

〔美〕 Bruce A. Fette 等著
赵知劲 郑仕链 尚俊娜 译

Cognitive Radio
Technology

认知无线电技术



科学出版社
www.sciencep.com

图字:01-2007-3526 号

内 容 简 介

本书是一部有关认识无线电技术的系统论著,从认知无线电和软件定义无线电的基础知识开始,分别讨论了认知无线电采用的协议、认知无线电的硬件和软件体系结构、频谱效率、制度问题以及当前应用。本书还涉及了认知无线电的前沿研究,重点讨论了这一技术在未来的发展过程。

通过本书,读者将能掌握认知无线电的背景、应用当今认知无线电技术、理解认知无线电未来的发展趋势。

本书可供从事电子信息工程、通信工程等领域的科技人员和管理人员,以及高等学校的师生阅读、参考。

This first edition of **Cognitive Radio Technology** by **Bruce A. Fette** is published by arrangement with ELSEVIER INC, 525 B Street, Ste 1900, San Diego, CA92101-4495

Copyright © 2006 Elsevier

本书中译本由科学出版社出版。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线电技术/(美)Bruce A. Fette 等著;赵知劲,郑仕铤,尚俊娜译.
—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020557-5

I. 认… II. ①F… ②赵… ③郑… ④尚… III. 无线电技术 IV. TN014

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 035247 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:朱光光
责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年5月第一次印刷 印张:29

印数:1—3 000 字数:567 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

译 者 序

随着无线通信技术的发展与广泛应用,有限的频谱和低效固定的频谱分配使用政策导致频谱资源匮乏。认知无线电是一种智能频谱共享技术,使无线通信设备具有发现“频谱空穴”并合理利用的能力,它能真正识别工作环境、调整工作条件、克服干扰、维持所需通信,是一项革命性的技术,它的实现是对通信产生革命性的改革。因此,关于认知无线电概念、原理和应用方面的知识将成为RF/无线专业人员必不可少的知识需求。

本书是关于认知无线电技术的专著,内容包括:认知无线电和软件定义无线电的基础知识、认知无线电采用的协议、认知无线电硬件和软件体系结构、频谱效率、监管问题、当前应用、认知无线电前沿研究领域及未来的发展趋势。

认知无线电是一项新兴的正在不断发展的技术,Bruce A. Fette 博士聚集了认知无线电方面的许多专家撰写了这部内容全面的书籍,它综合了世界上各个专家最新的研究成果,重点强调了认知无线电实现的技术关键以及未来发展趋势,并在每章最后都给出了详细信息的参考资料,为读者提供了广泛的参考空间。因此,我们特将此书翻译成中文介绍给广大读者,希望能够促进我国认知无线电技术的研究、发展和应用。

本书的翻译工作主要由赵知劲、郑仕链和尚俊娜完成,赵治栋、徐春云、王洵、董科海、邬佳、姚瑶、徐世宇、骆振兴等同志参加了部分译校工作。科学出版社的各级领导和编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,借此机会,表示我们诚挚的谢意。

由于本书篇幅较大、内容涉及面广,加之译者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

译 者

2008 年 3 月

前 言^①

本书纵观理想认知无线电 (CR) 的各个方面。CR 将 CR 技术与先进的软件定义无线电 (SDR) 相结合, 从而实现通过学习来帮助用户使用计算机视觉、高性能语音理解、全球定位系统 (GPS) 导航、先进自适应组网、自适应物理层无线电波形以及大量机器学习过程的无线电。

1. CR 了解无线电就像 TellMe[®] 了解 800 号码一样

当你拨打 1-800-555-1212 时, 语音合成算法就会答复 “TellMe[®] 网络免费号码服务 (www.tellme.com, Mountain View, CA, 2005)。请告知您所需要的条目名称。” 如果你含糊地答复, 它就会回复 “确认, 美国联合航空公司 (United Airlines)。如果不是您所需要的请按 9, 否则马上为您查找号码, 请等待。” 据报告, TellMe 可以实现 99% 的准确率, 取代了以前成千上万的话务员。作为一个语音理解系统, TellMe 获得了很大的成功, 它仅集中于一项任务: 找到一个免费电话号码。狭窄的任务集中度是算法成功的关键。

