

# 基于计算机网络的下一代软件无线电

彭 艺 周正中 姚绍文

(电子科技大学通信学院 成都610054)

## A New Technology of Software Radio Based on Network—Visual Radio

PENG Yi ZHOU Zheng-Zhong YAO Shao-Wen

(Institute of Communication & Information Engineering of UESTC, Chengdu 610054)

**Abstract** Using general-purpose platforms and software modules instead of application specific hardware can facilitate application of the software radio technique using computer and network based architecture. As the development of network, a new technology of software radio based on network—Visual Radio is proposed. In this paper, we derivate the concept of Visual Radio which is based on network from Software Defined Radio's developing process; introduce its background and narrate its technical content and peculiarity, and expect its future.

**Keywords** Software defined radio, Visual radio, 3G, System platform

### 1. 引言

软件无线电(Software Radio, Software Defined Radio)起源于美国国防部的易通话(speakeasy)战术通信系统计划。软件无线电的概念是在1992年全美远程会议上由 Joe Mitola 等人率先提出的,其定义为:软件无线电基于一个硬件平台,其A/D(模/数)变换应尽量靠近天线,而将尽可能多的无线通信用软件来实现。由此可见,软件无线电代表的是一个软件可重构的无线电体系,它的可重构性主要体现在其射频(RF)、中频(IF)以及基带信号处理可以通过软件的编程来控制 and 实现<sup>[1]</sup>。

随着数字技术和微电子技术的迅速发展,数字信号处理器(DSP)以及通用可编程器件(FPGA 等器件)的运算能力和处理速度的成倍提高,而价格却显著下降,现代无线电系统越来越多的功能可以由软件实现,大大地推动了软件无线电发展。美国已成功研制出 Speakeasy 多频段、多模式电台,可同

时处理四种不同的信号波形,能够兼容美军15种以上电台,而这些电台的工作频段,通信制式,组网方式,调制方法,语音速率,编码方式以及信息保密方法等方面都有很大差异,其中 Speakeasy 的大部分功能用软件实现,并且是可编程的。同时美国麻省理工学院计算机科学实验室 Spectrum Ware 项目从通用计算机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。此外, Ericsson, Motorola 公司对软件无线电用在移动基站方面进行了深入研究,同时,美国 Airnet 公司已研制出可灵活配置的基站。国内对软件无线电方面的研究尚处于起步阶段,1998年我国国家自然科学基金设立有关 SDR 技术的重大研究课题,由清华和北大完成,这证明我国对 SDR 的重视<sup>[2]</sup>。

本文介绍了传统软件无线电的原理、系统结构和硬件平台,在此基础上引入了基于网络结构的下一代软件无线电——虚拟无线电的概念,对其原理、特点及关键技术进行分析研究,并展望其未来的发展与应用。

