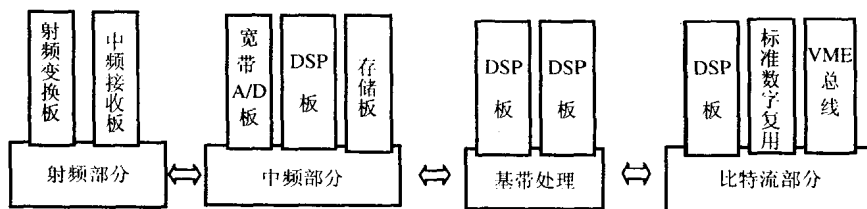


图 1.7 基于 VME 总线的软件无线电硬件结构

同样,软件无线电的软件也具有开放性,可以不断更新或升级,而软件的加载或更新可以通过空中接口实现,所以使用起来更加快捷方便。