认知无线电体系结构 (CRA) 是构建认知无线网络 (CWN) 的模块。CWN 是 TellMe 的无线电移动产物。CR 和认知网络作为计算智能技术的实用、实时、高集中度的应用而不断涌现。CR 与更一般的如智能代理、计算机语音和计算机视觉等基于人工智能 (AI) 的业务的区别在于集中程度。和 TellMe 一样, CR 集中于狭窄的任务: 调整无线电承担的信息业务以满足特定用户的特定需求。TellMe 是一项网络业务, 它要求足够的网络计算资源来同时服务成千上万的用户。而 CWN 则可以从一个置于钱包当中或扣在皮带上的无线电 (蜂窝电话) 开始发展, 这些无线电集中于从大量可用无线电信息网络和资源中提取出单个用户需要的信息这一狭窄任务。每个 CR 使用其音频和视频感知和自动机器学习 (AML) 功能并通过 CRA 为单个用户提供服务、保护私人信息。

TellMe 现在已经投入使用, CR 在全球无线研究中心和如 SDR 论坛和世界无线研究论坛 (WWRF) 等论坛中迅速发展。本书介绍引导 CR 系统发展的技术, 讨论技术挑战和相应的方法, 强调 CR 是一项促进快速涌现的商用 CWN 业务的技术。

^① 从 *Aware, Adaptive and Cognitive Radio: The Engineering Foundations of Radio XML* (J. Mitola III, Wiley, 2006) 中改编而成。

2. CR 见你所见, 知道射频使用、需求和偏好信息

虽然普通的蜂窝电话也具有照相机, 但是它缺少视觉算法, 因此并不知道它所观察到的是什么。它可以传送视频片断, 但是并不能理解视频片断中的视觉场景。如果蜂窝电话具有视觉处理算法, 那么蜂窝电话能够感觉和理解视觉场景, 从而能够辨别它是在家中、车子里、工作地点、购物场所, 还是回家的公路上。如果算法结果说明用户驾车已快到家, 则 CR 知道以无线方式为用户打开车库门。这样, 用户就不需要使用另一个打开车库门的无线器件。实际上, 一旦 CR 进入市场, 就不再需要车库开门器了, 也不需要密钥卡来打开车门。当用户走近汽车时, 其个人 CR 就能感知到这种场景, 在经过训练后, 它就能合成密钥卡射频 (RF) 传输, 为用户打开车门。

CR 并不会尝试所有情况。CR 掌握很多关于无线电、普通用户和无线电合法使用的信息, 所以它会对无线电的使用模式进行学习。CR 具有检测频谱机会所需的先验知识, 帮助用户准确使用无线电频谱, 并以最小的干扰提供帮助。

实现视觉感知功能的产品已经在笔记本电脑中得到展示。强化学习 (RL) 和案例推理 (CBR) 已经是无线网络中应用的成熟技术, 学术界和工业界的研究表明这些应用是 CR^① 和 CWN^② 的技术开拓者。2~3 个 Moore 定律周期后 (即 3~5 年后), 这些视觉算法和学习算法会集成到蜂窝电话当中。在过渡阶段, CWN 开始提供这种业务, 向消费者展示隐私和超个性化便利之间的新的折中。

3. CR 听你所听, 增强个人技能

现在蜂窝电话都还是“聋”的, 虽然上面安装有麦克风, 但是缺少嵌入的语音理解技术, 因此不能感知听到的东西。它可以让你和女儿通话, 但是却不知道对方是你的女儿, 也不知道你们谈话的内容。如果它具有语音理解技术, 则可以感知语音对话, 从而能够检测到你和女儿正在谈论一些普通话题, 如家庭作业、你最喜欢的歌曲等。通过 CR, 语音算法能够检测到你的女儿说你最喜欢的歌曲正在 WDUV 上播放。这时, CR (作为 SDR, 而不仅仅只是蜂窝电话) 就会调