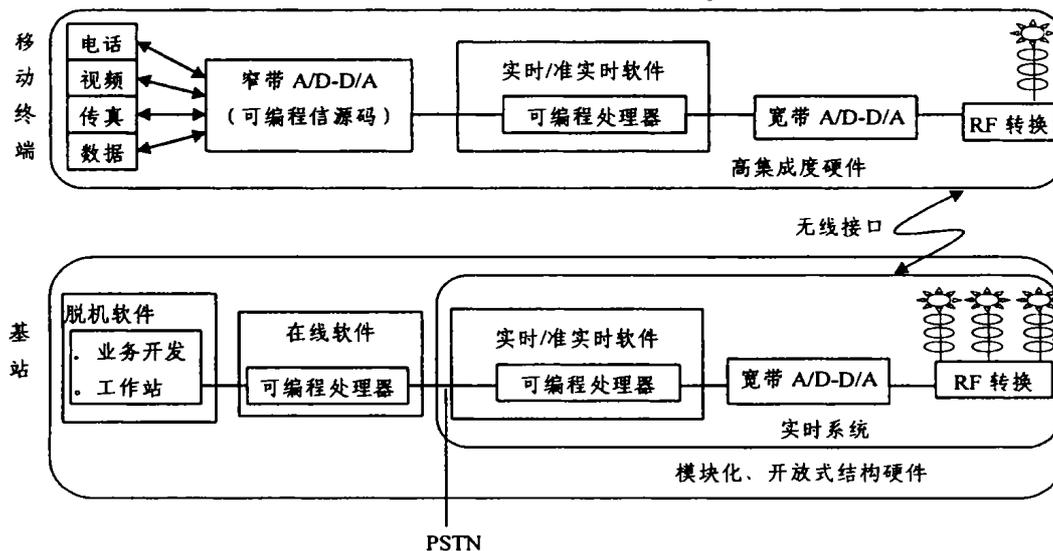


图1 SDR 系统结构框图

彭 艺 博士研究生,从事的学科研究方向是通信系统及其信号处理。周正中 博士生导师,教授,从事信号处理和软件无线电学科的研究。姚绍文 博士,教授,从事计算机网络学科的研究。

## 2. 基于总线结构的软件无线电(SDR)

### 2.1 SDR 的原理

软件无线电原理是指在同一硬件平台上,运行不同的软件,灵活地实现各种通信功能。在无线电系统中,运用软件无线电,其通信设备/单元的工作频段、调制解调方式、信道多址方式、业务种类、数据速率与格式、控制协议等都可以进行重构和控制,选用不同的软件模块就可以实现不同类型和功能的无线电台。其核心思想是在尽可能靠近天线的地方使用宽带 A/D 和 D/A 变换器,并尽可能多地用软件来定义无线功能。各种信号处理用软件实现,包括各类无线信令规则与处理软件、信号流变换软件、调制解调算法软件、信道纠错编码软件、信源编码软件算法等。

### 2.2 SDR 的系统结构

在传统的模拟无线电系统中,射频部分、上/下变频、滤波及基带处理全部采用模拟方式,某个频段、某种调制方式的通信系统都对应专门的硬件结构。而软件无线电系统的 A/D、D/A 变换移到了中频并尽可能地靠近射频端,对整个系统频带进行采样,即从中频(甚至射频)开始就进行数字化处理,这是软件无线电的一个突出特点。软件无线电的关键步骤是以可编程能力强的 DSP 器件代替专用的数字电路,使系统硬件结构与功能相对独立,这样就可以基于一相对通用的硬件平台,通过软件实现不同的通信功能,并可对工作频率、系统频宽、调制方式、信源编码等进行编程控制,系统灵活性大大增强。

### 2.3 SDR 实现的硬件平台

软件无线电的硬件平台采用模块化设计,是一个开放式的通信平台,采用的是常用的总线式结构。由于软件无线电需要进行高速的 A/D、D/A 变换及数字信号处理,必须多个 CPU 并行工作才能满足系统处理速度的要求;其次,数字信号处理数据要高速交换,系统总线必须具有极高的 I/O 传输速率。在符合要求的系统总线中,VME 总线技术最成熟、通用性最好、得到的支持最广泛,基本满足软件无线电的要求,是软件无线电的首选总线方式,美国军用的 Speakeasy 软件无线电系统就采用了这种总线,基于 VME 总线的软件无线电硬件平台结构原理图如图2所示<sup>[3]</sup>。

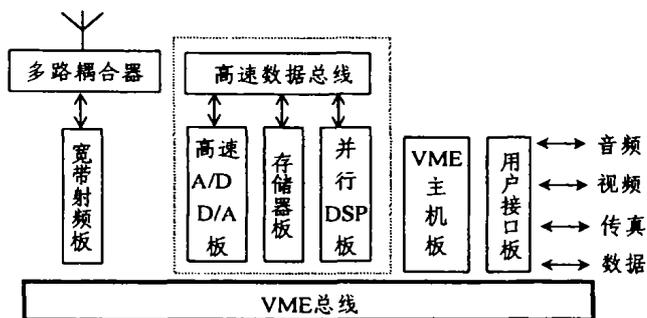


图2 基于 VME 总线的软件无线电硬件平台结构图

## 3. 基于网络结构的下一代软件无线电——虚拟无线电(VDR)

### 3.1 虚拟无线电产生背景

基于总线式硬件平台的软件无线电的优点是可以将各个功能模块通过总线连接起来,实现比较简单且已有很多工业可商用标准,如 VME 总线,另外还有很多现成的与总线配套

的通用模块可供使用。但其缺点是系统各个模块之间的耦合相当紧密,修改某一模块时可能牵涉到一系列模块的变动,甚至总体结构的改变,离理想软件无线电的要求较远。另外,由于它采用的是时分机制,而无线通信系统中的各相邻功能模块间的数据流则是一种流水线式串行机制。它们之间实现匹配比较复杂,而且也不大适合实时业务(如话音)等。

