

## 摘 要

高速上行分组接入(HSUPA)是第三代通讯伙伴计划组织(3GPP)制定的 WCDMA 标准 Release6 的技术特征。它是目前比较热门的研究领域。HSUPA 采用基于 NodeB 控制的快速调度、物理层混合重传 (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)，以及 2ms TTI 的短帧传输等关键技术，不但增加了系统容量和覆盖，而且使用户 (UE) 具有更大的上行吞吐率和更小的传输时延。

文章介绍了 HSUPA 系统级仿真方案的设计，以及通用移动通信系统 (UMTS) 的业务模型，详细介绍了会话业务 (VoIP) 的原理和相关技术。由于静默期有延时，不能很好地保证静默时间服从负指数分布的特点，也不能保证任意一个 20ms 都发送一个数据包的特点。针对这样的不足，对业务模型进行了算法上的改进，并进行了仿真验证其可行性。

对基于 NodeB 控制的调度算法进行了研究，分析了三种典型的调度算法。由于正比公平调度算法在信道条件差别比较大时，不能很好地保证用户的公平性。针对这样的不足，文章给出了两种改进的正比公平调度算法，并进行了仿真验证其可行性。

基于平台的需要和性能验证，对性能指标的统计功能进行了设计，并针对相关的性能进行了分析说明，进一步地验证了改进正比公平调度算法的可行性。同时，有效地帮助研发人员来完善平台，方便了管理和查看。为实际应用提供了一定的设计基础。

**关键词：** WCDMA；NodeB；HSUPA；系统级仿真；上行调度算法

## ABSTRACT

High Speed Uplink Packet Access(HSUPA) is a new work item of Technical Specification Release6 in 3GPP. Currently, the study of HSUPA field is very popular. The techniques of HSUPA, i.e. Quick scheduling based on Node B controlled, Hybrid ARQ with Chase Combining in physical layer, Shorter TTI and so on. These not only improved the performance of uplink dedicated transport channels but increased capacity and throughput and reduce delay.

This thesis introduced a design method in HSUPA system-level simulation, as well as Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) business model, details of the session service (VoIP) and the related technologies. Due to the delay in quiet period, we can not guarantee silent features time meet negative exponential distribution, can not guarantee any of 20ms sent a packet either. For this lack, improved the business model on its algorithm, and made simulation to verify the feasibility.

After analysed three typical scheduling algorithm, made in-depth research on scheduling algorithm based on Node B controlled. When the big difference among channel conditions, the proportional fair scheduling algorithm can not effectively ensure fairness of users. In view of this phenomenon, given two modified proportional fair scheduling algorithm, and made simulation to verify the feasibility.

In needs of the platform and performance validation, designed the statistical functions of performance, analyzed and interpreted related performance, further validated the feasibility of improved proportional fair scheduling algorithm. Meanwhile, easier when programmers improve the platform, more convenient when user manage and view. This part also provide design foundation for practical application.

**Keywords:** WCDMA; NodeB; HSUPA system-level simulation; Uplink Scheduling algorithm

# 第1章 绪论

## 1.1 WCDMA 系统简介

随着社会的快速进步、科学的迅猛发展、全球第三代移动通信系统（3G）网络的不断增加以及移动互联网的面世，移动通信逐渐成为人们的一种生活方式，移动电话所扮演的角色也仅仅局限于人与人之间的移动通话<sup>[24]</sup>。作为3G三大主流标准之一的宽带码分多址（WCDMA）技术标准，是在全球移动通信系统（GSM）的基础上演进的，目前其全球商用化进程已经全面展开。

模拟蜂窝系统被称为第一代移动通信系统。数字系统被称为第二代移动通信系统。两代系统已经使语音通信以无线的方式走进了众多主流市场。与第一代和第二代移动通信系统相比，3G运用了基于全IP网络的CDMA技术，不仅能够支持更多的用户数量和更大的系统容量，而且还能支持多媒体等高速数据业务。3G技术的发展，正向着实现任何人在任何时间、任何地点与任何人进行任何方式通信的目标迈进<sup>[25]</sup>。

3G产生的初衷主要是为了能够支持多媒体通信，它能够提供高质量的视频和图像，从而大大地提高了人们的通信能力。WCDMA技术是第三代空中接口的首选，在第三代移动通信伙伴计划（the 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, 3GPP）中制定了其相关的技术规范。

### 1.1.1 WCDMA 系统组成

WCDMA系统是由GSM系统演进而来的，网络结构功能上的划分与GSM网络的划分是一致的，分为两个子系统：UTRAN<sup>[2]</sup>网子系统、核心网（CN）子系统。UTRAN<sup>[2]</sup>子系统处理所有与无线接入有关的无线信道分配、释放、切换、管理等功能，CN子系统处理所有与话音呼叫数据连接以及与外部网络相关的交换连接路由等功能，CN从逻辑上分为电路域（CS）和分组域（PS）。CN、UTRAN和用户设备UE三部分组成了WCDMA系统。其系统组成如图1.1所示。

由图1.1可以看到，WCDMA系统的各个部分由标准接口进行连接，其中CN与UTRAN通过Iu接口相连，而UE与UTRAN通过Uu接口相连。UTRAN<sup>[2]</sup>又包含多个无线网络子系统（RNS）。而一个RNS又包括一个无线网络控制器（RNC）和多个基站（NodeB），一个NodeB可以包括多个小区（cell）。在UTRAN中，NodeB与RNC通过Iub接口相连，RNC与RNC之间则通过Iur接口相连。

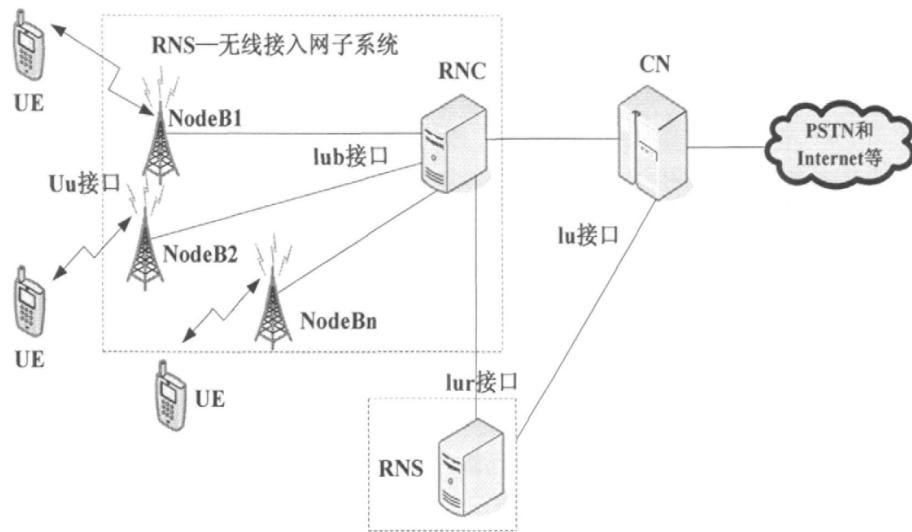


图 1.1 WCDMA 系统组成

### 1.1.2 WCDMA 系统协议结构

WCDMA 系统的协议体系包括三层，物理层、数据链路层和网络层，其中，物理层位于 UE 和 NodeB，数据链路层位于 UE、NodeB 和 RNC，网络层位于 UE、RNC 和 CN<sup>[2]</sup>。其协议体系结构如图 1.2 所示。

网络层：负责用户设备 UE 与网络之间的连接，它的无线资源控制模块（RRC）负责连接、配置和业务承载与无线资源的释放。

数据链路层：主要由无线链路控制（RLC）和媒体接入控制（MAC）两个功能模块组成，其中 RLC 负责完成 UE 数据的传输、纠错、流控、协议的错误检测和恢复，以及加密等功能；而 MAC 主要负责完成逻辑信道和传输信道之间的映射功能，把各种逻辑信道复用或解复用到相同的传输信道。

物理层：负责把传输信道映射到物理信道上，并运行相应的射频功能，这些功能主要包括频率和时间的同步、速率匹配、扩频和调制、功率控制和软切换。

WCDMA 系统主要有以下几个技术特点<sup>[12]</sup>：

(1) 具有比较高的系统容量。

具有宽带宽的 WCDMA 系统，采用了快速功率控制技术和自适应天线技术，有效地提高了系统容量。

(2) 具有比较高的数据传输速率。

随着移动通信系统的不断演进，数据的传输速率有很大的提升。

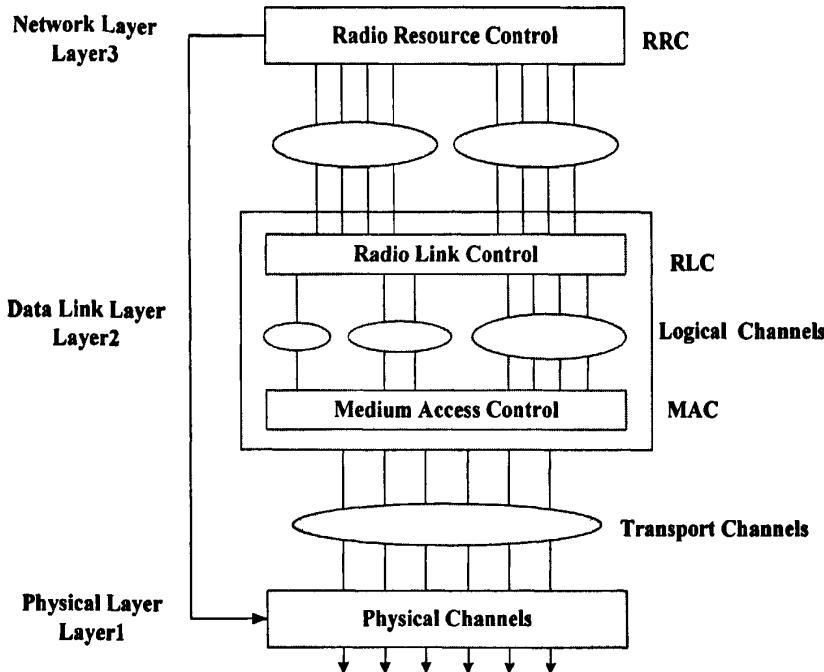


图 1.2 3GPP 协议体系

(3)具有更加丰富的业务类型。

与 2G 相比, WCDMA 系统给出并发展了更加丰富的业务。从技术实现的角度来讲, WCDMA 系统将主要业务分为两大类: 电路域业务和分组域业务<sup>[12]</sup>。

(4)具有更可靠的无线传输。

无线传播环境是非常复杂且变化多端的, 无线信道也是比较恶劣的通信介质, 能够有效地保证高质量无线传输是比较困难的。WCDMA 系统基于带宽比较宽和发射分集技术的特点, 使其系统能够更好地保证无线传输的质量。

(5)具有更高的语言质量。

WCDMA 系统基于带宽比较宽和自适应多速率语音编码技术的特点, 提高了 WCDMA 网络语音质量。

(6)具有更低的发送功率。

WCDMA 系统基于快速功率控制技术和软切换技术的特点, 使其具有较高的接收敏感度, 进而有效地降低了终端发射功率。

## 1.2 WCDMA 系统和 HSUPA 系统的研究发展和现状

### 1.2.1 WCDMA 系统的研究发展和现状

20 世纪 90 年代初, 在欧共体的研究项目 CODIT 和 FRAES 以及欧洲一些大的无

线通信公司中就开始对有关 WCDMA 的技术进行了研究。一些用以评价链路性能的 WCDMA 试验系统在项目研究中应运而生，并且对 WCDMA 这一概念有了基本的理解。而 GSM 的巨大成功对第三代系统在欧洲的标准化产生了重大影响。欧共体陆续启动了许多研究计划。1997 年，方案逐步缩小在两个主要的候选技术，即 WCDMA 和 TD-CDMA 技术之间<sup>[35]</sup>。1998 年 1 月，欧洲标准化组织欧洲电信标准协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 预计把 WCDMA 作为第三代空中接口。1998 年 12 月，3GPP 成立，极大地推动了 WCDMA 技术的发展，加快了 WCDMA 的标准化进程，并最终使其成为 ITU 批准的国际通信标准。1999 年底，完成了第一套完整的 WCDMA 技术规范，称为 R99 版本。欧洲于 2002 年初进入了预商用的测试阶段，并且于 2003 年开始商用。

对 IMT-2000 的研究，作为 3G 最积极倡导者之一的日本，在第二代移动通信上推出了 PDC 系统及 PHS (Personal Handset System)，自成体系。这些产品日本市场非常普及，但最终未能成为国际主流产品，导致日本移动通信厂商在国际市场竞争中几乎未占领任何本土之外的市场份额<sup>[34]</sup>。在整体策略方面，日本迫切希望通过 3G 推出产品来扭转不利态势。1993 年-1997 年，通过四年的努力，日本将无线传输技术基本定为 WCDMA 技术。并于 2001 年在一些主要地区开通了第一个商用网络。

由于世界上其他一些国家也在进行着类似技术的标准化，这就使得在各地区工作各自并行开展的情形下，想要获得一致的规范来保证设备的全球兼容性是极其困难的。因此，人们希望创立一个单独的 WCDMA 标准论坛来制定共同的 WCDMA 规范，也就有了包括 ARIB (日本)、ETSI (欧洲)、TTA (韩国)、TTC (日本)、ATIS (美国)<sup>[26]</sup> 在内的 3GPP 创立的标准组织。

3GPP 规定了基于 WCDMA 的几个重要的演进步骤：R5 版本在下行链路中实现 HSPA，R6 版本在上行链路中实现 HSPA。高速下行分组接入 (HSDPA) 技术于 2005 年投入商用，而高速上行分组接入 (HSUPA) 技术于 2007 年投入商用<sup>[36]</sup>。进一步的 HSPA 演进为 3GPP 的 R7 版本，HSPA 的下一步演进是 HSPA+以及 LTE 的长期演进。

## 1.2.2 HSUPA 系统的研究发展和现状

在 WCDMA 的 R5 标准中，通过引进 HSDPA 技术对下行链路 (从基站到手机方向) 的数据传输性能以及分组业务进行了改良和优化，而上行 (手机到基站方向) 数据传输能力没有得到提升，上行方向上的容量和服务质量仍然存在限制，导致 WCDMA 网络难以开展许多新兴基于 IP 分组网提供的高速多媒体业务。

HSUPA 技术的引入正是为了突破这些限制，HSUPA 技术的应用可以满足提高上行小区吞吐量和高速数据速率覆盖的要求，同时改善突发业务的服务质量，提高无线资源的利用率。HSUPA 的技术需求主要涵盖了如下三个方面：

**标准化方面：**要考虑到其对当前硬件架构和标准框架的影响，比如：与之前 R99、R4 和 R5 版本之间的兼容性与对应性，以及如何进一步优化低速的移动环境，以适应全面移动的要求。

**业务方面：**要能够提供更高的上行数据速率，更大的小区吞吐量和相对更小的时延；在有效降低负荷的同时，控制上行噪声功率的抬升，从而更好地实现数据流、交互以及后台类等业务。

**运营商方面：**使得运营商可以通过 HSUPA 进一步改善上行 Iub 传输资源、基带硬件和无线资源的利用率，扩大高数据速率和小区吞吐量的覆盖范围，以达到市区，郊区，和农村的全面覆盖。

HSUPA 主要采用了三种关键技术：物理层混合重传（HARQ）机制；基于 NodeB 控制的快速调度；更短的传输时间间隔（TTI）。应用这些技术可以给系统带来以下增益：

- (1)减少了 20-55% 的数据呼叫时延；
- (2)提高了 50-70% 的上行容量；
- (3)上行数据呼叫的平均速率可提升约 50%。

3GPP 对 HSUPA 的研究将持续深入，研究范围和工作包括物理层（RAN1），网络层和数据链路层协议（RAN2），Iub/Iur 协议（RAN3）和 RF 发射与接收，以及系统性能需求和一致性测试（RAN4）等。在 RAN2 小组的带领下，第一版 HSUPA 规范已于 2004 年 12 月出版，实际工作项目也已经在 2005 年 3 月完成。

迄今为止，3GPP R6 协议已经终止，但部分协议还在继续发展，补充提案也在具体实现过程中被不断提出。虽然标准已经固定，但具体实现时有关性能改进方面的提议，各大厂商也给出了不同的参考建议。

### 1.3 课题研究背景和意义

基于吞吐量、覆盖、时延和 QoS 的考虑，为了有效地改善系统的这些性能，3GPP 在 R6 中引入了高速上行链路分组接入技术。HSUPA 是继高速下行链路分组接入技术之后，WCDMA 标准的又一次重要演进。与 HSDPA 类似，HSUPA 是上行链路针对分组业务的优化和演进。HSUPA 沿用 R99 的大部分特性，唯一改变的是 UE 向 NodeB

传送数据的方式,例如基于 NodeB 控制的快速调度、物理层混合重传 HARQ 技术、更短的 TTI、高阶调制以及快速专用信道建立等方面<sup>[2]</sup>。

HSUPA 较 R99 有较大程度的提高体现在以下几个方面<sup>[2]</sup>:

- (1)在上行链路中,能够支持比较高的数据传输速率;
- (2)在上行链路中,无线覆盖的范围有了一定的提高;
- (3)在上行链路中,小区的吞吐量有了一定的提高;
- (4)在上行链路中,减少了用户数据传输的时延;
- (5)在上行链路中,具有增强的快速调度算法和资源控制算法;
- (6)在上行链路中,提高了业务的 QoS 能力。