① Mitola 对 CR 开拓者的看法。

② 语义 Web: 研究人员认为 CR 具有足够的语音功能来回答 <Self/> 以及 <Self/> 对 <Radio/> 的使用的问题来支持其 <Owner/>。当一个像“所有者”这样的普通概念被转换成可理解的计算基元的本体结构时 (如通过语义 Web 技术), 这个概念就成了用于自动推理和信息交换的计算基元。无线电 XML 是可扩展标记语言 (XML) 的 CR 派生物, 它可以用来标准化这些无线电场景感知基元。通过 <Angle-brackets/> 的这种简单处理, 这些基元得到了强化。所有 CR 都有一个 <Self/>、一个 <Name/> 和一个 <Owner/>。<Self/> 具有如 <GSM/> 和 <SDR/> 一样的功能。<SDR/> 是一种自推断的计算体系结构, 只有在计算功能局限于实时响应的任务时才不对系统崩溃提供保证。这对 CR 来说是合适的, 但对于通用计算而言, 所受限制未免太大。

频到 FM105.5 让你听 “The rose”。

有了 CR 之后,就不再需要晶体管无线电了。CR 移除了用户口袋中、钱包里或背包中的另一个 RF 器件。事实上,当高端 CR 进入市场后,人们就可能不再需要 iPOD[®]、Game Boy[®] 和类似的产品了(也有可能是 iPOD 或 Game Boy 与 CR 相结合成为一个统一体:人们永远不会知道市场需求如何使产品演化为“杀手级应用”)。CR 能够了解用户的无线电信息使用模式、歌曲访问、游戏下载以及用户希望的广播新闻、运动和股票报价剪辑等,通过重编程其内部 SDR 来更好地满足用户需求和偏好。通过将视觉和语音感知相结合,当用户走近其汽车时,CR 能够感知到这种场景,并且将汽车上的收音机调频至昨天早上用户收听的 WTOP 来收听用户最喜欢的 “Traffic and weather together on the eights” 节目。

对 AML 来说,CR 需要保存用户可能需回想的语音、RF 以及视觉提示,扩展用户记忆对话和场景片断细节的能力,增强 <Owner/>^① 的技能。由于语音和视觉技术的脆弱性,CR 要像连续运行的摄像机一样尝试 “记住所有东西”。因为 CR 可以检测如说话人姓名以及如 “无线电” 和 “歌曲” 之类的关键词等内容,所以它可以找到用户询问的内容,从而扩大用户对场景的记忆。因此,CR 能增强用户的个人技能,细节记忆能力就是其中一项技能。

4. CR 学习区分说话人来减少混淆

为进一步限制语音的组合式爆破,CR 会构建说话人模型对说话人的语音模式进行统计摘录,特别是对 <Owner/> 而言更需如此。<Owner/> 将 CR 作为蜂窝电话进行电话呼叫时,说话人建模特别可靠。当前的说话人识别算法区分男性说话人和女性说话人的准确性高。当只需要识别一些不同的说话人(即少于 10 个)并且具有如说话人电话号码等可靠的辅助信息时,当前最先进的算法能够以高于 95% 的准确度识别个体说话人。

每个 CR 会不断地对其 <Owner/> 的语音模式进行学习以防止与其他说话人混淆。这样,CR 不断增加经验来实现不断复杂的对话。现在 3GHz 笔记本电脑能够实时支持这种程度的语音理解和对话合成,3~5 年后将在蜂窝电话上得到应用。

CR 要充分了解无线电,要充分了解用户 <Owner/>, 录制并分析个人信息,从而促进可信任的隐私技术的发展。无线业务的增强型自主定制包括广播频谱的二次使用方式。因此,CRA 集成的语音识别具有不需要大量训练的学习功能,并且能够避免引起用户反感,有助于用户。

^① Ibid.

5. 更为灵活的无线电频谱二次使用方式

2004 年，美国联邦通信委员会（FCC）发布了一个报告条例，其中规定 CR 可以以二次用户的形式在满足低功率设备第 15 条规则的条件下（如建立 ad hoc 网络）使用分配给 TV 的但未被广播市场使用的（如农村地区）无线电频谱。SDR 论坛成员公司已经演示了具有这些初步频谱感知和使用功能的 CR 产品。军用无线产品和商用无线产品正在实现 FCC 的这项规定。

完全的视觉和语音感知功能并不遥远，产品正处于开发当中。本书很多章节都强调 CR 的频谱捷变性，暗示了增强型感知技术的发展路径，为无线产业提出了新的长期发展方向。本书作者希望本书能够帮助读者理解 CR 技术并为 CR 技术创造新的机会。