另一方面软件无线电寻求在无线电系统中逐步用软件处理代替硬件处理。当前,计算机网络传输速率越来越高,通用计算机性能越来越好,如果软件无线电平台基于计算机网络构建,那么系统将具有很大的优越性。首先,计算机网络很普遍,可以方便地提供接入平台。其次,计算机技术与网络技术的成熟性和通用性,也使采用这一技术成为十分经济的选择。另外,基于计算机网络的软件无线电技术可以为最近出现的互连网络与移动通信结合的趋势提供强有力的支持,使无线网络可以很容易地与计算机网络融合。

新一代的软件无线电概念——虚拟无线电是在美国麻省理工大学的 Spectrum Ware 项目支持下产生的,于1999年被 V. Bose 等人正式提出来,其基本思想是使用 ADC 作为数字与模拟接口,这一点与 SDR 是一致的。两者所不同的是处理器的核心不一样,SDR 是使用 DSP 或者是 FPGA,然而在虚拟无线电中则是使用高性能的工作站。虚拟无线电是充分利用计算机进行基带信号处理。它依靠高性能的模数转换做成硬件插卡,采用 PCI 或其它总线,工作在高速的 PC 机上。将信号宽带数字化后,在 PC 机上进行数字信号处理而不是在 DSP 上。这一方法允许我们利用 PC 机硬件与软件资源,用新的方法来进行信号处理,采用新的方法来构造系统。

### 3.2 VDR 原理

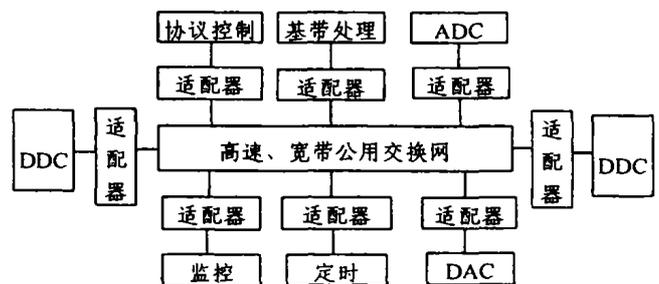


图3 基于计算机网络交换平台的虚拟无线电

由图3中可看出,VDR 的平台是通过适配器与高速宽带交换网连接,为各个功能模块提供统一的数据通信服务。各个功能模块之间通过数据包交换来传送数据,即各功能模块通过适配器来进行打包和拆包,并通过高速、宽带公用交换网来交换数据。高速、宽带公用交换网可以是 ATM 交换,也可以是高速 IP 交换,这一交换网式的硬件平台,使得各个功能模块之间耦合很松。各功能模块都是由 DSP 组成,它们之间遵循相同的通信接口和协议。任何两个功能模块都可以通过建立一个虚电路进行通信,它大大提高了平台的灵活性。上述交换网络的硬件平台,还可以很方便地实现数据的广播和多播,这对于硬件平台的可扩展性来说是很重要的。同时这种网络结构还具有较大的通用性和灵活性,适用于无线电通信系统。

### 3.3 VDR 的特点

1) 体系结构分层化与软件模块化 在 VDR 的技术研究中, Motorola 公司的研究人员提出了如图4所示的分层的体系结构,这样的结构基本上得到了承认<sup>[3]</sup>。