HSUPA 系统中,使用物理层混合重传 HARQ 技术,在 UE 和 NodeB 之间直接进行数据分组的重传,大大降低了无线接入网的时延;使用基于 NodeB 控制的快速调度,对负载和数据流量的反应比较灵敏,能够有效地控制上行链路的噪声增长。在上行链路中,有可能减小为了保护过载运行而预留的峰值储备,从而提高了用户数据传输速率和小区容量。利用 HSUPA 技术,上行峰值传输速率可以提高 2~5 倍,小区上行链路吞吐量提高了 20%~50%。

为了减小将 R99 升级为 HSPA 的代价,HSUPA 在 MAC 层以上的数据传输与 R99 系统基本保持一致,HSUPA 可以与 R99 共享 CN、NodeB、RNC 等。对用户来讲,通过 HSUPA 可以享受到更好的网络质量,尤其是在使用对称业务时,服务更可靠,响应时间更短。

本课题基于对 VoIP 业务模型的要求,对业务模型的算法进行了优化;基于吞吐量、公平性以及调度算法的要求,对基于 NodeB 控制的快速调度算法进行了优化,并对其性能进行了研究;基于证明改进正比公平调度算法的可行性、方便用户了解平台性能以及帮助完善平台的目的,对统计功能模块进行了设计以及对平台的性能进行了对比分析,文章的这些研究对 HSUPA 系统的研究与发展有着非常重要的实际意义。

## 1.4 课题研究内容与论文结构

本文主要针对几种典型的业务模型进行了研究,重点对 VoIP 业务模型的算法进行了改进,并进行了仿真验证其可行性;随后,针对 HSUPA 系统的特点,对基于 NodeB 控制的调度算法进行了研究,基于改善系统性能的目的,提出了改进的正比公平调度算法,并通过仿真证明其可行性,有效地提高了系统性能;为了进一步证明改进正比公平调度算法的可行性、方便用户对平台的了解和查看以及帮助完善平台,文章对统

计功能进行了设计，并对相关性能进行了分析。本文结构如下：

第1章绪论部分主要介绍了WCDMA系统的组成、协议结构、功能和特点，随后介绍了WCDMA系统和HSUPA系统的研究进展和现状，提出本文立题意义和目的。

第2章首先对HSUPA系统进行了简要介绍，包括HSUPA、R99 DCH和HSDPA协议结构的比较、新增的物理信道以及新增的MAC实体。本章重点介绍了HSUPA系统的关键技术：物理层混合重传HARQ机制、基于NodeB控制的快速调度和短帧长。然后，给出了每种技术的工作原理和特性，分析说明了关键技术的引用在一定程度上给系统的性能带来了很大的提高。

第3章搭建了HSUPA系统级的仿真平台架构，包括系统的运行过程和总体流程图。介绍了HSUPA系统级仿真方案，包括UE、NodeB、RNC的HSUPA功能模块的设计。系统级仿真平台就是为了能够更好地适应各种通信业务而设计的，所以文章对典型的四种业务模型进行了介绍，并针对VoIP业务模型现有算法存在的不足进行了改善，并进行仿真验证其可行性。

第4章首先介绍了系统级和链路级的仿真接口，链路级为系统级提供Ebnt-Bler曲线（信噪比-误块率）。然后，介绍了典型的基于NodeB控制的调度算法。包括轮循（RR）调度算法、最大C/I调度算法和正比公平（PF）调度算法。从吞吐量和公平性的角度详细分析了每种调度算法的优缺点，并基于正比公平调度算法的不足，提出了几种改进的调度算法，并进行仿真对比，证明其性能略好于正比公平调度算法。

第5章为了进一步证明改进正比公平调度算法的可行性、方便用户了解平台的性能指标以及帮助开发人员来完善平台，对HSUPA系统级仿真平台的统计功能进行了设计，并对相关性能进行了分析，进一步有效地说明了改进正比公平调度算法的可行性。另外，统计中将统计数据输出到excel表格中，视觉上特别规范和清晰。具有一定的实际应用价值。

## 第 2 章 HSUPA 关键技术

HSUPA 是 3GPP 在 R6 阶段推出的针对上行链路性能增强的技术，沿用了 R99 的大部分功能特性，唯一改变的是 UE 向 NodeB 传送数据的方式，例如基于 NodeB 控制的快速调度、快速上行物理层混合重传 HARQ 技术、更短的 TTI、高阶调制以及快速专用物理信道建立等方面。

### 2.1 HSUPA 系统简介

在 2002 年中期，3GPP 在 HSDPA 规范 R5 的第一版本成功定稿后就开始了 HSUPA 的规范化工作。HSDPA 提升了下行能力，但上行链路的能力与下行链路 HSDPA 之间并不匹配。因此，3GPP 着手研究上行链路性能的改善问题。3GPP 首先对 HSDPA 的技术进行了考察，如果可以，这些技术也可以用于上行链路。HSUPA 的概念由此诞生，并将其细化为规范。

作为 WCDMA 网络继高速下行数据传输技术之后的下一步演进方案，HSUPA 的目标是进一步改善上行链路的用户业务感受和提升网络上行性能，为新兴数据业务提供更高的上行数据传输速率和更低的时延。HSUPA 的优势是可提供更高的上行数据传输速率，支持灵活的部署方案和 QoS 保证能力。与 HSDPA 类似，HSUPA 采用了物理层混合重传 HARQ 机制、基于 NodeB 控制的快速调度、更短的 TTI 等关键技术，相应地带来了上行容量的增益和业务时延的减少。与 HSDPA 相比，HSUPA 采用同步的 HARQ，而 HSDPA 则采用的是异步 HARQ。

#### 2.1.1 HSUPA 与 R99 DCH 及 HSDPA 的比较

实际上，3GPP WCDMA 系统的 HSUPA 功能就是一个新的上行传输信道——E-DCH，它为上行链路所带来的特性就如同 HSDPA 新的传输信道——高速下行共享信道（HS-DSCH）给下行链路带来的特性。传输信道 E-DCH 支持基于 NodeB 控制的快速调度、具有增量冗余的快速物理层混合重传（HARQ）以及可选的更短的 2ms 传输时间间隔。与 HSDPA 不同的是，HSUPA 并非共享信道而是专用信道，并且从结构上讲，E-DCH 更像是具有快速调度和 HARQ 的 R99 DCH 而不是下行 HSDPA，即每个 UE 都有自己专用的到 NodeB 的 E-DCH 数据通道，它是连续的并独立于 DCH 和其他 UE 的 E-DCH。

表 2-1 列出了 DCH、HSDPA 和 HSUPA 采用的关键功能<sup>[4]</sup>。

表 2-1 HSDPA、HSUPA 和 DCH 对比

特征	DCH	HSDPA (HS-DSCH)	HSUPA (E-DCH)
可变扩频因子	是	否	是
快速功率控制	是	否	是
自适应调制	否	是	否
基于 NodeB 的调度	否	是	是
快速 HARQ	否	是	是
软切换	是	否	是
TTI 时长/ms	80、40、20、10	2	10、2

R99 版本中上行 DCH 传输信道终结于 RNC 侧，所以 RNC 主要负责执行数据调度和重传功能。而在 HSUPA 中，NodeB 端新增加的 MAC-e 实体主要负责执行快速调度和重传等功能，有效地减小了传输时延，还提高了重传速度。R99 版本的 DCH 协议结构<sup>[11]</sup>如图 2.1 所示。

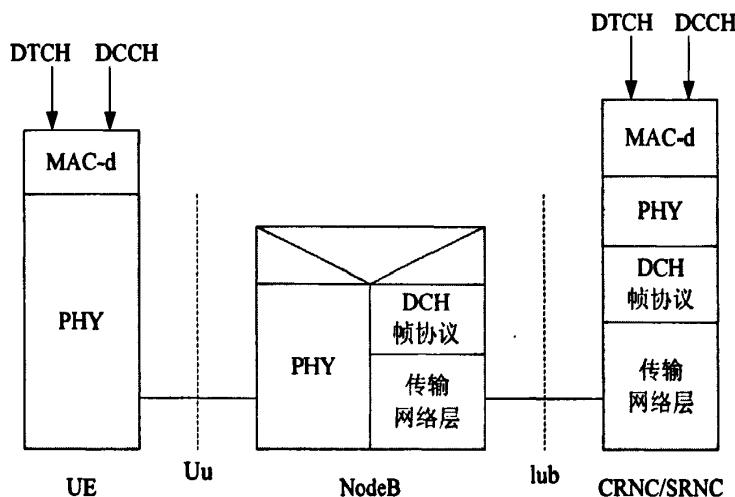


图 2.1 R99 中的 DCH 协议结构

HSUPA 中的 E-DCH 协议结构<sup>[11]</sup>如图 2.2 所示。

### 2.1.2 新增的物理信道

HSUPA 的功能并不独立，它的运行需要使用到 WCDMA R99 中大多数的基本功能。即小区选择、同步、随机接入、基本移动性流程等基本功能是 HSUPA 运行所必

须的，而且保持不变，唯一改变的是从 UE 到 NodeB 之间传送用户数据的新方法。也可以说，HSUPA 没有替代任何一项 R99 的功能，它更多的是叠加而不是替代。

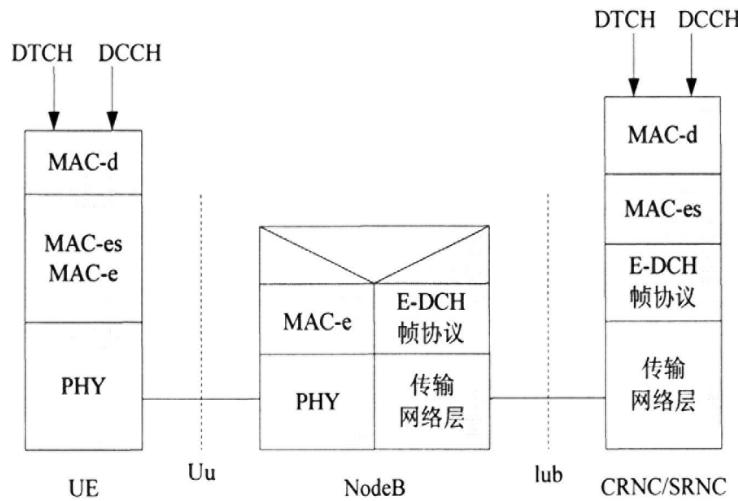


图 2.2 HSUPA 中的 E-DCH 协议结构

HSUPA 需要新增加的信道<sup>[11]</sup>，E-DPDCH、E-DPCCH、E-AGCH、E-RGCH 和 E-HICH。如图 2.3 所示。图中除了几种新增加的信道，下行方向只标注了 R99 的 DCH 信道。

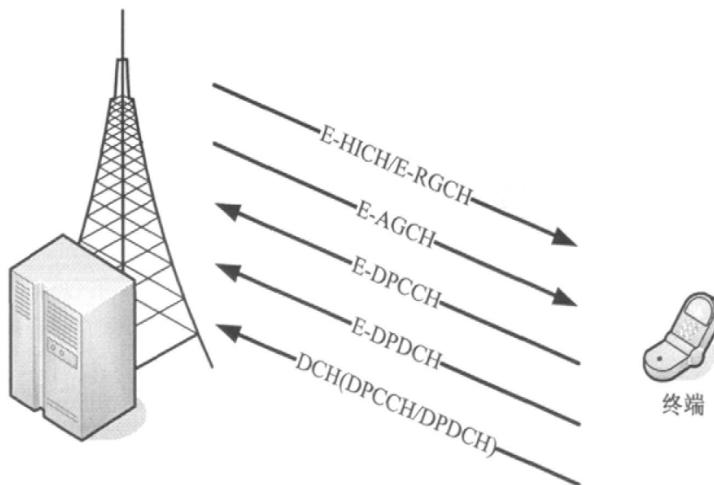


图 2.3 HSUPA 中的信道

(1)E-DPDCH (E-DCH dedicated physical data channel)：是上行链路物理信道，用来传输上行数据；调度信息 (SI) 在 E-DPDCH 中发送。E-DPDCH 的帧结构形式如图 2.4 所示。

(2)E-DPCCH (E-DCH dedicated physical control channel)：是上行链路物理信道，用来传输上行 E-DPDCH 的控制信息，包括传输格式 (E-TFCI)，传输次数 (RSN)，

满意比特 (Happy)。E-DPCCH 的帧结构形式如图 2.5 所示。

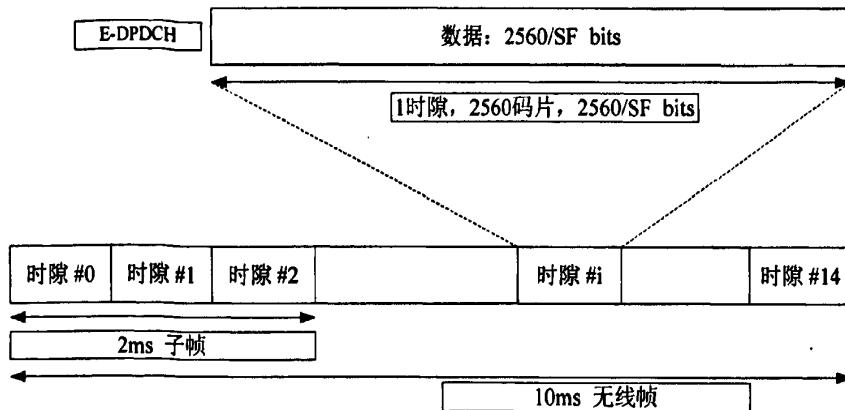


图 2.4 E-DPDCH 帧结构

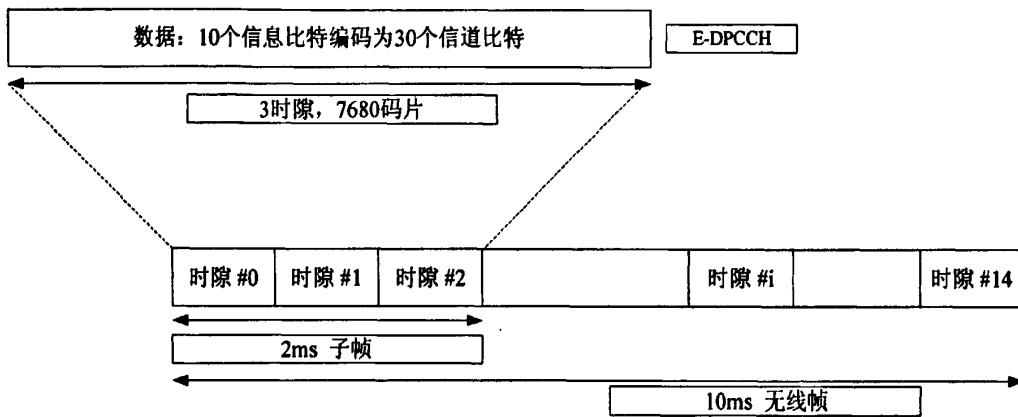


图 2.5 E-DPCCH 帧结构

(3)E-AGCH (E-DCH absolute grant channel) ——是一种用于传送 NodeB 调度程序判决绝对值的新的下行物理信道，该绝对值告知 UE 被容许的用于数据信道 E-DPDCH 传送的发射功率，即等效于告诉 UE 其可以使用的最大数据传输速率。E-AGCH 的帧结构形式如图 2.6 所示。

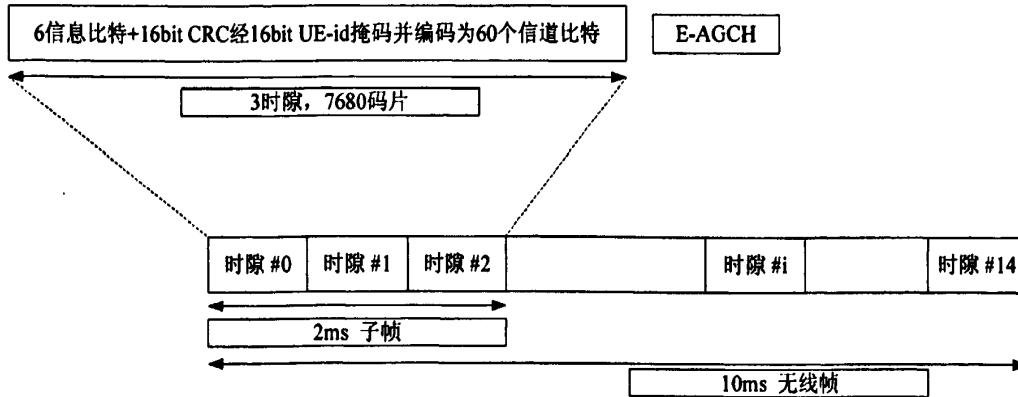


图 2.6 E-AGCH 帧结构

(4)E-RGCH (E-DCH relative grant channel) ——是一种用来传输递增或递减调度

指令的新的下行物理信道，调度指令将影响容许 UE 用于数据信道 E-DPDCH 传输的相对发射功率，从而有效调节上行数据速率的上升/下降。

(5)E-HICH (E-DCH HARQ acknowledgement indicator channel) ——是一种用来发送上行数据包传输确认或否认信息的新的下行物理信道，用于对传输数据进行 ACK/NACK 反馈。