Joseph Mitola III 博士

Tampa, Florida

目 录

译者序

前言

第 1 章 认知无线电技术的历史和背景	1
1.1 认知无线电前景	1
1.2 认知无线电产生的历史和背景	1
1.3 SDR 简要历史	3
1.4 基本 SDR	6
1.5 频谱管理.....	12
1.6 美国政府在认知无线电发展中的作用.....	16
1.7 智能程度.....	17
1.8 本书组织结构.....	18
参考文献	20
第 2 章 通信政策和频谱管理	22
2.1 引言.....	22
2.2 认知无线电的使能技术.....	22
2.3 频谱接入新机会.....	24
2.4 认知无线电的政策挑战.....	31
2.5 电信政策和技术对监管制度的影响.....	38
2.6 认知无线电全球政策.....	44
2.7 小结.....	50
参考文献	51
第 3 章 认知无线电平台：软件定义无线电	53
3.1 引言.....	53
3.2 硬件体系结构.....	54
3.3 软件体系结构.....	65
3.4 SDR 开发和设计	68
3.5 应用.....	79
3.6 开发.....	81

3.7 认知波形开发	83
3.8 小结	85
参考文献	86
第4章 认知无线电所需技术	87
4.1 引言	87
4.2 无线电灵活性及无线电功能	87
4.3 意识无线电、自适应无线电和认知无线电	93
4.4 无线电功能和特点的比较	96
4.5 CR 可用技术	96
4.6 对 CR 的资助和研究	105
4.7 CR 发展历程	113
4.8 小结	114
参考文献	116
第5章 频谱意识	118
5.1 引言	118
5.2 干扰避免问题	118
5.3 认知无线电作用	119
5.4 频谱覆盖区最小化	120
5.5 创造频谱意识	121
5.6 信道意识和空间多信号	125
5.7 频谱意识组网	128
5.8 共存式和覆盖式技术	128
5.9 自适应频谱对认知无线电硬件的要求	129
5.10 小结	130
参考文献	131
附录 传播能量损耗	132
第6章 认知政策引擎	133
6.1 无线电政策管理展望	133
6.2 背景和定义	133
6.3 频谱政策	134
6.4 认知政策管理先例	136
6.5 无线电政策引擎体系结构	142
6.6 政策引擎与认知无线电的综合	146

6.7 认知政策管理的未来	152
6.8 小结	154
参考文献	155
第7章 物理层和链路层认知技术	158
7.1 引言	158
7.2 当前信道条件下物理层和链路层的多目标优化	158
7.3 认知无线电的定义	160
7.4 建立无线电控制 (Knob) 和性能测量 (Meter)	161
7.5 MODM 理论及其在认知无线电中的应用	166
7.6 认知无线电中的多目标遗传算法	173
7.7 高级 GA 技术	183
7.8 高层智能需求	187
7.9 智能计算机如何工作	189
7.10 小结	192
致谢	193
参考文献	193
第8章 认知技术：位置意识	197
8.1 引言	197
8.2 无线电地理定位和时间业务	197
8.3 网络定位	202
8.4 地理定位其他方法	204
8.5 基于网络的方法	211
8.6 边界判决	212
8.7 蜂窝电话 911 为急救人员提供地理定位举例	216
8.8 与其他认知技术的接口	216
8.9 小结	217
参考文献	218
第9章 认知技术：网络意识	219
9.1 引言	219
9.2 应用及其要求	219
9.3 网络要求的解决方案	221
9.4 复杂的折中空间的处理	223
9.5 对补救的认知	224

9.6 DARPA SAPIENT 计划	226
9.7 小结	227
参考文献	228
第 10 章 用户认知业务	229
10.1 引言	229
10.2 语音和语言处理	231
10.3 门房业务	242
10.4 小结	243
参考文献	244
第 11 章 网络支持：无线电环境地图	247
11.1 引言	247
11.2 内部和外部网络支持	248
11.3 REM 介绍	249
11.4 认知无线电的 REM 基础设施支持	250
11.5 利用 REM 获得意识能力	253
11.6 网络支持情景和应用	259
11.7 REM 的支持要素	263
11.8 小结与开放的领域	264
参考文献	265
第 12 章 认知研究：知识表示与学习	268
12.1 引言	268
12.2 知识表示和推理	271
12.3 机器学习	279
12.4 实现考虑	288
12.5 小结	289
参考文献	291
第 13 章 Ontology 在认知无线电中的作用	293
13.1 基于 Ontology 的无线电介绍	293
13.2 认知无线电的知识密集性	293
13.3 Ontology 及其在认知无线电中的作用	297
13.4 分层 Ontology 和参考模型	302
13.5 例子	308
13.6 开放的研究领域	312