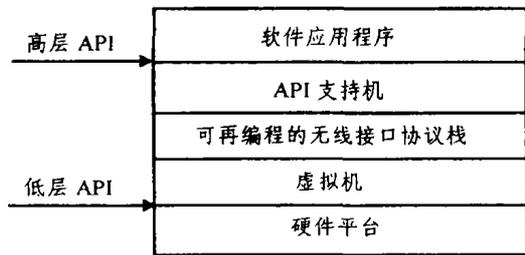


图4 VDR 的体系结构图

在该层次化模型中,软件应用程序完成软件无线电应用系统的功能、体制的描述,并规定相应的指标、参数。采用应用编程接口(API)层能够支持应用程序的再利用,即采用相同的API层接口标准的应用程序可以应用在不同的软件无线电系统中。可再编程的无线接口协议栈实际上就是与提供API相关的一些软件模块,如信源编码,调制解调算法,多址,DDC算法等。这些模块与API层之间有着标准的接口。只要接口不变,模块的改变不会影响用API编写的应用程序的运行。同时这些软件模块又都是可编程的,可以采用不断发展的新的通信体制,以及采用适于软件无线电的新算法。为了使协议栈与硬件平台无关,引入了虚拟机层(virtual machine),也可以称为硬件抽象层。其目的就是掩盖无线通信系统的硬件实现。它与无线接口协议栈有一个统一的接口,称为是低层API。采用低层标准API可以使同样的软件加载到不同厂商的硬件上,或者说运行不同的低层软件。这种低层的API掩盖了特定的硬件实现,如不同厂商的产品或者同一厂商的不同系列的产品。装载到硬件平台上的软件只需按照标准的接口编写即可。该层次化模型中的最后一层就是硬件。一定的硬件与一定的虚拟机相对应,我们称之为硬件平台。

2)虚拟无线电结构数学分析化 当软件无线电经历从研究到实用的转变时,建立软件无线电结构的可证明特性越来越重要。虽然软件无线电的软件重用性较高,但是由于缺乏数学分析对存储器、缓存空间与处理资源的量化,很难讲出一个软件模块的数据吞吐量、响应时间及其它关键要求。当重用自己软件库中或第三方的软件时,可能存在系统性能下降,甚至系统崩溃,所以需要数学模型来刻画与分析,并利用拓扑学来研究软件无线电结构,提高了即插即用结构的应用和资源的有效重用。

3)面向对象化 未来的虚拟无线电技术是应用在第三代移动通信(3G)中的,3G是面向个人服务的,因而第三代移动通信系统中的软件无线电技术需要面向对象设计。

4)认知化、智能化 认知软件无线电是指无线电的内部工作状态是可知的,通过无线电知识描述语言(Radio Knowledge Representation Language, RKRL)与网络,针对无线规则进行智能交流,并采用支持关于用户需要的自动推理的方式,更好地为个人通信服务。

5)网络化,信息安全化 无线用户、移动用户都需要通过无线通信系统与网络相连。因而在软件无线电体系结构中增加网络模块是不可避免的。同时,信息安全也是软件无线电所必备的功能,它提供鉴权,防止欺骗;提供数据流加密,防止破译。

#### 4. VDR 中的关键技术

虚拟无线电的目的是把模数转换部分尽可能地靠近天

线,以A/D转换器作为软/硬件划分界限。由于技术的限制,目前多采用多频段硬件前端将RF频段信号下变频到IF,然后直接采样IF频段波形,再将采样结果送到主内存中,如图5所示<sup>[4]</sup>。而这之后的处理将全部在应用层软件中完成。

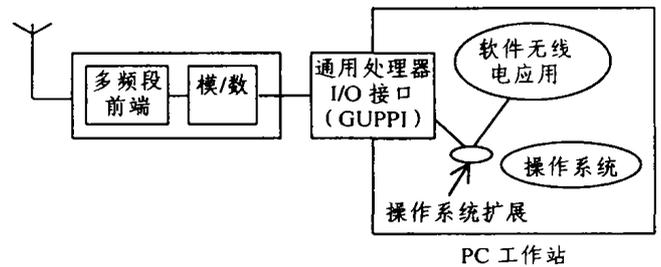


图5 虚拟无线电系统方框图

虚拟无线电将采样送到主内存的方法被称为后台直接存储接入(DMA),它是将采样流直接送到内核缓冲区。这些缓冲区采用虚拟内存操作来记录用户地址空间,所需成本很低。为支持这一功能,需开发通用PCI I/O系统及构造可编程应用环境。这也是在现有个人计算机上建立虚拟无线电环境的两个关键部分,下面就分别介绍一下这两个部分。

##### 4.1 I/O 系统

通用工作站I/O系统需要解决的问题有两个:一个是必须消除采样信号和处理信号不稳定性根源;另一个则是必须满足应用和A/D转换器之间的高吞吐量。

1)I/O系统结构 主要由两部分组成,通用PCI I/O(GuPPI)和操作系统相加。GuPPI提供系统前端到模拟前端的外部接口,接口设计必须满足两个需求,第一,以采样速率接收或发送采样后数据。第二,易于设计。接口采用千兆比的PCI总线,支持连续双向VO流,采样速率达32MSPS(每秒百万采样数)。GuPPI可使模拟前端和主内存之间突发数据的速率接近VO总线的最高速率。此外,还能在不丢失任何采样的前提下保证模拟前端速率固定以及保证I/O总线上可变速率间的解耦时间,这样可有效地吸收由突发接入I/O总线所引起的不稳定。这些功能的完成都不需要处理器的参与,所需处理开支的每个采样不超过半个周期。