E-RGCH/E-HICH 的帧结构形式如图 2.7 所示。

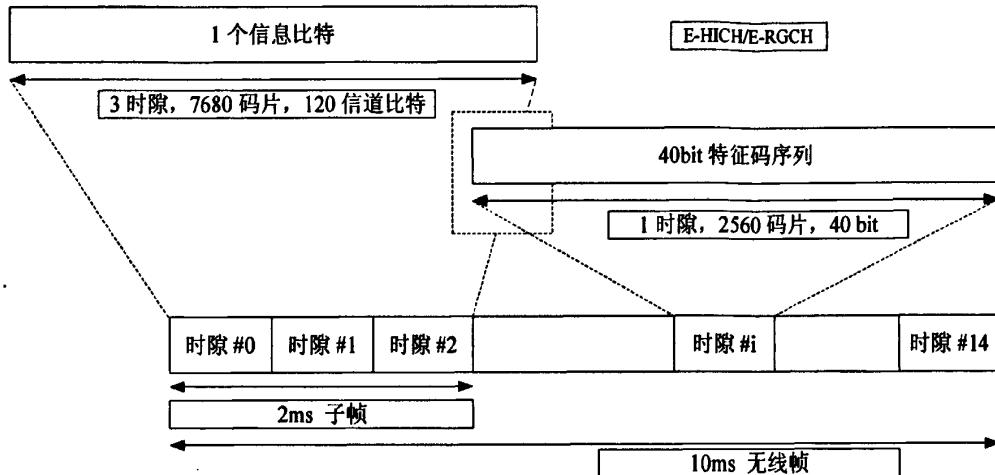


图 2.7 E-RGCH/E-HICH 帧结构

### 2.1.3 新增的 MAC 实体

基于演进的考虑，HSUPA 的设计要尽可能地兼容 R99 版本中定义的功能，在保持 R99 版本结构的同时以及 HSUPA 在引入新信道的同时，在 UE 端和 NodeB 端都有相应的新的 MAC 实体的引入。这是因为基站负责调度控制，但调度本身实际上控制的是 E-DCH 的上行数据传输。规范中并没有给出关于基站应该如何定义要发送给移动台何种类型控制信息的详细算法。但是，对 UE 则定义了用于控制终端的 MAC 层操作以及加在物理层之间的额外反馈（满意比特）。

在 MAC 层新增实体结构包括<sup>[3]</sup>：

(1)UE 终端增加的 MAC 实体 MAC-e/es。

主要负责处理 HARQ 信令、复用与 TSN 设置、E-TFC 选择等功能。

▲ HARQ 信令：主要负责完成与 HARQ 协议相关的 MAC 功能，并负责备份 MAC-e PDU 数据及其重传。提供 E-TFC、RSN 和用于物理层的功率偏置。

▲ 复用与 TSN 设置：主要负责将多个 MAC-d PDU 连接到 MAC-es PDU，并按照相应的 E-TFC 选择函数的命令将一个或多个 MAC-es PDU 复用成一个

MAC-e PDU。此外,还负责对每个逻辑信道的每个 MAC-es PDU 的 TSN 进行管理和设置。

- ▲ **E-TFC 选择:** 主要负责参考 UE 接收到的从 NodeB 发来的调度信息(相对授权和绝对授权)来进行 E-TFC 选择, 以及对映射到 E-DCH 上的不同的 MAC-d 数据流进行判别。

UE 端的 MAC-es/e 实体功能如图 2.8 所示。

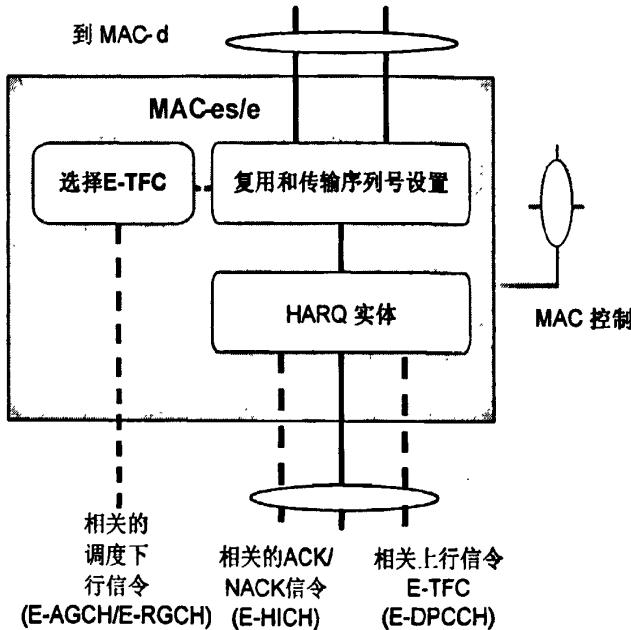


图 2.8 UE 端的 MAC-es/e 实体功能图

## (2)NodeB 端增加的 MAC 实体 MAC-e

主要负责处理 HARQ 信令、解复用、E-DCH 控制和 E-DCH 调度等功能。

### ▲ E-DCH 调度:

参考 UE 的调度申请对不同的 UE 进行具体分配 E-DCH 小区资源。

▲ **E-DCH 控制:** 负责接收调度请求和发送分配给各个 UE 的调度。即: 把绝对授权和相对授权发送给当前的 HSUPA 用户。

▲ **解复用:** 对 MAC-e PDU 运用解复用, 将 MAC-es PDU 分解到相应的 MAC-d 流。

▲ **HARQ:** 同一 HARQ 实体可以支持多个 HARQ 协议进程。每个进程负责产生用于指示 E-DCH 的数据传输状态, 用 ACK 或 NACK 来标识。

NodeB 端的 MAC-e 实体功能如图 2.9 所示。

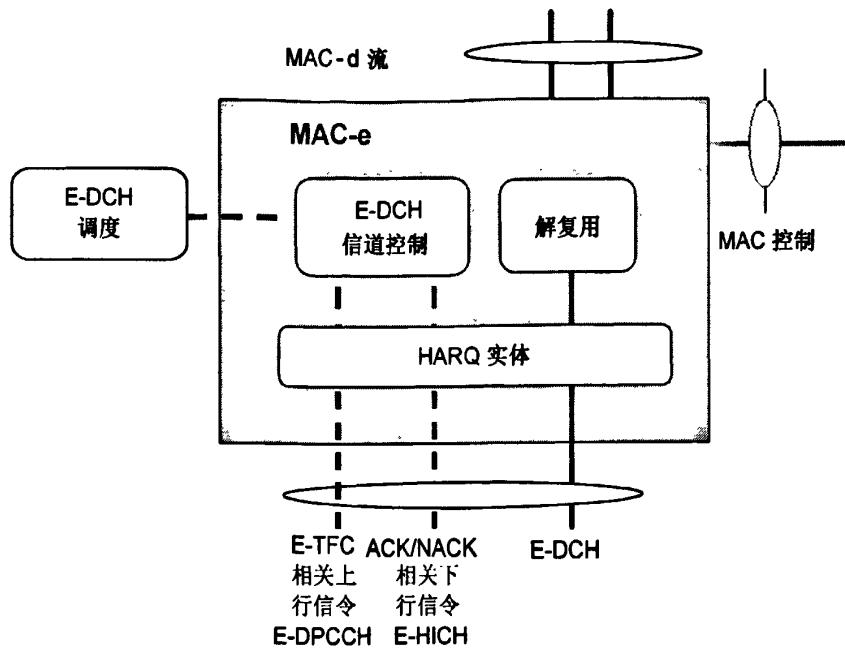


图 2.9 NodeB 端的 MAC-e 实体功能

(3)在服务无线控制器 RNC 端增加了 MAC 实体 MAC-es。

主要负责处理解复用和软切换状态下多个 NodeB 数据包的合并等功能。RNC 中的 MAC-es 实体专门负责 E-DCH 的处理。

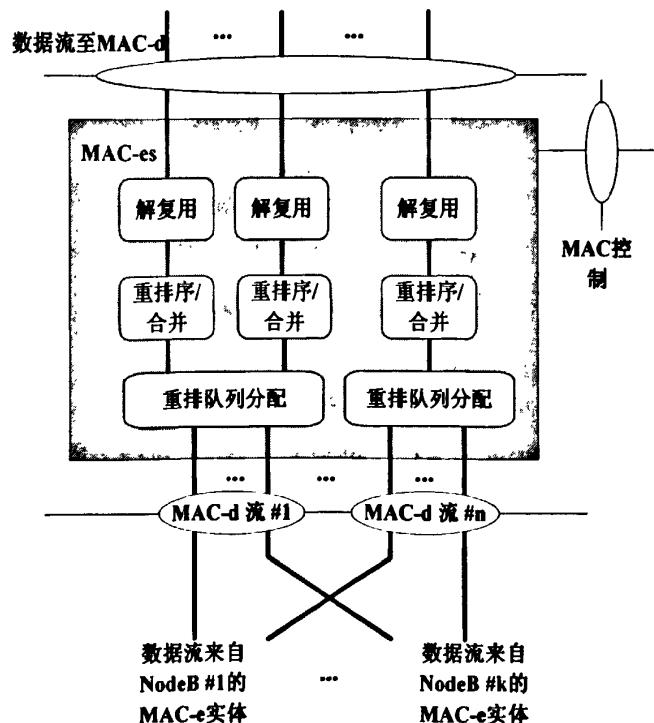


图 2.10 RNC 端的 MAC-es 实体功能图

▲ 解复用：负责将 MAC-es PDU 进行分解。在分解 MAC-es PDU 时，首先要把 MAC-es 头删掉，并取出 MAC-d PDU，之后上传给 MAC-d 实体。

▲ 重排序队列分配：来自不同的 MAC-d 数据流中的数据在不同的重排序队列中被重排。每个逻辑信道有一个重排序队列。

RNC 端的 MAC-es 实体功能如图 2.10 所示。

## 2.2 HSUPA 关键技术

HSUPA 主要采用了三种关键技术：物理层混合重传、基于 NodeB 控制的快速调度以及 2ms TTI 的短帧传输。

### 2.2.1 物理层混合重传 HARQ

在复杂多变的无线环境中，基于提高数据正确接收率的目的，提出重传技术——自动重传请求（Automatic Repeat Request，ARQ）。ARQ 技术在 R6 版本中得到了继承和改进。HARQ 将前向纠错（FEC）技术和重传技术进行了有效地结合。在无线移动信道中，时变和多径的衰落特性导致了较高的误码率。因此 HARQ 技术被应用到了物理层，一方面，FEC 可以对错误进行纠正，另一方面，ARQ 能够对 FEC 不能纠正的错误进行补救，进而降低误码率。提高系统正确接收率，进一步提高了系统性能。

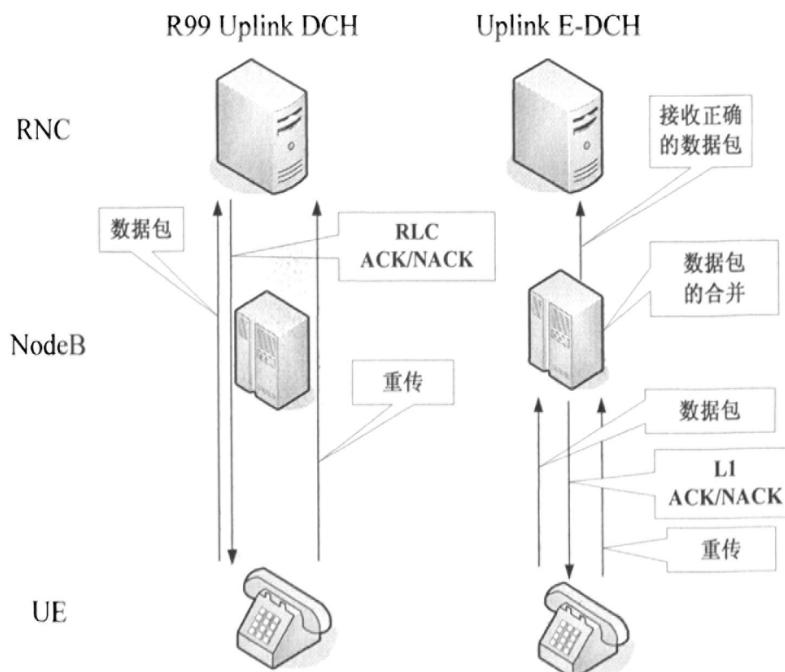


图 2.11 HSUPA HARQ 的原理图

对 R99 和 HSUPA 中 HARQ 机制的原理进行了比较如图 2.11 所示。

HARQ 的基本原理是在 NodeB 中增加 HARQ 实体，当 NodeB 端收到移动终端 UE 发送的数据包后，NodeB 端进行解码，根据解码正确与否通过空中接口向移动终端发送信息 ACK/NACK。移动终端通过收到的指示 ACK/NACK，决定是否重传数据包。在 HARQ 机制中还融合了软合并和增量冗余技术，有效地提高了重传数据包的正确接收率。通过 HARQ 技术，HSUPA 有效地提高了数据传输速率，减小传输时延。

HSUPA 中的 HARQ 技术具有以下特点<sup>[3]</sup>：

(1) 基于停止等待 HARQ；

在 HSUPA 中，HARQ 采用 N 信道停止和等待 HARQ 协议。这样，UE 就可以连续地发送数据包而不需要停下来等待 ACK/NACK。NodeB 根据数据的解码情况，发送 ACK/NACK 信息，当 UE 收到 NACK 信息时，重传该数据。反之，则不需要重传该数据。

(2) 基于同步的下行 ACK/NACK；

(3) 基于同步的上行重传；

(4) HARQ 的进程数依赖于 TTI 的大小。2ms 的 TTI 对应的进程数是 8，10ms 的 TTI 对应的进程数是 4。

(5) 将 HARQ 的重传次数设置了上限。

对于每次传输的数据包，UE 都会在 E-DPCCH 上相应地发送一个 HARQ 序列号 (RSN)。RSN 是一个 2bit 的值，表示重传数据包的次数。一个传输块首次传输的 RSN=0，第一次重传 RSN=1，第二次重传 RSN=2，所有之后的重传 RSN=3。当数据成功译码或达到了预先定义的最大重传次数时，这种移动台和基站之间的重传操作就此结束。但如果达到最大重传次数时，还是没有解对，NodeB 就会丢弃这个数据包。并上报 RNC 没有解对这个数据包的消息，然后 RNC 会通知 UE 再次进行重传。

(6) 具有 HARQ 功能的 E-DCH 支持相同 NodeB 内以及不同 NodeB 之间的宏分集。

(7) HARQ 协议支持软合并技术和增量冗余技术<sup>[11]</sup>。

**软合并：**通常也被称为跟踪合并和完全重传。在此情况下，每次传输速率适配是相同的，并且速率适配后总是得到相同的发送比特。无论重传多少次，对同一数据包的每次传输，都进行相同的速率适配。即重传的分组和之前发送的分组完全相同。软合并<sup>[4]</sup>原理如图 2.12 所示。

**增量冗余：**也叫非完全重传，在每次重传时使用不同的速率来进行适配。校验比特和系统比特的相对数量都是变化的，即重传的分组中包括了额外的冗余信息。增量冗

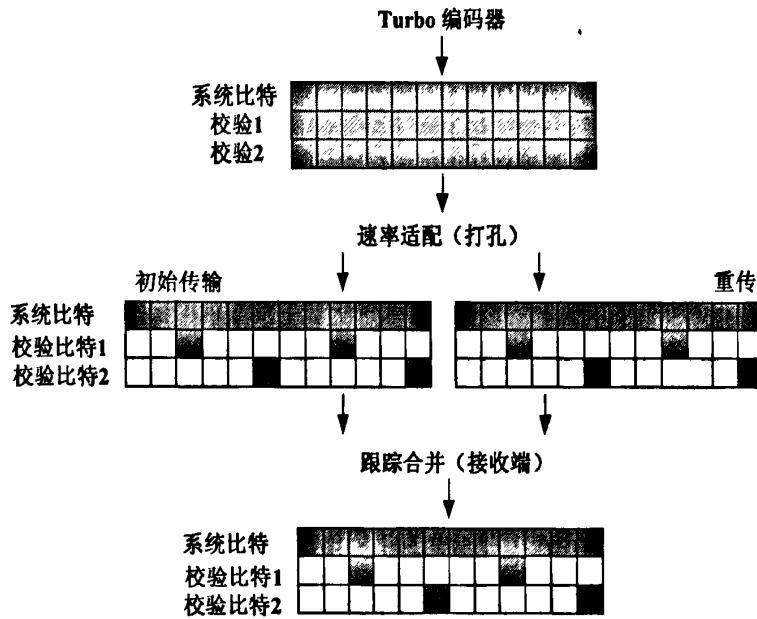


图 2.12 完全重传的跟踪（软）合并原理

余方式相比软合并方式要求接收机要具有更多的内存，并且需要用户设备支持这种方式。另外，支持完全重传参数并且具有更大内存的终端即使按最大数据速率计算也能处理增量冗余<sup>[4]</sup>。增量冗余原理如图 2.13 所示。