13.7 小结	316
参考文献	316
第 14 章 认知无线电体系结构	319
14.1 引言	319
14.2 CRA I: 功能、组件和设计规则	320
14.3 CRA II: 认知环	335
14.4 CRA III: 推断等级	340
14.5 CRA IV: 体系结构映射	348
14.6 CRA V: 在 SDR 体系结构上构造 CRA	354
14.7 认知体系结构研究课题	364
14.8 工业级 AACR 设计规则	364
14.9 小结	366
参考文献	366
第 15 章 认知无线电性能分析	369
15.1 引言	369
15.2 分析问题	371
15.3 传统工程分析技术	377
15.4 博弈论用于分析问题	390
15.5 相关博弈模型	401
15.6 案例研究	415
15.7 小结	422
15.8 问题	425
参考文献	426
第 16 章 难题	429
16.1 引言	429
16.2 本书回顾	429
16.3 基础设施为无线网络提供的业务	433
参考文献	438
术语表	439

第 1 章 认知无线电技术的历史和背景

Bruce A. Fette

1.1 认知无线电前景

设想一下你的蜂窝电话、个人数字助手 (PDA)、笔记本电脑、汽车和电视机都像著名电视连续剧 M * A * S * H 中的 “Radar” O'Reilly 一样智能^①。它们知道你的日程安排；它们会尽快准备好你所需要的东西，而且几乎正合你意；它们会帮你找人、找东西、寻找机会、翻译语言和准时完成任务。同样地，如果一个无线电也是智能的，那么它就能对本地可接入无线计算机网络的有效业务进行学习，并以其首选协议与这些网络进行交互，所以在视频下载或打印输出时就不会为查找正确的无线网络而忙乱。再者，它可以使用和选择合适的频率和波形，减少和避免干扰已有的无线电通信系统。它就像你的一个十分重要的朋友，也像一个电影导演拥有几百位专家帮助完成各项任务，或者像执行官拥有上百位助手来查找文档、撰写总结报告，再将报告大意概述在一张图片上。认知无线电是许多寻呼机、PDA、蜂窝电话和其他现今使用的专用小装置的结合体。它们会在十年后惊奇地提供以前只属于少部分人的业务，而且能够通过无线连接和因特网更简单地实现这些业务。

1.2 认知无线电产生的历史和背景

软件定义无线电 (SDR) 已经能够成功完成有益于用户、网络和有利于降低频谱拥塞的任务。无线电在有限方式下具有一个或多个这方面的功能。自适应 DECT 无线电话就是一个简单例子，它能在允许的范围内找到频率使其工作的信道和时隙内噪声和干扰最小。这些功能中，保护频谱已成了一个国家在国际制度制定中的重点。本书向读者介绍的相关技术和制度支撑能提升 SDR 功能、使 SDR 成为认知无线电的三大应用。这三大应用如下：

(1) 频谱管理和优化。

^① “Radar” O'Reilly 是电视连续剧 M * A * S * H (1972~1983 年播放) 中的角色，他总是在上校需要某些东西之前就知道他需要什么。

(2) 与多种网络接口并优化网络资源。

(3) 人机接口、提供电磁资源帮助人类活动。

本书要讨论的频谱效率高的认知无线电技术是多项技术结合的结果。本章介绍本书其他章节的背景知识。认知技术是基本 SDR 平台顶端的应用,其他很多技术是认知技术的基础。

以下介绍为认知无线电发展做出主要贡献的技术,以此真正认识多少技术的结合才形成了认知无线电技术。Alan Oppenheim^[1]、Lawrence Rabiner^[2,3]、Ronald Schaefer^[2]、Ben Gold、Thomas Parks^[4]、James McClellan^[4]、James Flanagan^[5]、Fred Harris^[6]和 James Kaiser 等引导者的工作促进了数字信号处理(DSP)技术的发展。这些开拓者^①认识到数字滤波和 DSP 的潜力,他们准备了教科书、创新论文及突破性信号处理技术来指导整个行业如何将模拟信号处理转换为数字信号处理。他们引导整个行业实现在模拟信号处理中根本不可能实现的新的处理。