虚拟内存相加提供应用与设备驱动之间的低成本、宽带数据传输,同时也提供外部接口应用。虚拟内存操作通常使读写系统不用拷贝而直接调人GuPPI,这为实时业务的应用提供了保证。

2)性能 目前在200MHz奔腾处理器系统,Linux操作系统,32MHz的32位PCI总线,所有循环周期采用奔腾处理系统时钟周期的条件下,GuPPI最大原始输入吞吐率为933Mbit/s,原始输出吞吐率为790Mbit/s,主要是因为从主内存存取值时的等待时间降低了最大输出吞吐率。

##### 4.2 可编程环境

可编程环境主要采用SPECTRA结构,它是一个支持受实时限制的便携式自适应信号处理系统的可编程环境。SPECTRA环境支持几种不同的自适应信号处理概念,包括自适应环境、自适应用户、自适应功能和自适应资源。为支持这几种自适应,需要采用“数据牵引”结构,即当数据流程从输入到输出时,控制流程从输出到输入。通过控制下行流,实行预先估计并自适应下行流模块所需求的系统构造结构。因为下行流部件只在上行流模块需要数据时才处理,从而使总处

(下转第104页)

据页面访问情况图找出关键页,以减轻测试工作量。用 Viewer 来显示这个模型,从而给测试者较为直观的印象。

在 Web 模型的基础上,用 TestWeb 来实现测试。结合 UML 模型和手工输入的特定测试规范,测试生成器产生了具体的测试用例,如根据页面导航图生成链接可达性测试用例、根据对象状态图生成状态依赖测试用例,以及根据变量的定义-使用链而生成的不同测试等级内的结构测试用例等。在具体测试时,可能会要求手工输入一些值才能运行测试用例,从而运行测试执行器,然后输出一些页面并得到一些覆盖率信息。输出页面与期望值相比较,得到测试的最终结果:成功或失败。

这样,在不多的人为干预下,Web 测试半自动化地运行起来。这样的测试能够包括 Web 测试的各个方面,并可以反复进行,从而能够全面、高效、集中地保证 Web 应用的质量,达到 Web 测试的目的。

**结束语** 随着 Web 应用种类的不断增长,作为保证 Web 质量和可靠性的重要手段,Web 测试受到人们越来越多的重视。本文首先讨论了对 Web 进行测试的必要性以及 Web 测试不同于传统软件测试的特殊性,接着针对 Web 应用的特定结构,分析可能出现故障的位置,然后详细讨论、分析了现有

的各种测试技术,并总结了面向对象的 Web 测试建模以及利用统计信息对页面进行有针对性的测试,最后以两个测试工具进行 Web 测试的实例来说明、实现这样的思想。这样本文对现有的各种 Web 测试思想、技术和工具进行了一定的分析、综合、比较,用户可以根据实际应用情况来选择使用的测试模型、方法和工具。

## 参考文献

- 1 张卫平,徐宝文,周晓宇,李东,许蕾. 元搜索引擎研究. 计算机科学,2001,28(8):36~41
- 2 Gao J, Chen C, Toyoshima Y, Leung D. Engineering on the Internet for Global Software Production. IEEE Computer, May 1999. 38~47
- 3 Powell T A, et al. Web Site Engineering. Beyond Web Page Design. Prentice Hall, 1998
- 4 Jamsa K, 王玉琳, et al. 译. WEB 程序设计教程. 电子工业出版社, 1997
- 5 Automated Web Testing. <http://www.internetqa.com>
- 6 Web Site Testing. <http://www.telsoft-inc.com>
- 7 Software QA and Testing Frequently-Asked-Questions. <http://www.softwareqatest.com>
- 8 顾庆. 分布式程序测试研究:[南京大学博士生毕业论文]. 2001
- 9 Binder R V, 华庆一等译. 面向对象系统的测试. 人民邮电出版社, 2001
- 10 Silk Test. [http://www.segure.com/html/s\\_solutions/s\\_silk-test/s\\_silktest\\_toc.html](http://www.segure.com/html/s_solutions/s_silk-test/s_silktest_toc.html)