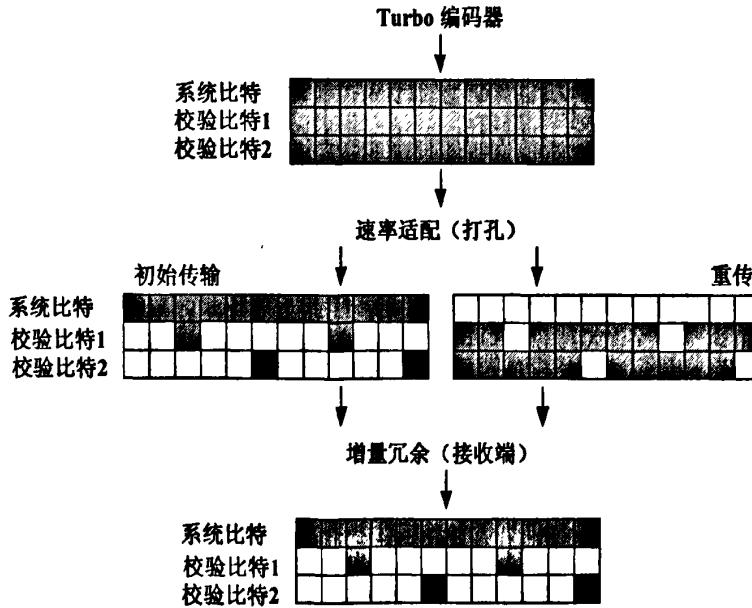


图 2.13 增量冗余 HARQ 原理

HSUPA 在激活集大于 1 的情况下工作会对 HARQ 产生其他影响。HSDPA 的 HARQ 处理只涉及一个 NodeB，而 HSUPA 的 HARQ 处理则涉及激活集中的所有 NodeB。HSUPA HARQ 使用了与上行功率控制类似的规则。如果激活集中某一 NodeB

发送了一个 ACK，那么传递给 MAC 层的信息就是 ACK 已经接收到，而且 MAC 层将认为传输是成功的，并进行下一个数据包的传送。在软切换状态下的 HARQ 工作原理如图 2.14 所示<sup>[4]</sup>。

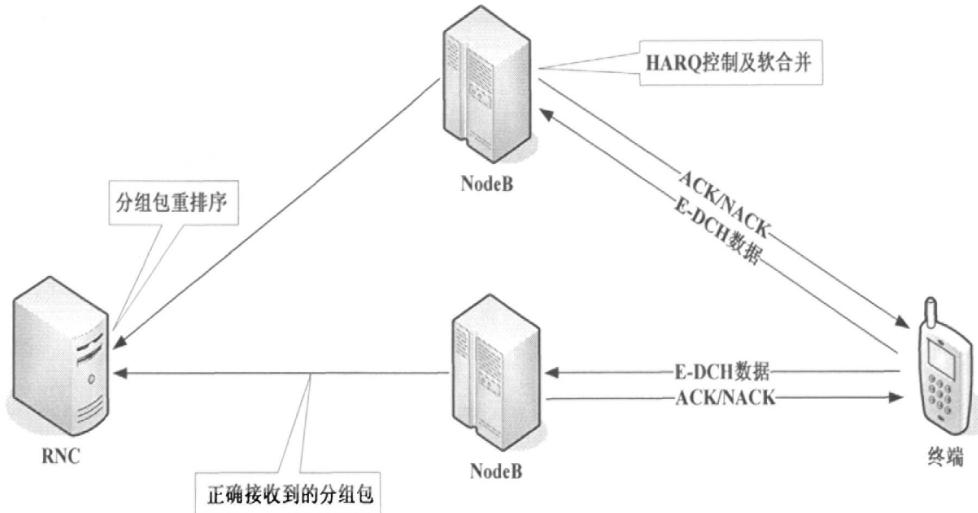


图 2.14 处于软切换状态下的 HSUPA HARQ 工作原理

由于不同 NodeB 的处理过程是独立的，因此分组的顺序将无法保证，这样必须通过 RNC 来调整。在 HSUPA 协议架构中，RNC 上增加了 MAC-es，其中的重排实体即负责完成顺序的调整任务。

对于非服务小区，NACK 的映射被定义为零序列，因此除服务小区外的其他小区实际上并没有传送这些 NACK。如果服务小区和其他在相同的 E-DCH 无线链路集中的小区处于更软切换，那么类似于更软切换状态下的功率控制指令接收，所有这些小区都会发送 NACK 以便接收机进行合并。从而带来软切换增益，降低发射功率，提高正确接收率。

## 2.2.2 基于 NodeB 控制的快速调度

在无线通信系统中，调度的思想是合理地分配系统所拥有的有限共享资源，在合理的情况下，尽可能地让资源利用率达到最高。在以前的版本如 R99/ R4/ R5 中，由 RNC 控制用户 UE 的上行调度和传输速率。RNC 通过和 UE 之间的网络层信令(RRC)来进行调度控制。由于 RNC 不能从移动终端获得相应的反馈信息，进而无法准确地控制移动终端的传输速率，这样也会带来比较大的延时。在 R5 中，为了尽可能地接近无线接口并能以最小的延时来进行调度判决，HSDPA 把下行调度从 RNC 下移到 NodeB。HSUPA 也遵循此原则将上行调度下移到 NodeB，但 HSUPA 和 HSDPA 的相

似点也就止于此。

HSUPA技术是将物理层的调度功能放在NodeB中来实现，即基于NodeB控制调度的主要思想是实现由NodeB控制移动终端UE的传输。HSUPA中的上行调度主要是由NodeB中新增的MAC-e实体来完成的。在每个TTI中，移动终端都会向NodeB汇报当前移动终端的情况，NodeB会根据当前移动终端的反馈信息以及小区负载和调度措施等信息来决定是否调度该移动终端，并通过下发调度授权（SG）来告知移动终端是否容许发送。如果用户想拥有更高的数据传输速率的话，可以向NodeB发送调度申请，NodeB会综合考虑当前移动终端的情况，决定是否容许移动终端的请求。总之，最大的一个特点就是移动终端与NodeB之间通过反馈信息来较好地实现合理分配系统有限资源的特点。由于NodeB与UE之间是直接传输的，相比R99，不仅大大地减小了延时，而且由于具有反馈的特点，使得基于NodeB控制的调度机制可以灵活地控制移动终端的传输，合理地分配了系统资源。这一机制使得系统可以接纳大量高数据速率的UE，并且可以快速适应系统干扰的变化，从而达到增加小区吞吐量的效果和用户使用高速率业务的概率。

NodeB调度传输具有如下特点<sup>[3]</sup>：

- (1)NodeB根据接收到的UE发来的调度参考信息以及上行干扰等情况来决定分配给UE的调度授权值；
- (2)NodeB通过E-AGCH和E-RGCH来进行调度授权值的更新，可以针对一个UE或者一组UE；
- (3)NodeB所分配的调度授权是对所有MAC-d数据流的；
- (4)NodeB所分配的调度授权可以是针对某个HARQ进程的；
- (5)NodeB控制的调度传输可以更好地利用RoT特性；
- (6)NodeB控制的调度传输主要用于高速非实时业务。

NodeB控制调度的信令：

- (1)上行控制信令：调度指示（SI）信息和满意（Happy）比特。

为了确定各用户的上行数据传输速率和发送功率，调度器必须知道各个用户的业务流队列的状况，可用的功率等信息，这些信息称为SI。Happy比特只包含一个比特，指示UE是否“满意”调度器分配的资源。

- (2)下行控制信令：绝对调度授权、相对调度授权。

绝对调度授权提供了UE可用的上行最大资源，相对调度授权表示UE在前一次调度使用的资源的基础上增加或减少一个相对值。绝对调度授权中包含有针对每一次

HARQ 进程最大容许使用的 E-DPDCH/DPCCH 功率比。调度授权只用于 HSUPA 中的 E-DCH 的 E-TFC 选择算法。原来的 TFC 算法不受影响。调度周期可以按每个 TTI 或者多个 TTI 调度一次。

### 2.2.3 短帧长

HSUPA 系统支持 10ms 和 2ms 两种类型的 TTI。2ms 的 TTI 能够有效地减小空中接口的传输延时，并且用户 UE 和基站 NodeB 之间相应的处理时延也会明显降低，能够有效地配合 HARQ 和快速调度的使用，使得网络和终端的吞吐量有所提升。此外，2ms TTI 的使用能够明显提高系统的响应速度，进而有效地提高了终端用户 UE 的服务质量（QoS）。

但是，2ms TTI 也存在以下不足：

- (1) 存在 UE 功率资源受限而引发的上行链路覆盖问题；
- (2) 2ms TTI 帧头字节开销比例大，相对效率低；
- (3) 由于传输时间间隔的减小，相比 10ms TTI，交织增益下降；
- (4) 压缩模式下，2ms TTI 的处理过程要比 10ms TTI 更加复杂。

如果到达小区边缘，就会产生一个问题，使用 2ms TTI 的信号要消耗大量的传输功率。小区有非常多的用户希望同时被激活，因此，这时想要提供下行信号给大量 2ms TTI 用户就会变得不太可能。因此，为了小区边缘的用户可以正常工作，HSUPA 中仍然保留了 10ms TTI 来保障小区边缘的覆盖效果。所以，当处于信道条件较好的情况下，使用 2ms 的 TTI。反之，使用 10ms 的 TTI，而且保留 10ms 的 TTI 有助于继续使用 R99 版本的信道结构。

关于业务类别，3GPP 有相关的规定，对于任意类别的业务都可以使用 10ms 的 TTI，而部分应用可以使用 2ms 的 TTI。当数据速率不到 2Mbps 时，这两种 TTI 类型支持的容量差别不大。相反，当数据速率大于 2Mbps 时，只能采用 2ms 的 TTI。

## 2.3 本章小结

本章首先对 R99 DCH、HSUPA 和 HSDPA 的相关性能进行了比较，对 DCH 和 E-DCH 的协议结构进行了对比。然后，介绍了新增的物理信道和新增的 MAC 实体的功能。最后，着重介绍了 HSUPA 系统的关键技术，其中包括物理层混合重传 HARQ 机制、基于 NodeB 控制的快速调度、短帧长。其中，基于 NodeB 控制的快速调度为后续介绍的调度算法提供了理论依据。

## 第3章 HSUPA 系统级仿真方案设计及业务模型

### 3.1 系统仿真概述

HSUPA 是 R6 的技术特征，相比 R5，明显地提高了上行的接收性能，如增加了系统容量和用户的分组呼叫流量，以及减小了端到端的分组包延时。HSUPA 主要采用的三种关键技术包括基于 NodeB 控制的快速调度、物理层混合重传和 2 ms 的短帧 (TTI) 传输。关键技术的使用，使得用户 UE 获得尽可能多的数据发送功率，从而提高了上行吞吐量。

链路级仿真主要是对物理层的相关技术进行仿真，与链路级仿真相比，HSUPA 系统级仿真实际上就是包括多小区和多用户的宏观上的一个仿真。在系统级仿真平台的设计上，主要是对无线网络的公共平台结构和特性以及 HSUPA 专有平台结构和特性进行的模拟建模。通过系统级仿真能够获得系统一级的性能指标，并通过这些性能指标有效地验证了 HSUPA 所采用的关键技术、算法及参数配置情况。为后续的开发设计提供了技术依据和测试参考。

### 3.2 系统仿真架构

公共平台和 HSUPA 平台构成了 HSUPA 系统级仿真平台。小区布局、传播模型、衰落、天线模型和常规功率控制等公共元素以及 R99 和 R5 所支持的物理信道、传输信道以及业务模型构成了公共平台。HSUPA 相关的物理信道、传输信道和逻辑信道以及在 NodeB 和 RNC 中的处理构成了 HSUPA 平台。核心内容 MAC-e/es 的处理为 HSUPA 的主要特点。如调度算法等。

#### 3.2.1 HSUPA 系统运行过程的描述

HSUPA 系统运行过程主要有以下几个步骤<sup>[6]</sup>：

- (1) 将仿真需要的参数进行初始化；
- (2) 描述小区和基站的位置，并创建小区模型和基站模型；
- (3) 描述 UE 的位置以及 UE 移动后的更新位置，创建终端 UE 的模型；
- (4) 根据已有的几种信道模型计算出相应的路径增益；
- (5) 综合考虑 UE 的反馈信息以及小区的干扰程度，NodeB 中各个小区对 UE 发送 AG/RG；
- (6) UE 根据调度器的命令计算出相应的性能指标，进行相应数据发送；

(7)NodeB 参考控制信道对接收到的数据进行合并，并发送 ACK/NACK 信息；通过对上行 RoT 的测量，发送 AG/RG 信息；并向 RNC 汇报 HARQ 重传情况；

(8)统计系统性能指标。如流量、平均数据时延、UE 平均发射功率、平均噪声抬升量、误块率、掉话率和 UE 公平度等指标。

### 3.2.2 HSUPA 系统的总体流程

系统级仿真工作流程如图 3.1 所示。

## 3.3 功能模块设计

### 3.3.1 UE 的 HSUPA 功能模块设计

#### (1)业务产生模块<sup>[5]</sup>

根据不同的业务类型，选择不同的业务模型和 QoS 参数与之对应，产生仿真周期内的业务量和时间间隔数组。

#### (2)UE 的 QoS 控制模块<sup>[5]</sup>

参照 UE 业务对 QoS 的要求、逻辑信道的优先级划分和缓冲区的大小，UE 向基站 NodeB 端发送调度请求，申请调度。

#### (3)发送端 HARQ 模块<sup>[5]</sup>

UE 中的 MAC-e 实体主要负责处理 HARQ 功能的发射端。HARQ 提供了传输组合格式、重传次数 (RSN) 和物理层使用的功率偏差。根据 TTI 的不同设置，有 4 个或 8 个 HARQ 进程与之对应。

#### (4)MAC-d 到 MAC-e/es 复用模块<sup>[5]</sup>

负责把 MAC-d PDU 打成 MAC-es PDU 包，并把一个或多个 MAC-es PDU 打成一个 MAC-e PDU 包。

#### (5)E-TFC 选择模块<sup>[5]</sup>

给 UE 的 HARQ 实体配置 NodeB 的资源指示 AG 和 RG，并将参考功率偏差转换为相应的 E-TFC。

#### (6)物理信道的发送和接收模块<sup>[5]</sup>

发送模块：把 E-TFC 放入 E-DPCCH 中，把业务数据放入 E-DPDCH 中，并计算设置当前 UE 的发射功率。

接收模块：接收合并下行增强信道 E-RGCH/E-HICH，E-AGCH，译码得出当前用户 UE 的 AG/RG 和 ACK/NACK 反馈信息。

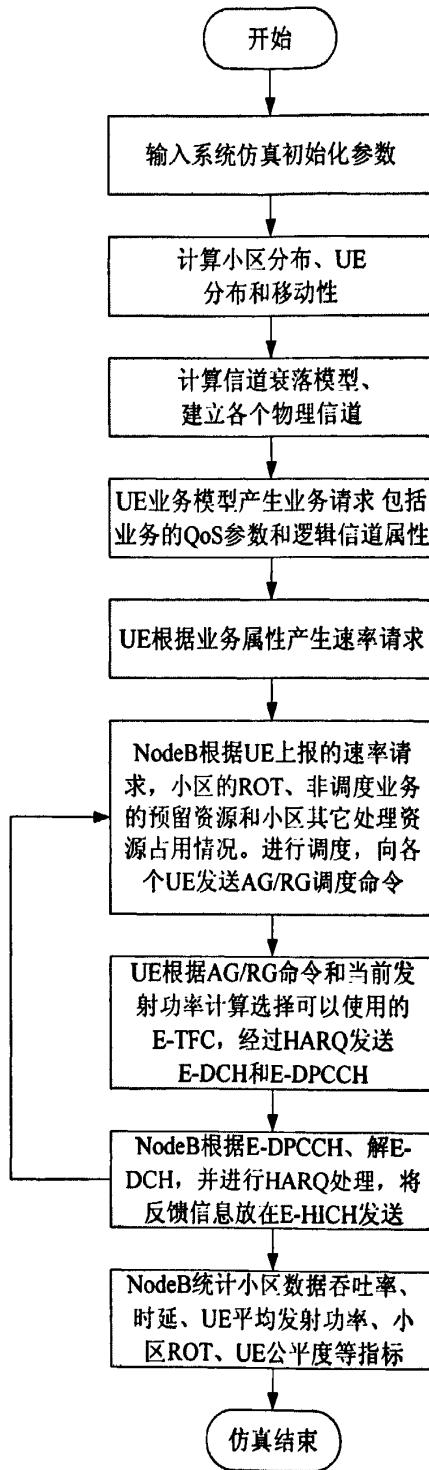


图 3.1 HSUPA 系统级仿真工作流程

### 3.3.2 NodeB 的 HSUPA 功能模块设计

(1) E-DCH 的调度算法模块<sup>[6]</sup>

负责协调和管理用户 UE 间的增强上行信道的小区资源，基于 UE 的调度请求，来决定和传输调度分配。

(2)E-DCH 的控制模块<sup>[5]</sup>

负责 SR（调度申请）的接收和调度分配的发送。

(3)解复用模块<sup>[5]</sup>

主要负责对 MAC-e 的 PDU 解复用。

(4)HARQ 接收模块<sup>[5]</sup>

执行多进程的 HARQ 协议，负责接收并合并多次重传的 TTI 数据，每个进程都要负责产生 ACK 或 NACK。

(5)无线资源的测量模块<sup>[5]</sup>

负责测量计算特定小区的噪声抬升量 ROT。

(6)物理信道的发射和接收<sup>[5]</sup>

发射模块：在信道 E-RGCH/E-AGCH 和 E-HICH 中，分别放入当前用户的授权值 RG/AG 和信息 ACK/NACK。

接收模块：从 E-DPCCH 中求出 E-TFC 和重传等信息，并计算出当前数据对应的 HARQ 进程数。

### 3.3.3 RNC 的 HSUPA 功能模块设计

(1)MAC-es 模块<sup>[5]</sup>

MAC-es 是被放在 RNC 中来实现功能的，主要功能包括重排序队列分发功能、重排序功能、宏分集选择功能和拆解功能。

(2)业务终结模块<sup>[5]</sup>

根据 UE 的业务请求，给 UE 的每个 MAC-d 分配 HARQ 属性、传输组合格式和数据描述指示，为每个 UE 分配索引，根据 MAC-d 还原逻辑信道，以及统计数据业务的时延和吞吐率。