Cleve Moler、Jack Little、John Markel、Augustine Gray 和其他学者开始开发软件工具,这些软件工具终将与 DSP 行业实际相结合,能够有效表示 DSP 技术,能够为复杂算法提供快速有效的建模^[7,8]。

与此同时,半导体产业遵循 Moore 定律^[9]继续发展,使无线电调制解调中使用的数字信号处理的计算能力不仅切实可行,而且改善了无线电的通信性能、可靠性和灵活性,也提高了对用户的价值。这意味着由大量离散器件实现的模拟功能已由硅片实现的数字功能取代,从而更易于生产、价格更低、可靠性更高、体积更小、功耗也更低^[10]。

同一时期,全球各地学者探讨各种技术来实现机器学习和提高机器行为的相关方法。这些技术包括模拟门限逻辑,进而发展成了模糊逻辑和神经网络, Frank Rosenblatt 是这一领域的奠基人^[11]。类似地,表达知识和理解知识数据库的语言也从表单处理(LISP)、Smalltalk 及大量和概率统计相关的数据库中进化发展。在美国国防高级研究计划局(DARPA)的资助下,许多研究人员坚持不懈地研究自然语言理解和话音理解。Janet 和 Jim Baker (随后创立 Dragon 系统)^[12]和 Kai Fu Lee 等^[13]分别开发的语音理解系统是其中最成功的例子。这两个系统都是在 Carnegie Mellon 的 Rai Reddy 的指导下开发的。现在因特网搜索引擎也表现出了人工智能(AI)的许多先进特征。

在组网方面, DARPA 及来自 Xerox、BBN Technology、IBM、ATT 和 Cisco 产业的开发人员共同开发了计算机组网技术,演化成为今天大家都在使用的标准以太网和因特网。因特网工程任务组(IETF)和许多无线组网研究人员

① 这里只给出了作者本人较为熟悉的部分开拓者代表,并没有列出全部名单。

继续发展组网技术，其研究焦点是让无线组网像有线因特网一样普遍。研究人员探讨各种无线网络，包括通过无线电接入点直接接入的网络，以及 ad hoc 网络拓扑结构中以中心无线电节点作为中继器将数据包转向最终目的地的这种更先进的技术。

所有这些技术的结合迎来了认知无线电时代（图 1.1）。认知无线电是 SDR 最顶端的应用，SDR 由大量由硅片制造的数字信号处理器和通用处理器（GPP）实现。许多情况下，频谱效率和其他对用户的智能支持来源于多个无线电间的复杂组网，最终达到为用户提供更多功能、带来更多益处。