(下转第110页)

(上接第107页)

理量减少。另外,对每个模块都以数据块形式进行操作可充分利用高速缓冲存储器,避免引起不期望的等待延迟。

## 5. VDR 的典型应用

虚拟无线电的应用依赖于高性能的 A/D 转换器,但并不采用 DSP,而是选择快速发展的工作站硬件。下面以软件蜂窝移动电话接收机为例介绍一个虚拟无线电的具体应用。

软件蜂窝移动电话宽带数字接收机工作在美国“A-side”蜂窝移动电话频段<sup>[3]</sup>。接收机可连续地监视10MHz宽的蜂窝频带,可解调其间任何一处 FM 信号。图6为蜂窝移动电话接收机方框图。前端是 RF 接收机,其功能是把825~835MHz 带宽的信号下变频到基带信号,然后以 25.6MSPS 采样信号速率对信号进行采样。12bit 采样流送入 GuPPI 卡后,所有信号处理都在软件中执行。

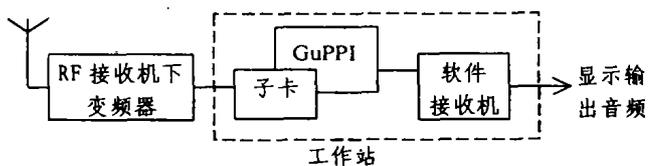


图6 蜂窝移动电话接收机框图

宽带软件接收机处理步骤如图7所示。值得注意的是所有系统都由软件进行控制。这样即使接收机正在工作,这些参数也可以很容易地被修改。



图7 软件结构框图

处理过程的第一步是信道选择滤波。该模块的任务是从 10MHz 频带宽中提取窄带 FM 信号 (AMPS 信道带宽为 30kHz)。这个步骤采用了新型滤波设计,把3个传统步骤——下变频信号到基带、低通滤波和抽选采样速率结合在一起。信

道选择滤波采用 RF 前端  $R_s = 25.6$  MSPS 的原始采样作为输入,并以一个可变中间采样速率来产生一个复合基带信号。在复合 FM 信号中,所需信息(在这里指语音)由连续频率携带,它是复合信号相位的时间微分。因此,第二步信号用简单正交解调算法解调,用连续采样间相位微分估计信号相位微分。第三步处理是作为限制冲击响应 (FIR) 滤波完成的。首先简化低通抽选滤波,当采样频率降到音频速率时,把可能引起偏移的高频成份除掉。最后一步是低通滤波,其目的是把带外噪声从语音信号中除去。

类似这样的软件接收机具有开发快捷,在开发期间充分利用大量容易修改的滤波算法进行实验等特点,并可利用现有的器件或软件,这不但有利于缩短开发周期,也有利于增加新功能。

此外,虚拟无线电也可以应用于实现软件无线网络接口卡,使网络接口卡功能可动态调整。软件无线网络接口卡系统比普通的网络接口卡更具有动态灵活性、便携性、兼容性强和软件重复使用率高等优势。

**结束语** 软件无线电技术是当今计算机技术、超大规模集成电路和数字信号处理技术在无线电通信中应用的产物。它已与第三代移动通信系统紧密的结合起来,第三代移动通信系统的研究推动了软件无线电技术的发展,而软件无线电技术又促使第三代移动通信系统更加灵活的实现。它在我国提出的第三代移动通信系统 SCDMA 中,应用就更广泛了,SCDMA 系统的基站和终端都采用了高速数字处理器和高速 A/D 变换器,处理速度高于 5000 万次/秒,全部基带信号处理和变换都用软件来完成。虚拟无线电作为新一代的软件无线电技术将在未来发挥着巨大的作用。

## 参考文献

- 1 Mitola J. Cognitive Radio: Making Software Radio More Personal. IEEE Personal Communications, 6(4)
- 2 王际兵,赵明,姚彦. 软件无线电发展动态. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(9)
- 3 Software Special Issue. IEEE Communications Magazine, Feb. 1999
- 4 吴伟陵. 移动通信中的关键技术. 北京: 邮电大学出版社, 2002