(3)E-DCH 外环功率控制模块<sup>[5]</sup>

RNC 通过每个 MAC PDU 的重传次数来调整当前的功率偏移，并赋给 UE 侧的 MAC-d 的功率偏移量属性。

## 3.4 UMTS 业务类型

从技术的角度讲，3G 最本质的特征就是提供带 QoS 的高速用户的传输速率，为

满足新业务的要求而定义和设计的。所以在系统级仿真平台中，业务模型是问题的来源。在 2G 系统中，应用最广泛的是语音与简单的数据业务。在 UMTS 中，高速流媒体和视频业务等多媒体宽带业务则是典型的新通信业务，在此之上，又衍生出各种各样的应用<sup>[6]</sup>。

UMTS 按照用户或应用的 QoS 请求，通常将业务类型划分为四种：会话业务、数据流业务、交互业务和后台业务。这四种业务模型的主要差别在于它们对时延有着不同程度的敏感度。其中，会话业务对时延的敏感程度是最不宽松的，而后台业务则是对时延要求最为宽松的<sup>[6]</sup>。

UMTS QoS 的区别如表 3-1 所示。

表 3-1 UMTS QoS 的业务区别

业务类型	会话型业务 (实时)	数据流型业务 (实时)	交互性业务 (尽力而为)	后台型业务 (尽力而为)
功能特性	在信息流单元之间保持时间关系，要求低时延	在信息流单元之间保持时间关系	要求确认，保持有效负载内容	接收方对所要接收的信息无严格的延时要求，保持有效负载内容
应用举例	语音	视频流、音频流	www 浏览、网络游戏	E-mail 的后台下载

### 3.4.1 会话业务模型

会话业务主要应用于实时业务，包括电路交换承载的话音业务，也可以通过互联网和多媒体，由 VoIP 和视频电话提供。会话业务对时延的要求最为严格。VoIP 业务是会话业务的典型代表。

VoIP 的原理是通过语音压缩设备对语音信号进行压缩编码处理，再把这些语音信号根据相关协议进行打包，经过 IP 网络把数据包传送到目的地，再把这些语音数据包串起来，经过解压解码处理后，恢复成原来的信号，从而达到由 IP 网络发送语音的目的。

VoIP 业务模型对参数的设置有一定要求。呼叫持续时间服从均值为 60s 的负指数分布。通过 50% 的静默周期和激活周期来模拟不连续传输。激活时间和静默时间都要服从均值为 3s 的负指数分布。并且在激活周期内，要保证声码器每隔 20ms 产生一个 244 bit 的语音包<sup>[6]</sup>。

VoIP 业务模型主要是为了产生 VoIP 业务的所有信息。但是，基于原高通平台的

VoIP 业务模型使静默时间总是延长一个 TTI 或者两个 TTI, 很难保证静默时间很好地服从负指数分布的特点, 并且也不能保证每隔 20ms 都产生一个数据包的特点。

### 3.4.2 数据流业务模型

数据流业务也主要是用于实时业务。随着互联网的发展, 流式技术变得愈加重要, 采用流式技术, 客户浏览器或插件在文件传送的同时可以显示播放数据<sup>[2]</sup>。视频业务是数据流业务的典型代表, 这里主要对视频业务进行相关介绍。视频业务模型主要是为了产生视频业务的所有信息。采用速率为 64kbps 的源视频流, 视频业务模型参数配置如下表 3-2 所示。

表 3-2 视频业务模型参数配置

信息种类	帧到达时间间隔	每帧中的分组数 (时间片)	数据包大小	数据包到达 时间间隔
分布	动态分布 (均值为 10fps)	动态分布	pareto 分布 平均值=100bytes 最大值=250bytes	pareto 分布 平均值=6ms 最大值=12.5ms
分布参数	100ms	8ms	k=40bytes a=1.2	k=2.5ms a=1.2

### 3.4.3 交互业务模型

这种机制用于终端用户在线地向远端设备(例如服务器)请求数据。例如 WWW、Telnet、Ftp 和 News 等。交互业务是典型的数据通信机制, 特征是其终端用户的请求—响应模式。数据传输的往返时延和较低误码率是关键的参数<sup>[2]</sup>。Ftp 业务是交互型业务的典型代表, 这里主要对 Ftp 业务进行相关介绍<sup>[6]</sup>。Ftp 业务模型参数的配置如表 3-3 所示。

表 3-3 Ftp 业务模型参数配置

	分布	参数	分布函数
文件 大小	正对数 (Truncated)	均值=2MB 标准差=0.772 最大值=5MB	$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[\frac{-\ln^2(x/\mu)}{2\sigma^2}\right], \quad x \geq 0$ $\sigma = 0.35, \quad \mu = 14.45$
读取 时间	指数	均值 180sec	$f_x = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$ $\lambda = 0.006$

基于分组大小的分布统计, 76%的数据包大小为 1500bytes, 24%的数据包大小为 576bytes。然后再拆分成多个 336bit 的小数据包<sup>[6]</sup>。Gaming 业务模型参数配置如表 3-4 所示。

表 3-4 Gaming 业务模型参数配置

参数	值		备注
	类型 1	类型 2	
平均呼叫时延 (s)	5	5	指数分布
平均读取时间 (s)	5	5	指数分布
数据包大小 (bytes)	576	1500	固定
数据包到达平均时间 (ms)	40	40	对数分布, 40ms 标准差
分组业务最终平均数据速 (kbps)	115	300	

### 3.4.4 后台业务模型

后台业务主要应用于传统因特网业务。后台业务类型也是基本的数据通信机制, 具有在规定的时间内目的地并不期待数据到来的特点, 即对发送时间不敏感。另外, 分组数据不需要透明地传送, 但是数据必须无差错地接收<sup>[2]</sup>。

## 3.5 改进的 VoIP 业务模型

针对高通平台中 Matlab 编程实现的 VoIP 业务模型设计的不足, 在原有思想的基础上, 针对不足之处进行了改进。并用 C++ 编程实现了改进后的算法, 并且进行了仿真验证其可行性。改进后的算法设计流程图如 3.2 所示。

其中, 在流程图中, 剩余时间就是为了调整 20ms 发送一个数据包的一个变量, 并没有实际意义, TTItime 指的是传输时间间隔, 可以选取 10ms 或者 2ms。

语音通信是激活期和静默期的交替过程, 当激活期结束后, 系统进入静默期, 静默期结束后, 系统又进入激活期, 如此交替下去, 直到达到了规定的门限值时, 将结束语音通信。算法的设计思想主要是随机地产生激活时间、静默时间和剩余时间, 这也是新算法改进的关键之一。为了方便, 这里随机产生的激活时间和静默时间都是 TTItime 的整数倍, 随机产生的剩余时间是 1 到 100 的整数。当激活时间大于 0 时, 系统将处于激活期, 反之系统将处于静默期。在激活期内, 以 TTItime 为粒度, 激活时间逐渐减小, 同时通过条件限制, 主要是把剩余时间与 TTItime 进行对比, 使得每 20ms 发送一个数据包。当激活时间减小到 0 时, 系统进入静默期。同样也以 TTItime

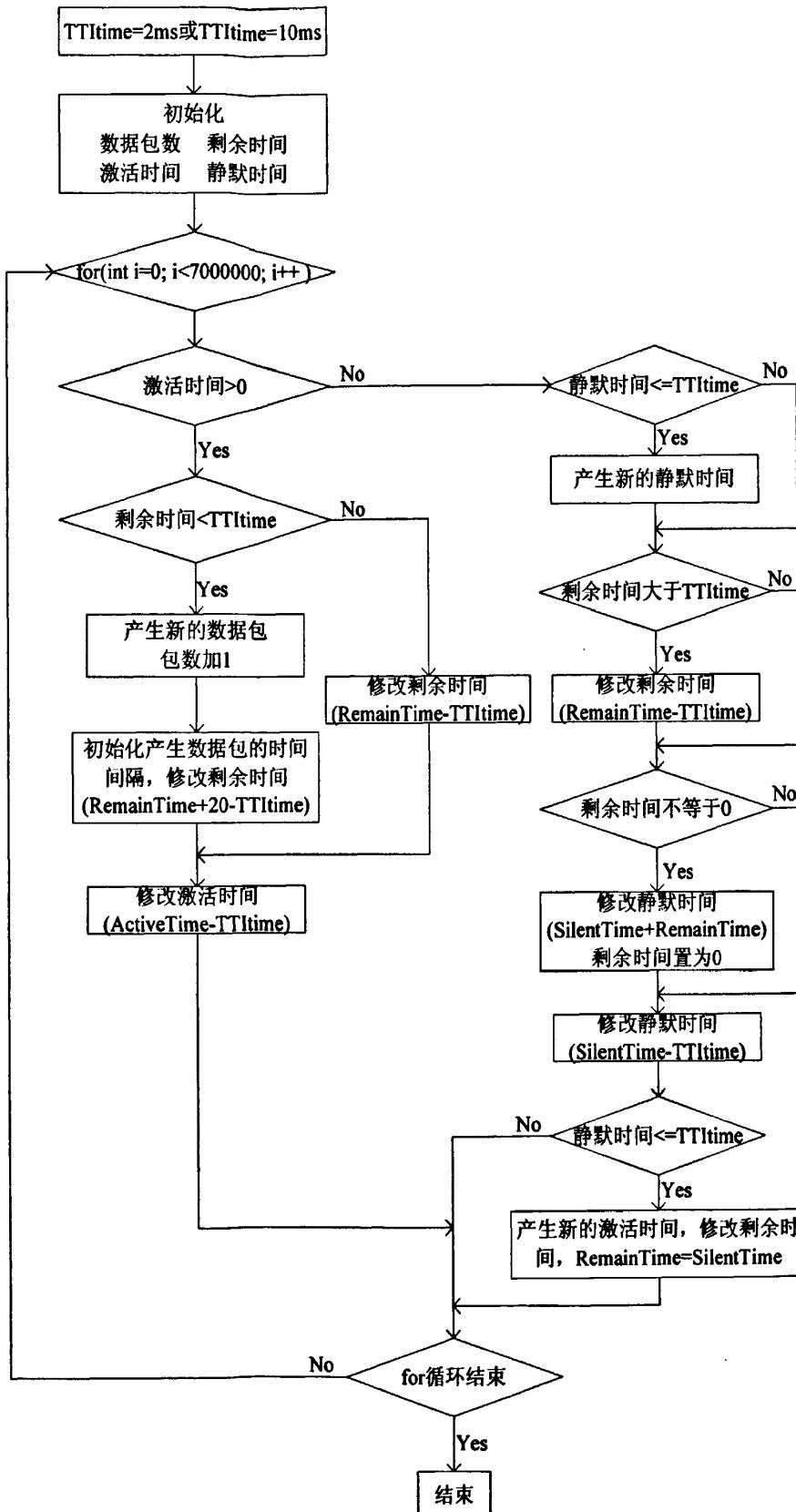


图 3.2 VOIP 业务模型仿真平台流程图

为粒度，静默时间逐渐减小。与激活期不同的是，在静默期内没有数据包产生。

需要注意的是，针对业务模型算法设计的不足，主要对静默期的算法进行了改进，激活期的算法不变。算法改进的另一关键之处是如何从静默期过渡到激活期，这里主要通过剩余时间与  $TTltime$  进行对比来决定系统进入激活期还是静默期。主要体现在系统又随机产生了一个新的激活时间。

## 3.6 仿真结果与性能分析

VoIP 业务模型的不足之处就在于静默期有延时，静默时间不能很好的服从负指数分布的特点，针对这样的问题，本章对 VoIP 业务模型的静默期在算法上进行了重新设计。与高通平台中提供的业务模型相比，不同之处就在于静默期的算法不同，激活期不变。

### 3.6.1 原算法的激活期

连续选取 10000 个激活期，激活时间选取每个激活期的初始激活时间。横轴表示激活时间，纵轴表示百分比，也就是累积分布值。计算累积分布值也就是计算在  $t$  时间内的激活时间个数占总的激活时间个数的百分比。选取激活时间范围  $[0, 30s]$ ，激活时间间隔为  $1s$ 。建立数学模型，根据所得到的 30 个点画激活时间的累积分布 CDF 仿真图如图 3.3 所示。

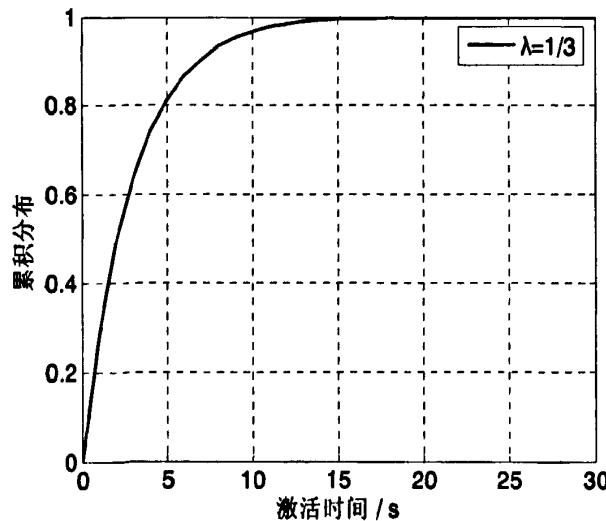


图 3.3 原算法激活时间累积分布

横轴表示激活时间，纵轴表示概率密度。计算概率密度值就是计算在  $(t_1, t_2)$  时间内的激活时间个数占总的激活时间个数的百分比。选取激活时间范围为  $[0, 30s]$ ，激活时间间隔为  $1s$ 。建立数学模型，根据所得到的 30 个点画激活时间的概率密度 PDF

仿真图, 如图 3.4 所示。

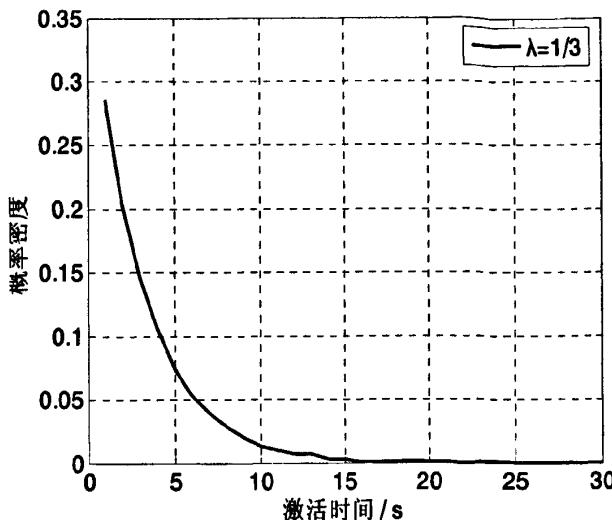


图 3.4 原算法激活时间概率密度分布

仿真结果说明:由图 3.3 和图 3.4 可以看出,激活时间比较符合负指数分布的特点。也就是说能够较好地实现激活时间服从均值为 3s 的负指数分布的特点。

### 3.6.2 原算法的静默期

连续选取 10000 个静默期, 静默时间选取每个静默期的初始静默时间。横轴表示静默时间, 纵轴表示百分比, 也就是累积分布值。计算累积分布值也就是计算在  $t$  时间内的静默时间个数占总的静默时间个数的百分比。选取静默时间范围为 [0, 30s], 静默时间间隔为 1s。建立数学模型, 根据所得到的 30 个点画累积分布 CDF 仿真图如图 3.5 所示。

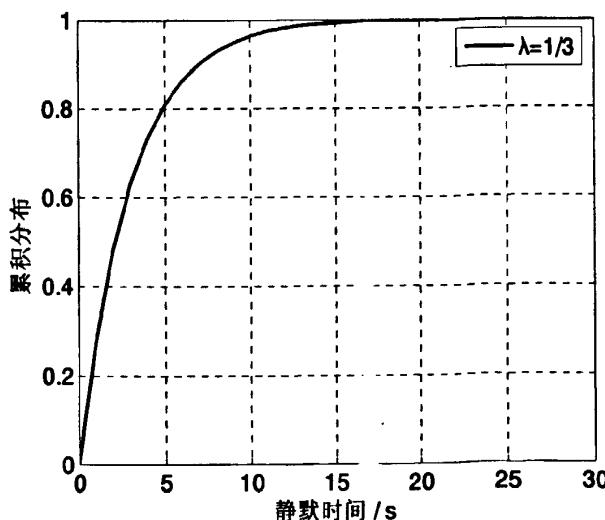


图 3.5 原有算法静默时间累积分布

横轴表示静默时间, 纵轴表示概率密度。计算概率密度值就是计算在  $(t_1, t_2)$

时间内的静默时间个数占总的静默时间个数的百分比。选取静默时间范围为[0, 30s], 静默时间间隔为1s。建立数学模型, 根据所得到的30个点画概率密度PDF仿真图, 如图3.6所示。