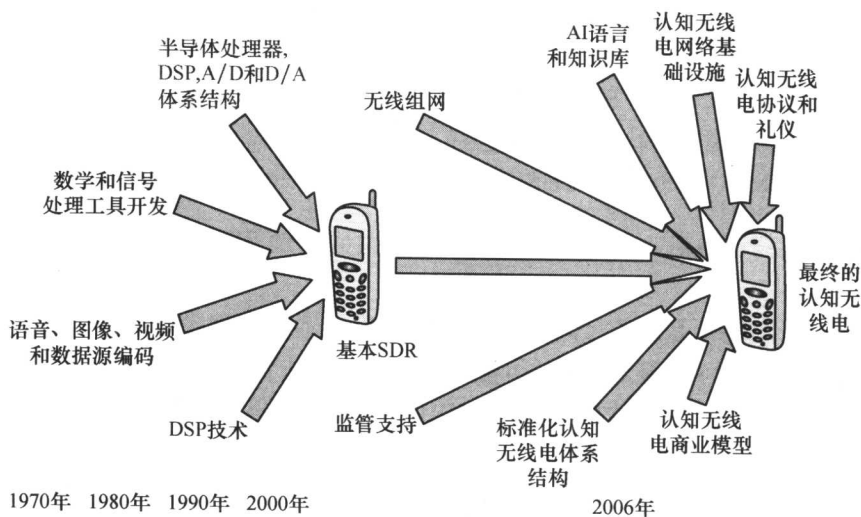


图 1.1 技术历程。各种技术融合促成了 SDR，反过来，SDR 也成了认知无线电的平台

1.3 SDR 简要历史

SDR 是一种载波频率、信号带宽、调制方式和网络接入等特性均由软件定义的无线电。现代 SDR 也支持所需的加密方法、前向纠错（FEC）编码及声音、视频和数字源编码的软件化实现。如图 1.2 所示，SDR 设计起源于 1987 年，当时空军罗马实验室（AFRL）资助开发了一个可编程的调制解调器，是综合化通信、导航和识别体系结构（ICNIA）的演化阶段。ICNIA 是多个无线电的联合设计，即将多个单功能无线电综合在一个机箱中。

与此相比，现在的 SDR 是一个通用设备，其中相同的调谐器和处理器用来实现多个不同频率的波形。这种方法的优点在于它能使设备更通用、价格更低。另外，在销售、发货和安装后，它能用新的软件升级新的波形和新的应用。可编

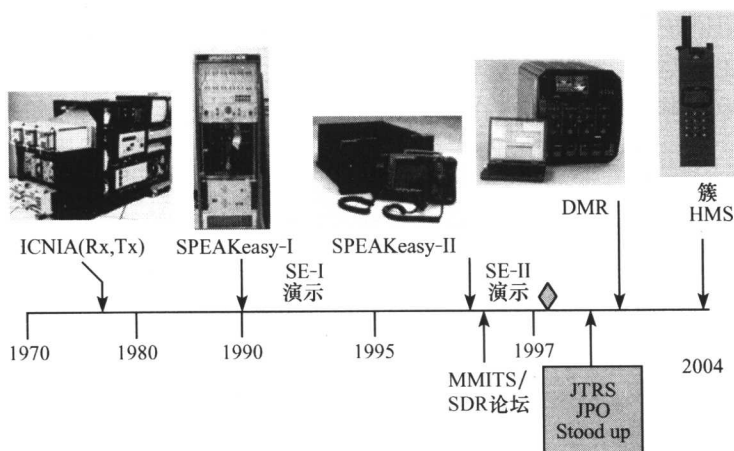


图 1.2 SDR 历程。ICNIA、SPEAKeasy-I (SE-I)、SPEAKeasy-II (SE-II) 和数字模式无线电 (DMR) 合同授予时间和相应展品图片。这些无线电代表了 SDR 各个发展阶段

程调制解调器实现后, AFRL 和 DARPA 又共同资助 SPEAKeasy-I 和 SPEAKeasy-II 计划。

SPEAKeasy-I 是六英尺高的架型设备, 虽然不方便携带, 但它却验证了可以建立完全软件可编程无线电的可能性, 而且可以在其中加入 Cypress 软件可编程密码系统芯片, 其中软件加解密方法由 Motorola 开发 (后来被 General Dynamics 购买)。SPEAKeasy-II 是一个实用无线电大小 (两个比萨盒大小) 的完整无线电, 也是第一个包含可编程语音编码器和具有足够的模拟和 DSP 资源处理多种波形的 SDR。随后在加利福尼亚 Ft. Irwin 进行了现场测试, 其处理多种波形的能力突出了它的有用性, 其标准的商业非架式 (COTS) 部件结构非常适用于国防设备。后来 SPEAKeasy-II 演化成了美国海军数字模式无线电 (DMR), 是一个四信道全双工 SDR, 具有多种波形和多个模式, 能通过使用简单网管协议 (SNMP) 的以太网接口进行远程控制。

SPEAKeasy-II 和 DMR 产品演化为不仅可以用软件定义无线电波形, 而且可以开发合适的软件体系结构将软件植入专用硬件平台, 以此实现硬件与波形软件规范间的相互独立性。演化进展使得独立于软件之外硬件可以改进其体系结构, 初始产品生产后硬件仍然能够不断演化、改进。

现代 SDR 基本硬件体系结构 (图 1.3) 提供了足够资源, 以软件方式定义载波频率、带宽、调制方式、所需的加密方法和信源编码。硬件资源包括 GPP、DSP、现场可编程门阵列 (FPGA) 及其他计算资源的混合体, 足以实现大量调制类型 (见 1.4.1 节)。现代 SDR 基本软件体系结构 (图 1.4) 中, 应用程序接口 (API) 是一个主要接口, 用来保证多种不同硬件平台上实现的软件的可移植