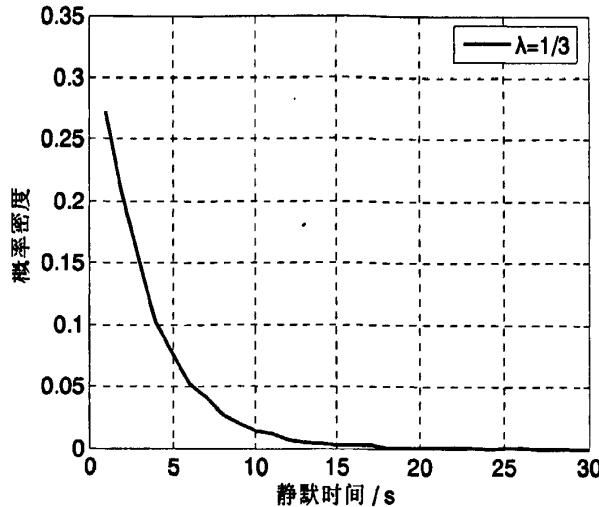


图3.6 原有算法静默时间概率密度分布

仿真结果说明: 由图3.5和图3.6可以看出, 静默时间基本符合均值为3s的负指数分布的特点。也就是说原有算法基本能够实现静默时间服从均值为3s的负指数分布的特点。

原算法中系统由静默期刚进入激活期时的数据包数统计图如图3.7所示。

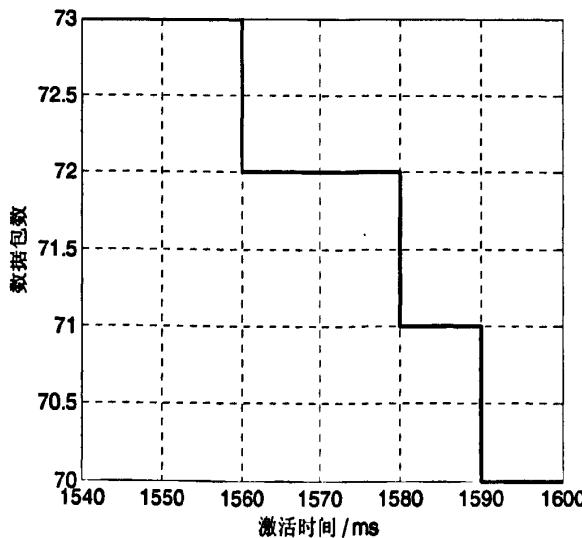


图3.7 原算法的数据包数

由图3.7可以看到, 当系统刚从静默期进入到激活期时, 激活期内的数据包数并不能保证每隔20ms都发送一个数据包的特点, 与VoIP业务模型的参数配置不符。

### 3.6.3 新算法的激活期

连续选取 10000 个激活期，激活时间选取每个激活期的初始激活时间。横轴表示激活时间，纵轴表示百分比，也就是累积分布值。计算累积分布值也就是计算在  $t$  时间内的静默时间个数占总的静默时间个数的百分比。选取静默时间范围为  $[0, 30s]$ ，静默时间间隔为 1s。建立数学模型，根据所得到的 30 个点画新算法的 VoIP 业务模型激活时间的累积分布 CDF 仿真图如图 3.8 所示。

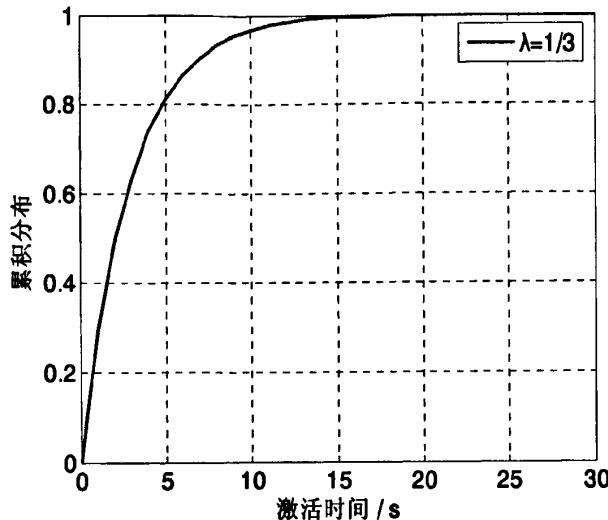


图 3.8 新算法激活时间累积分布

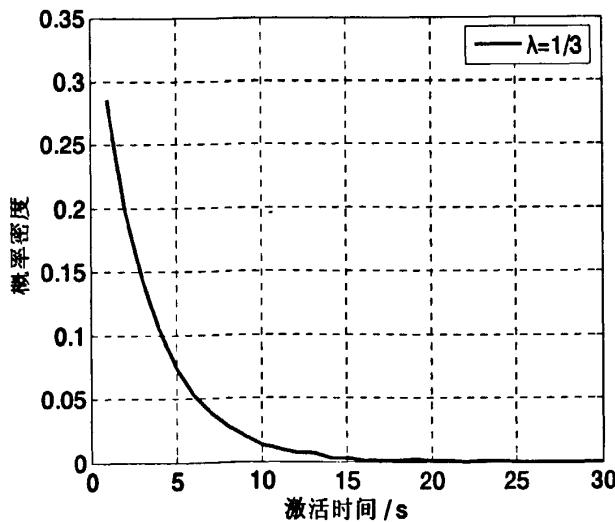


图 3.9 新算法激活时间概率密度分布

横轴表示激活时间，纵轴表示概率密度。计算概率密度值就是计算在  $(t_1, t_2)$  时间内的激活时间个数占总的激活时间个数的百分比。选取激活时间范围为  $[0, 30s]$ ，

激活时间间隔为 1s。建立数学模型，根据所得到的 30 个点画概率密度 PDF 仿真图，如图 3.9 所示。

仿真结果说明：由图 3.8 和图 3.9 可以看出，激活时间比较符合负指数分布的特点。也就是说新算法能够较好地实现激活时间服从均值为 3s 的负指数分布的特点。

### 3.6.4 新算法的静默期

连续选取 10000 个静默期，静默时间选取每个静默期的初始静默时间。横轴表示静默时间，纵轴表示百分比，也就是累积分布值。计算累积分布值也就是计算在  $t$  时间内的静默时间个数占总的静默时间个数的百分比。选取静默时间范围为 [0, 30s]，静默时间间隔为 1s。建立数学模型，根据所得到的 30 个点画 VoIP 的静默时间的累积分布 CDF 仿真图如图 3.10 所示。

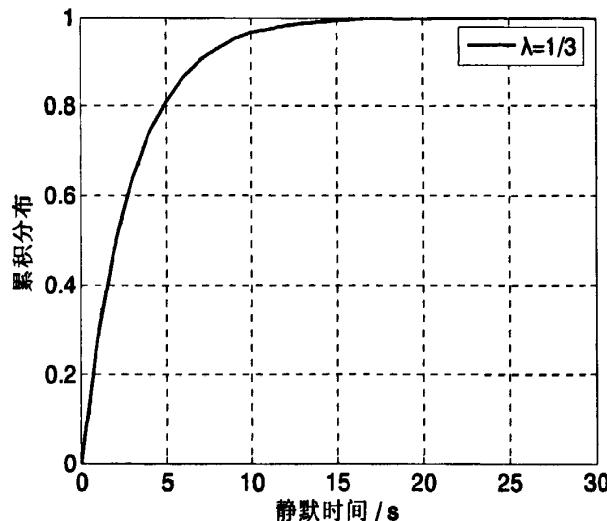


图 3.10 新算法静默时间累积分布

横轴表示静默时间，纵轴表示概率密度。计算概率密度值就是计算在  $(t_1, t_2)$  时间内的静默时间个数占总的静默时间个数的百分比。选取静默时间范围为 [0, 30s]，静默时间间隔为 1s。建立数学模型，根据所得到的 30 个点画 VoIP 静默时间概率密度 PDF 仿真图，如图 3.11 所示。

仿真结果说明：由图 3.10 和图 3.11 可以看出，静默时间比较符合负指数分布的特点。也就是说新算法能够较好地实现静默时间服从均值为 3s 的负指数分布的特点。

新算法中系统由静默期刚进入激活期时的数据包数统计图如图 3.12 所示。

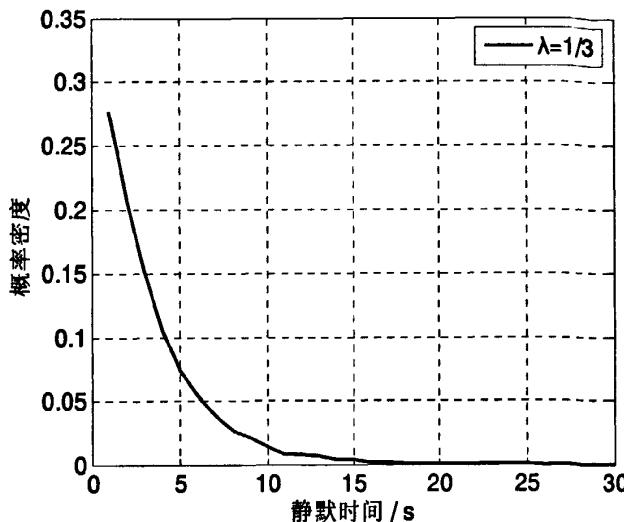


图 3.11 新算法静默时间概率密度分布

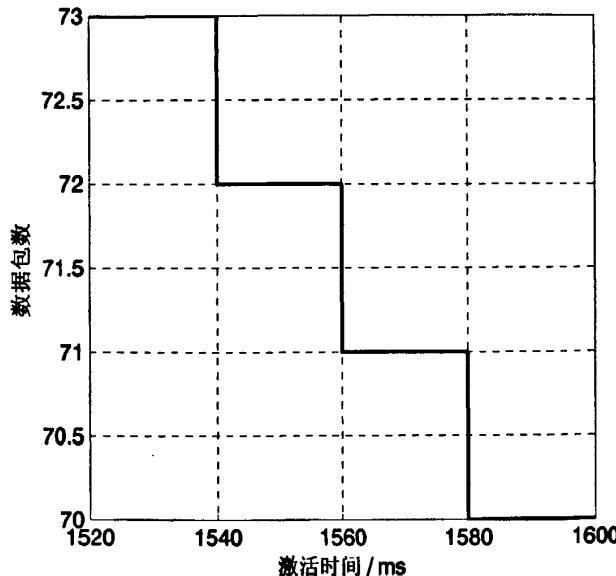


图 3.12 新算法数据包数

由图 3.12 可以看出, 新算法中当系统刚从静默期进入激活期时, 激活期内保证了每隔 20ms 都发送一个数据包的特点。这一点符合 VoIP 业务模型的参数配置要求。

将原有算法和新算法的静默时间的概率密度 PDF 仿真图进行对比, 如图 3.13 所示。

仿真结果说明: 由图 3.13 可以看出, 新算法的 PDF 仿真图曲线略圆滑一些, 效果较好, 相比原算法, 更接近负指数分布的特点。对于原有算法的不足, 追其原因主要是由静默期的延时造成的, 并且导致静默期没有实现任意一个 20ms 都发送一个数据包的特点, 改进后的算法大大地改善了系统性能, 使得静默时间能够更好的服从均

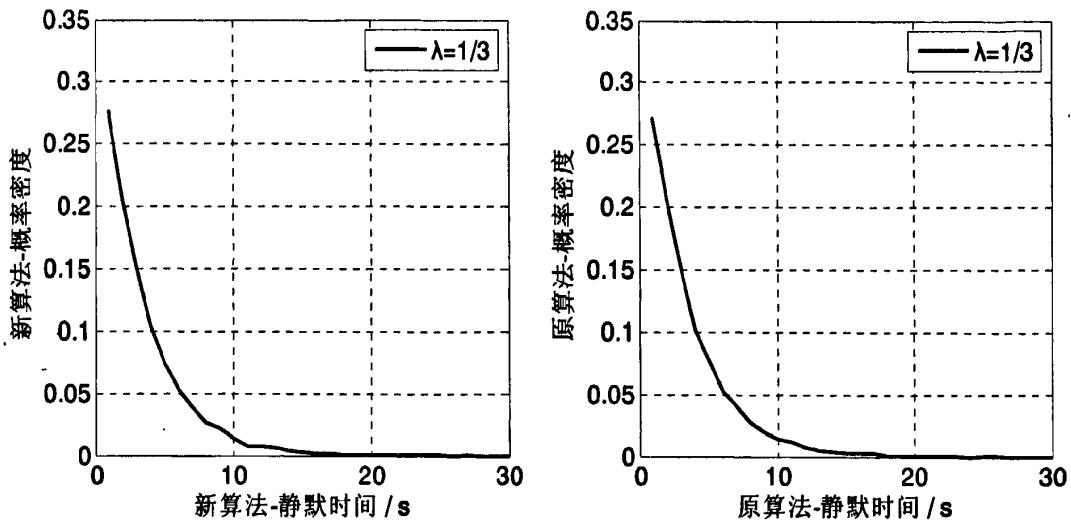


图 3.13 原有算法和新算法的静默时间概率密度对比

值为 3s 的负指数分布的特点，并且能够保证每隔 20ms 都发送一个数据包的特点，使得静默期没有了延时，在同等时间内静默期相对减少，激活期相对增多。优化了业务模型。具有一定的实际应用价值。

### 3.7 本章小结

本章首先对系统级仿真平台进行了概述，并对系统级仿真平台的架构进行了简要说明，包括对仿真平台的运行过程和总体流程。系统级仿真平台就是为了满足新业务的业务要求而定义和设计的。所以随后文章又对典型的四种业务模型和业务模型的参数配置情况进行了介绍，然后针对高通平台中 VoIP 业务模型在实现中存在的不足之处，进行了算法设计上的改进。其性能略好于原高通平台中设计的算法，具有一定的实际应用价值。

## 第4章 HSUPA 系统级仿真实现及分析

### 4.1 系统级与链路级的接口

当前，无线通信系统的仿真包括链路级仿真和系统级仿真。链路级仿真主要强调的是对物理层相关技术的仿真，而系统级仿真则主要强调的是在多小区和多用户的情况下，对系统整体性能相对宏观上的一个仿真。

基于系统级仿真平台的实现需要链路级来支持的特点，链路级仿真和系统级仿真一定要有个特定的接口。在链路级仿真中，需要根据 TTI 的大小、信道环境和传输格式等参数确定与各个传输格式相对应的码片信噪比 Ebnt 与数据误块率 Bler 之间的曲线，并将这些曲线提供给系统级仿真使用。在系统级仿真平台中，有个特定的接口专门用来读取 Ebnt 和 Bler 的值（链路级仿真将曲线以数据的形式存储，即把 Ebnt 和 Bler 的值存储在.txt 文本文档中），即实现曲线读取功能。将读进来的曲线按顺序排列好，实现其他模块随调随用的功能，方便其他模块的使用。

对系统级接收到的数据包正确与否的判断，需要借助链路级的仿真结果。在每帧中，NodeB 端的接收机计算出接收到的码片信噪比。然后通过链路级 Ebnt-Bler 曲线计算系统级的 Bler。判断是否正确接收数据包，主要是通过 Bler 与随机数  $R$  ( $R$  服从 0-1 的均匀分布) 进行比较，如果  $R > Bler$ ，那么相应的数据包被正确接收；否则，相应的数据包未能被正确接收。

### 4.2 典型调度算法

基于 NodeB 控制的调度器是根据每个 UE 的 CQI、业务类型和业务流量等情况进行调度的，衡量调度性能的重要指标包括小区的吞吐量和用户的公平性等。调度问题可以说是最优化问题。小区吞吐量的最大化和用户共享吞吐量的公平性是调度的主要目的。调度算法要解决的问题就是如何能更有效地平衡好资源和用户。典型的调度算法主要包括轮循（RR）调度算法、最大载干比（C/I）调度算法、正比公平（PF）调度算法。从这三种调度算法中也衍生出许多其他的算法，这些算法可以根据不同场合来选择单独使用或混合使用。

#### 4.2.1 轮循调度算法

##### 4.2.1.1 算法原理

该调度算法遵循先进先出策略，按照用户接入顺序确定用户的 HSUPA 服务优先

级, 对小区中主服UE进行轮流调度, 同一时间只能调度一个UE。即在不同的时间段轮流调度不同的UE。对所有的主服用户UE来讲, 虽然在时间上保证了公平性。但并不能保证每次被调度的UE都能获得相同的授权。如果超出了ROT门限, 就对所有的UE发送RG\_DOWN命令<sup>[11, 12]</sup>。

#### 4.2.1.2 仿真结果与数据分析

系统中有7个基站, 每个基站有3个小区, 每个小区有8个UE, 针对改进算法的目的, 着重对吞吐量和公平度进行仿真。吞吐量为数据包的传输速率。公平度是一个衡量调度器性能的重要参数。公平度的定义有很多种, 这里把公平度定义为: 用户的吞吐量与所有用户平均吞吐率的比值为1的概率大小。即横坐标为用户的吞吐量与所有用户平均吞吐量的比值, 纵坐标为累积分布值, 当横坐标为1时, 曲线越抖, 说明公平度就越高。反之, 公平度就越低。

小区平均吞吐量与ROT的关系仿真图如图4.1所示。

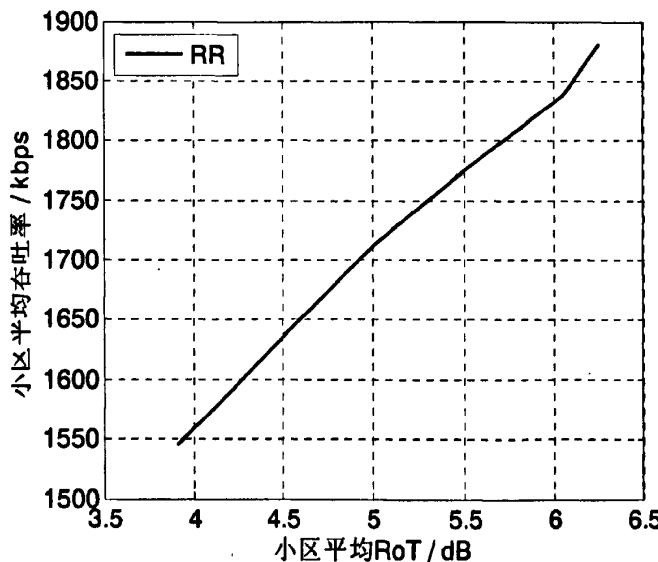


图4.1 小区平均吞吐率

用户的公平性仿真图如图4.2所示。

#### 4.2.1.3 轮循调度算法的优点

轮循调度算法的优点主要体现在两个方面。一方面是公平度比较高。从占用的时间上来说, 该调度算法是最公平的。另一方面是算法实现非常简单。各个用户的优先级都相同, 轮流调度即可。缺点体现在吞吐量相对比较低。由于算法没有考虑到不同用户之间的无线信道的衰落特性, 每个用户都被等概率调度, 导致资源利用率不高, 吞吐量较低。

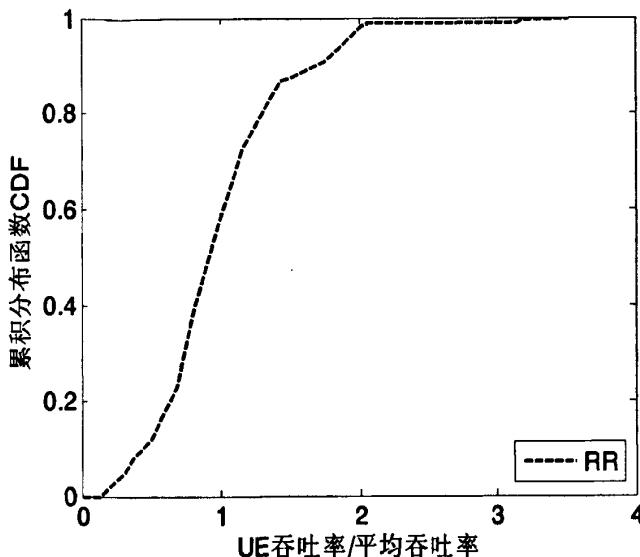


图 4.2 UE 吞吐率累积分布

## 4.2.2 最大 C/I 调度算法

### 4.2.2.1 算法原理

最大 C/I 调度算法的主要原理是根据用户反馈的信道质量信息，优先调度小区中链路质量最好的用户，即给 C/I 最高的用户发送绝对授权 (AG)，而对其他主服 UE 则发送相对授权 (RG)，如果超出了 ROT 门限，就对所有用户 UE 发送 RG\_DOWN 命令<sup>[11, 12]</sup>。该调度算法的优先级定义为：

$$P(i, t) = \arg \max \left\{ (C/I)_i(t) \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4-1)$$

其中， $N$  为用户数， $P(i, t)$  为用户的调度优先级， $(C/I)_i(t)$  为信噪比。

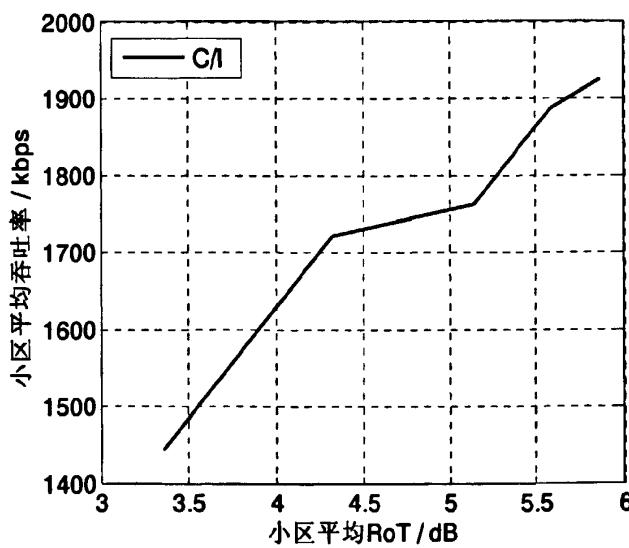


图 4.4 小区平均吞吐率

#### 4.2.2.2 算法流程图

该调度算法的流程图如图 4.3 所示。

#### 4.2.2.3 仿真结果与数据分析

系统中有 7 个基站，每个基站有 3 个小区，每个小区有 8 个 UE，针对改进算法的目的，着重对吞吐量和公平度进行了仿真。小区平均吞吐量与 ROT 的关系仿真图如图 4.4 所示。

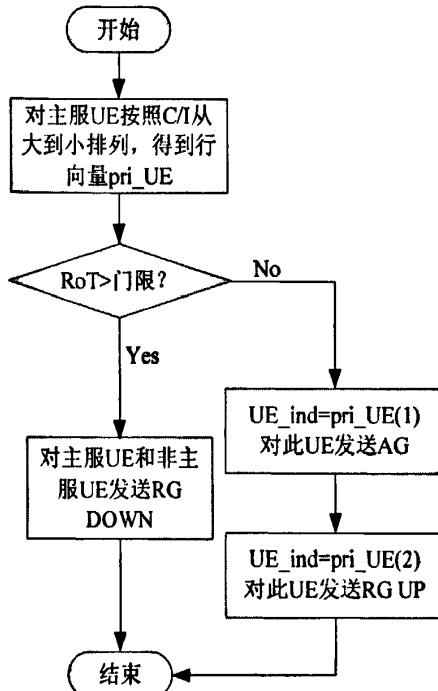


图 4.3 最大 C/I 调度算法流程图

用户吞吐量的 CDF 仿真图如图 4.5 所示。

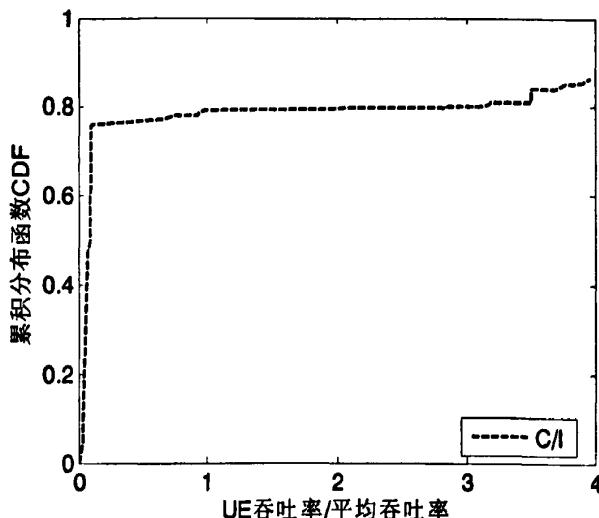


图 4.5 UE 吞吐率累积分布

#### 4.2.2.4 C/I 调度算法的优缺点

C/I 调度算法的优点主要体现在三个方面。首先是具有很高的吞吐量。总是优先调度信道条件最好的用户，使得小区的吞吐率最大。其次是具有较高的频谱效率。最后是算法实现比较简单，不需要专门的信令和复杂度的计算。C/I 调度算法的缺点体现在公平性差。由于边缘信道的信噪比比较小，处于边缘的用户不能被调度，因而公平性较差。

#### 4.2.3 正比公平调度算法

##### 4.2.3.1 算法原理

在正比公平调度算法中，所有 UE 都被分配一个相应的调度优先级，在任何时候都优先调度小区中优先级最大的 UE。正比公平调度算法既考虑到了长期传输数据的大致公平性，又考虑到了短期信道的变化情况和历史吞吐率。它是吞吐量和公平性的权衡折中<sup>[12, 11]</sup>。该算法的调度优先级定义为：

$$P(i, t) = \frac{(C/I)_i(t)}{R_i(t)} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4-2)$$

其中， $N$  为用户数， $P(i, t)$  为用户  $i$  的调度优先级， $(C/I)_i(t)$  为用户  $i$  的信噪比， $R_i(t)$  为用户  $i$  在  $t$  时间内的平均传输速率。将  $\alpha$  定义为平滑因子， $R_i(t)$  的计算方法如下：

$$R_i(t) = \begin{cases} (1-\alpha)R_j + \alpha r_j, & i = j \\ (1-\alpha)R_j, & i \neq j \end{cases} \quad (4-3)$$

##### 4.2.3.2 算法流程图

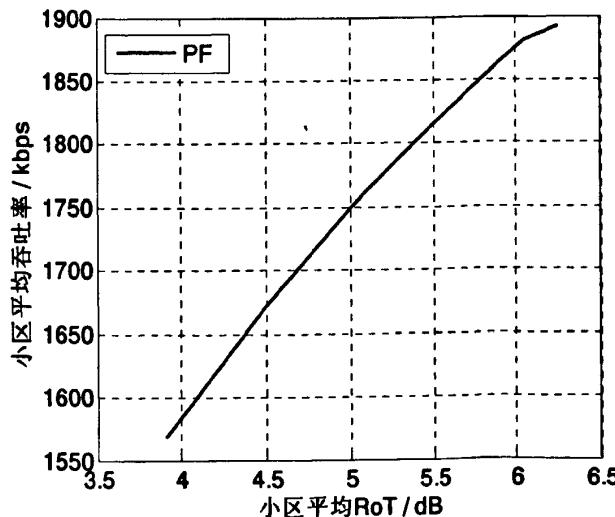


图 4.7 小区平均吞吐率

正比公平调度算法的流程图如图 4.6 所示。

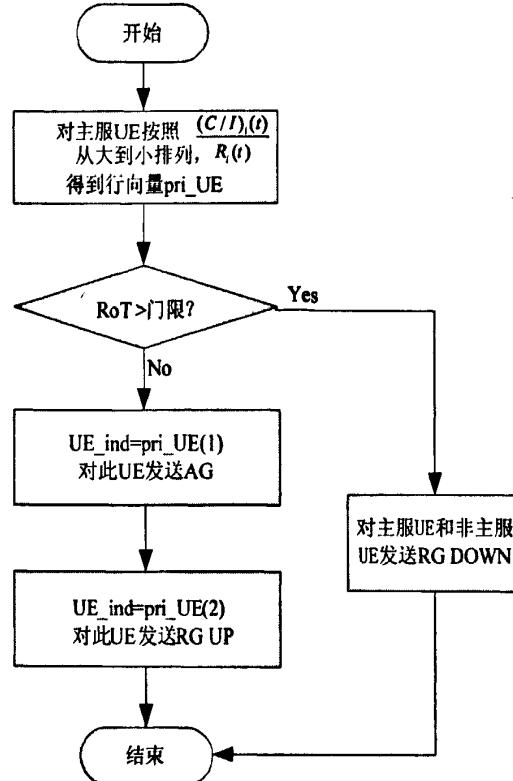


图 4.6 正比公平调度算法流程图

#### 4.2.3.3 仿真结果与数据分析

系统中有 7 个基站，每个基站有 3 个小区，每个小区有 8 个 UE，针对改进的正比公平调度算法的目的，着重对吞吐量和公平性进行仿真。吞吐率和 RoT 的关系仿真

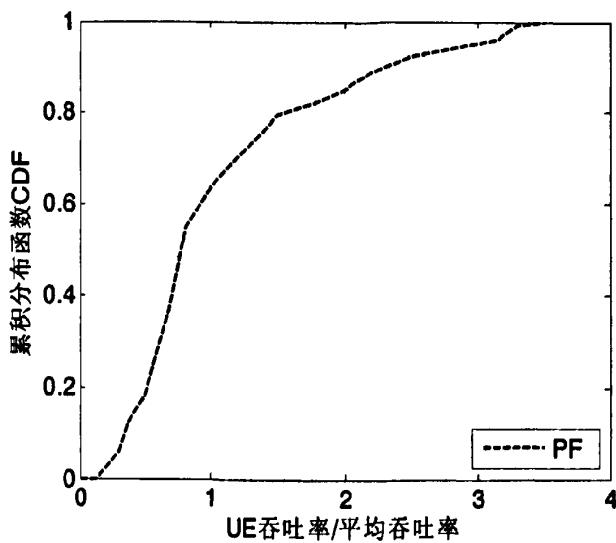


图 4.8 UE 吞吐率累积分布

图如图 4.7 所示。

UE 吞吐率的 CDF 仿真图如图 4.8 所示。

#### 4.2.3.4 正比公平调度算法的优缺点

正比公平调度算法的优点体现在吞吐量和公平性之间取得了权衡折中。缺点体现在 QoS 有可能下降。不同 UE 经过不同信道时，对饥饿的忍耐能力是不同的，正比公平调度算法在用户之间经历相似的信道条件时可以给出相对公平的数据速率分配。但实际上，用户所经历的信道往往在衰落特性上有一定的差距。这样，正比公平调度算法就不能给出和其平均速率成正比的公平分配，从而造成某些用户的 QoS 下降。

#### 4.2.4 典型调度算法对比

对典型调度算法的吞吐量进行仿真对比，如图 4.9 所示。

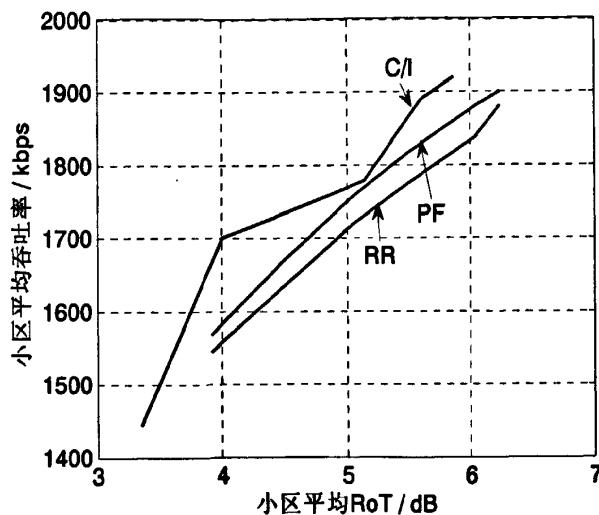


图 4.9 典型调度算法小区平均吞吐率对比

用户公平性对比仿真图如图 4.10 所示。

根据公平度的定义，当用户吞吐量与用户平均吞吐量的比值趋近于 1 时，CDF 仿真图的曲线越抖说明用户的公平度就越高。反之，公平度就越低。通过仿真对比的结果可知，在三种典型的调度算法中，轮循调度算法有效地实现了用户间的公平性，是三种调度算法中公平度最高的，但也因此吞吐量却是三种调度算法中最低的；最大 C/I 调度算法由于考虑到了不同信道的衰落特性，实现了吞吐量的最大化，是三种调度算法中吞吐量最大的，但也因此公平度却是三种调度算法中最低的；在各个用户经历的信道衰落相同或相似时，正比公平调度算法能够将吞吐量和公平性进行很好的权衡折中，同时保证了吞吐量的最大化和用户的公平性。

虽然，正比公平调度算法在吞吐量和公平度之间取得了很好的权衡折中，但是正

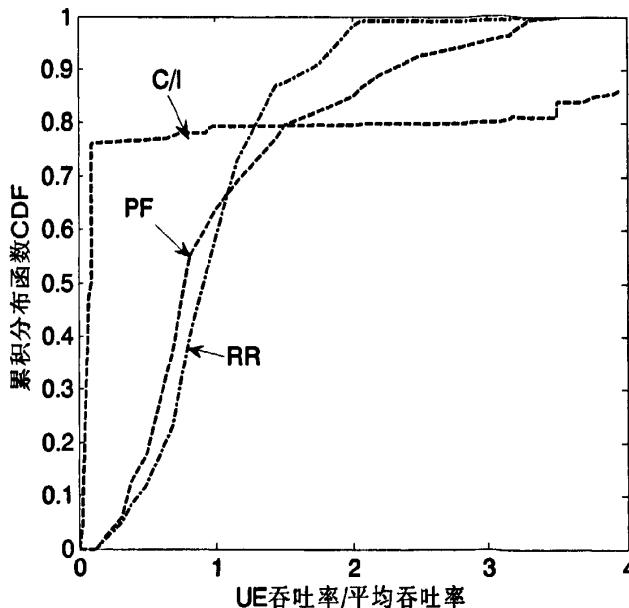


图 4.10 UE 吞吐率的累积分布

比公平调度算法也有其不足之处，比如当各个用户所经历的信道衰落特性差别很大时，正比公平调度算法将很难保证用户的公平性。

### 4.3 改进的正比公平调度算法

由于不同的 UE 经过不同的信道时对饥饿的忍耐能力是不同的，正比公平调度算法在各个用户经历的信道条件差别不大时，可以给出比较公平的数据速率分配。但事实上，每个用户所经历的信道不可能都具有完全相同或相似的衰落特性，使得正比公平调度算法不能给出和其平均速率成正比的资源的公平分配，从而造成一些用户的 QoS 下降。为了满足对 QoS 要求比较高的业务，同时弥补正比公平调度算法公平性的不足，文章提出了两种改进的正比公平调度算法，有效地平衡了用户的公平性和吞吐量，改善了系统性能。