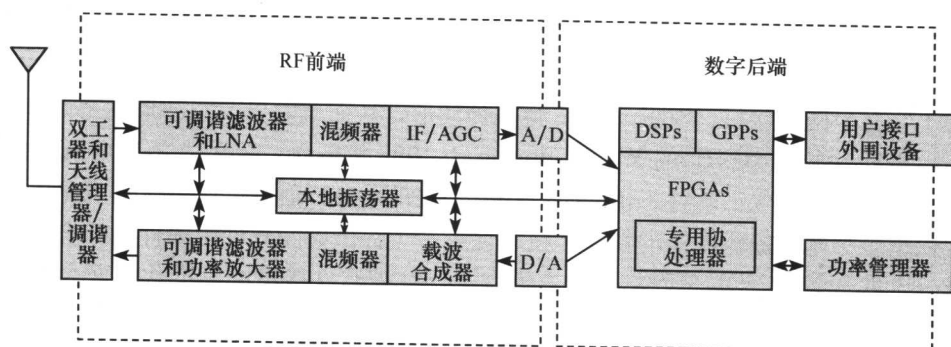


图 1.3 现代 SDR 基本硬件体系结构^①。硬件提供了足够资源可以软件方式定义载波频率、带宽、调制方式、所需要的加密方法和信源编码。硬件资源包括 GPP、DSP、FPGA 及其他计算资源的混合体，足以实现大量调制类型

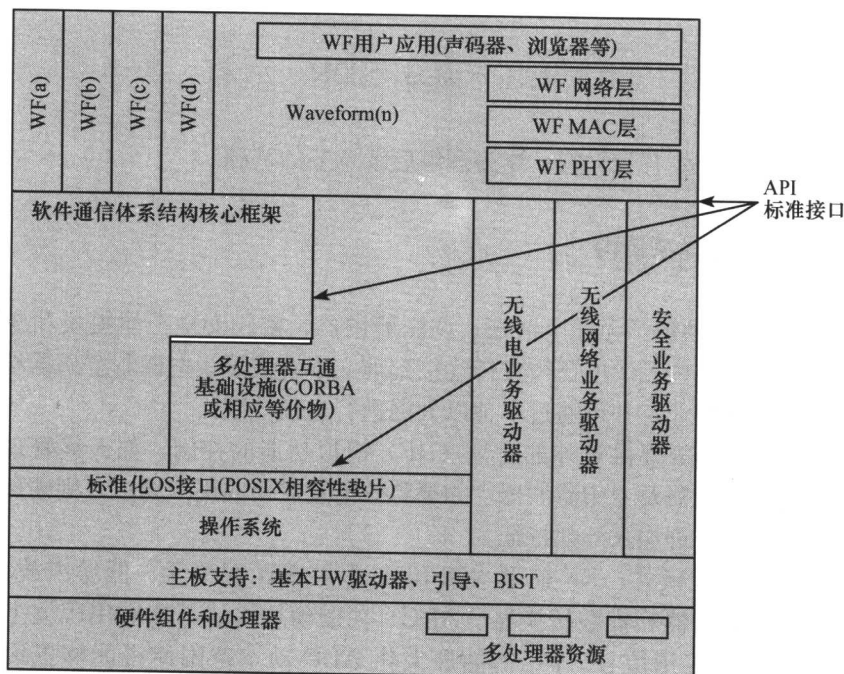


图 1.4 现代 SDR 基本软件体系结构^②。标准化 API 是主要接口，用来保证多种不同硬件平台上实现的软件的可移植性。软件具有为特定波形分配计算资源的能力。为了与多个网络接口，SDR 通常支持多种波形，从而就需要一个波形和协议库

① A/D：模/数转换；AGC：自动增益控制；D/A：数模转换；IF：中频；LNA：低噪声放大器；RF：射频。

② BIST：内置自测试；CORBA：公共对象请求代理体系结构；HW：硬件；MAC：媒体接入控制；OS：操作系统；PHY：物理（层）；POSIX：手提操作系统接口；WF：波形。