#### I 算法原理

##### (1)改进的正比公平调度算法 1

在调度过程中，为了弥补正比公平调度算法公平性的不足，需要在用户的公平性上加以提高。基于上一时刻被调度的用户，下一时刻被调度的机会相对较小的原因，给出改进的正比公平调度算法 1，该改进调度算法的调度优先级定义为：

$$P(i, t) = \frac{(C/I)_i(t)}{R_i(t)} \cdot \frac{1}{(T_{n-1})^c}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (4-3)$$

其中， $N$  是用户数， $P(i, t)$  是用户  $i$  在  $t$  时刻的调度优先级， $R_i(t)$  是用户  $i$  的有效平均速

率, 每个 TTI 更新一次,  $T_{n-1}$  是用户  $i$  上次被调度的时间,  $(C/I)_i(t)$  是在  $t$  时刻的载干比,  $C_i$  是控制参数, 与信道的变化有着一定的相关性。 $C_i$  的计算方法为:

$$C_i = \begin{cases} C_i + \Delta c & \text{if } \left[ \frac{\frac{T_{n-1}}{(C/I)_i(t)}}{R_i(t)} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{T_{n-1}}{(C/I)_i(t)} < -\varepsilon \right] \\ C_i - \Delta c & \text{if } \left[ \frac{\frac{T_{n-1}}{(C/I)_i(t)}}{R_i(t)} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{T_{n-1}}{(C/I)_i(t)} > \varepsilon \right] \end{cases} \quad (4-4)$$

其中， $\epsilon$  为一个合适的更新门限值，其大小依赖于收敛速度和收敛值附近的波动情况。 $C_i$  的更新周期比调度周期大，以保证在必要时才被更新，避免频繁更新。该改进调度算法与 PF 调度算法相比多加了一个监控更新模块，该模块能够追踪不同用户所经历的信道的快速变化。

改进正比公平调度算法 1 的时间复杂度为  $O(C_i)$ 。

## (2) 改进的正比公平调度算法 2

改进正比公平调度算法 2 是在改进调度算法 1 基础上提出的。它着重针对调度的公平性问题，同样基于上一时刻被调度的用户，下一时刻被调度的机会较小的原因，给出不同于改进的调度算法 1 的调度优先级定义：

$$P(i, t) = \frac{(C/I)_i(t)}{R_i(t)} \cdot \frac{1}{(T_{i-1})} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4-5)$$

其中,  $N$  是用户数。 $(C/I)_i(t)$  是  $t$  时刻的载干比,  $R_i(t)$  是用户  $i$  的有效的平均速率,  $T_{m-1}$  是用户  $i$  在  $m-1$  时刻系统的调度尺度, 若用户没有被调度, 则相应的调度尺度减小, 该用户下一时隙被调度的机会就增加, 若用户被调度, 则相应的调度尺度增大, 下一时隙被调度的机会就减小, 通过对调度尺度的调节, 为用户的公平性提供了一定的保证, 从而使系统具有一定的 QoS 保证。调度尺度的更新方法如下:

$$T_n = \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \cdot T_{n-1} + \frac{1}{T_c} \cdot \frac{(C/I)_i(t)}{R_i(t)} \quad (4-6)$$

其中,  $T_m$  和  $T_{m-1}$  分别表示用户  $i$  在第  $m$  时刻和第  $m-1$  时刻系统的调度尺度,  $T_c$  表示调度的时间窗。同样, 该调度算法相比正比公平调度算法也多了一个监控更新模块。该监控更新模块与改进调度算法 1 的监控更新模块相比表达式不同, 但性能相近。

改进正比公平调度算法 2 的时间复杂度为  $O(1)$ ，比改进正比公平调度算法 1 的时

间复杂度小。

## II 算法流程图

改进的正比公平调度算法的流程图如图 4.11 所示。

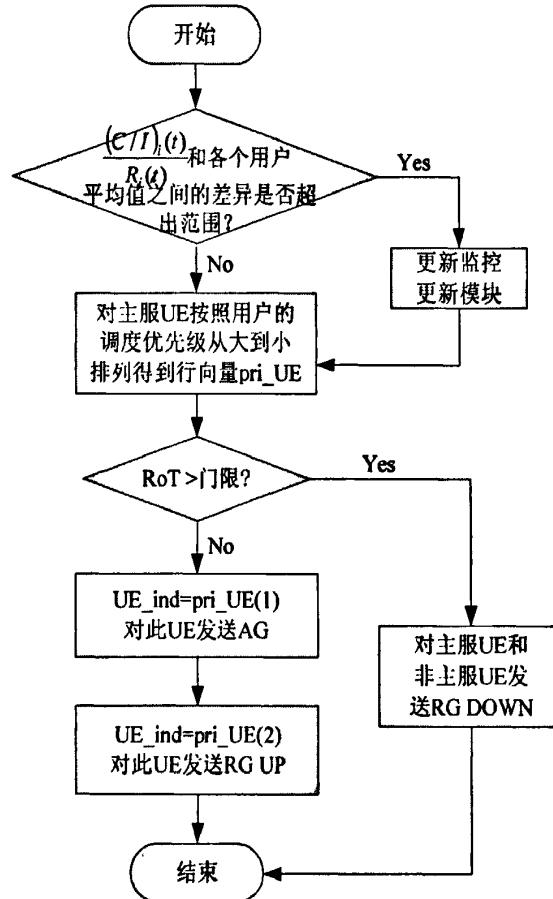


图 4.11 改进算法的流程图

## III 仿真结果与数据分析

本文提出的两种改进正比公平调度算法的思想都是通过增加一个监控更新模块来追踪不同用户经历的信道的快速变化, 来调整算法中的控制参数, 所以在合理地设置控制参数的情况下, 两种调度算法所达到的性能指标是一致的, 唯一的不同体现在算法的复杂度上, 改进正比公平调度算法 2 的复杂度相对较小。文中针对改进的正比公平调度算法 2 来进行仿真验证。

系统中有 7 个基站, 每个基站有 3 个小区, 每个小区有 8 个用户, 针对改进调度算法的目的, 着重对吞吐量和公平度进行仿真。小区平均吞吐量与 ROT 的关系仿真图如图 4.12 所示。用户的公平性仿真图如图 4.13 所示。

## IV 算法的优缺点

改进调度算法由于考虑到了不同信道的衰落特性，采用了监控更新模块，具有较好的公平性。但与正比公平调度算法相比，吞吐量却有所减小。而且算法的复杂度也相应增加了。

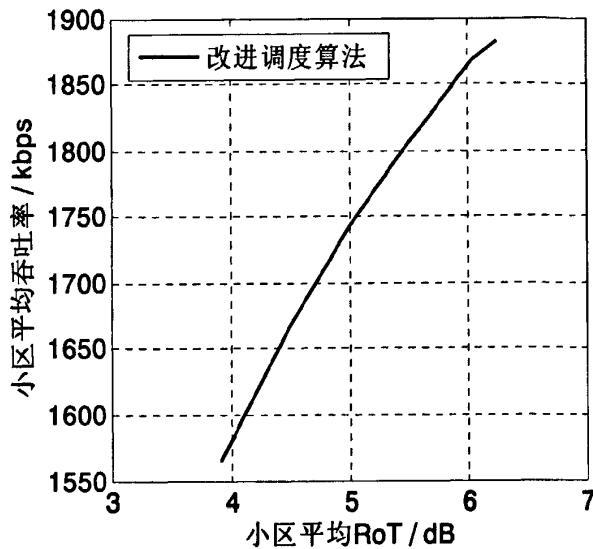


图 4.12 小区平均吞吐率

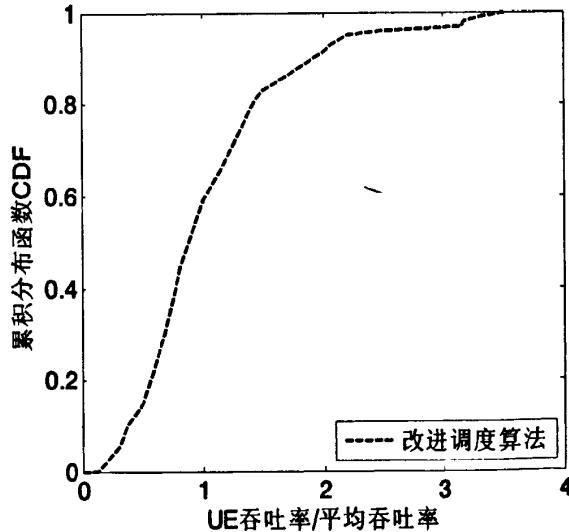


图 4.13 UE 吞吐率的累积分布

#### 4.4 PF 调度算法与改进的 PF 调度算法对比

吞吐量与 ROT 的关系仿真图如图 4.14 所示。

从图 4.14 可以看出，改进的正比公平调度算法与正比公平调度算法相比，由于考虑了不同信道的衰落特性，采用监控更新模块对信道的衰落变化进行监控，使得吞吐量有所减小。另外，算法的复杂度有所增加。

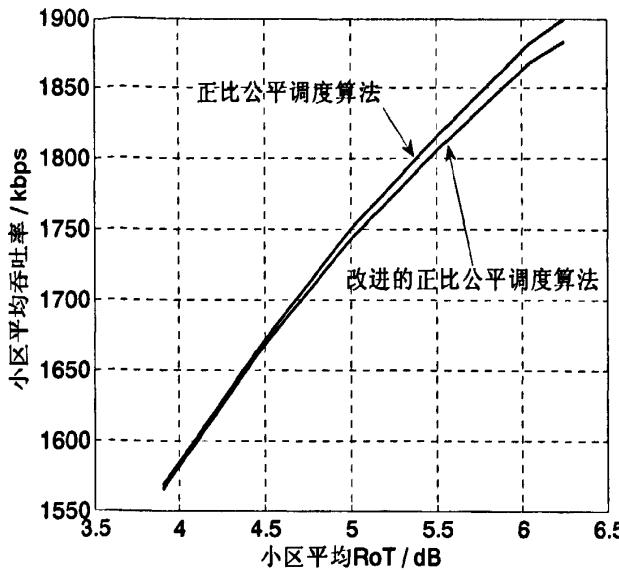


图 4.14 小区平均吞吐率对比

用户公平度的仿真图如图 4.15 所示。

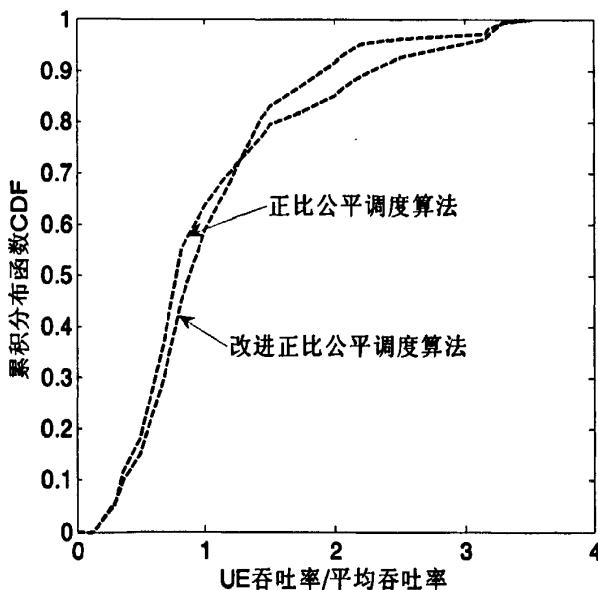


图 4.15 UE 吞吐率的累积分布

根据公平性的定义，在UE吞吐率的累积分布图中，横坐标为1时，曲线斜率越大，说明该调度算法的公平度越高。从图4.15可以看出，当横坐标为1时，改进正比公平调度算法的曲线斜率较正比公平调度算法的曲线斜率大，即改进调度算法的公平度较正比公平调度算法的公平度有所提高。与提出改进正比公平调度算法的初衷相一致，有效地弥补了公平性的不足，改善了系统性能。

## 4.5 四种调度算法的性能对比

三种典型调度算法与改进正比公平调度算法的小区吞吐量和用户公平度分别进行对比。用户公平度对比仿真图如图 4.16 所示。

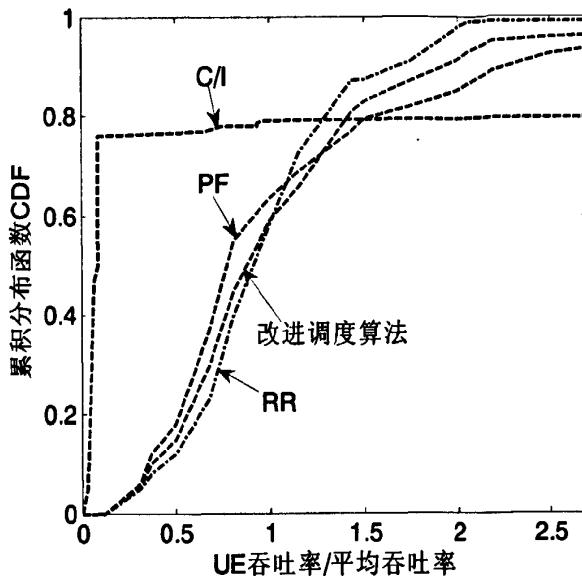


图 4.16 四种调度算法的 UE 吞吐率的累积分布

根据公平性的定义, 从图 4.16 可以看出, 用户公平度从高到低的排序为: 轮循调度算法、改进正比公平调度算法、正比公平调度算法、最大 C/I 调度算法。

小区平均吞吐量的仿真图对比如图 4.17 所示。

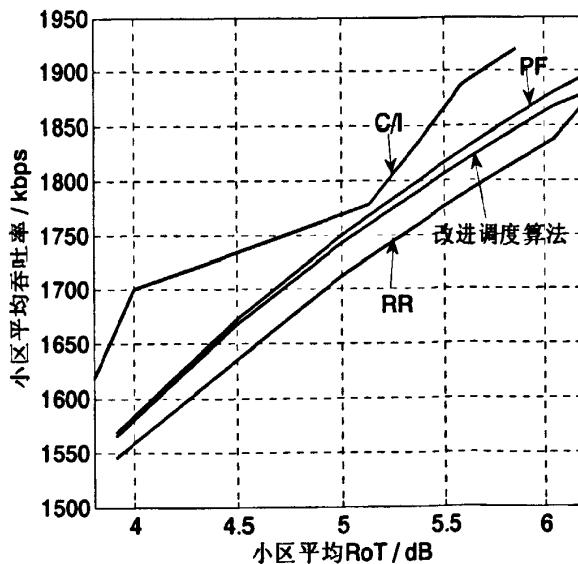


图 4.17 四种调度算法小区吞吐量的对比

从图 4.17 可以看出, 在四种调度算法中, 小区吞吐率从高到低的排序为: 最大 C/I 调度算法、正比公平调度算法、改进的正比公平调度算法、轮循调度算法。

从仿真结果可以知道, 轮循调度算法的公平度最高, 但吞吐量最低; 最大 C/I 调

度算法的公平度最低，但吞吐量最高；正比公平调度算法在公平度和吞吐量之间取得了较好的权衡折中，改进正比公平调度算法虽然在吞吐量上与正比公平调度算法相比有所降低，但在公平度上却有所提高，与提出改进的正比公平调度算法的初衷相一致。有效地改善了系统性能。

将四种调度算法的性能进行对比，几种调度算法的性能比较如表 4-1 所示。

表 4-1 四种调度算法的比较

调度算法	公平性	系统吞吐量	算法复杂度
轮循调度算法	公平	低	小
最大 C/I 调度算法	不公平	高	较小
正比公平调度算法	较不公平	较高	较大
改进的正比公平调度算法	较公平	较低	大

## 4.6 本章小结

本章首先介绍了三种典型调度算法，并对其吞吐量和公平性进行了仿真对比。轮循调度算法是公平性的上界，最大 C/I 调度算法是吞吐量的上界，正比公平调度算法在吞吐量和公平性之间取得了较好的权衡折中。当用户经历的信道相同或相似时，能够很好地保证用户的公平性，但是当用户经历的信道衰落特性差别很大时，用户的公平性将受到严重的影响。文章针对这样的问题，提出了两种改进的调度算法，并进行了仿真验证改进调度算法的可行性。

## 第5章 HSUPA 系统级仿真平台的性能分析

系统级仿真平台的优与劣，主要通过它的性能指标来进行衡量，一个平台的性能指标越接近理想值，说明平台越好。反之就越差。即性能指标是用来衡量一个平台优劣的标志。除此之外，性能指标还可以用来帮助完善平台。如果一个平台的性能指标与理想指标相差悬殊时，说明平台在部分环节可能出现错误，开发人员可以大致的锁定错误出现的地方，进而不断地完善平台。所以性能指标在研发领域有着举足轻重的作用。

本章对系统级仿真平台的性能指标进行统计分析。主要针对用户端和小区端的相关性能进行统计分析。

### 5.1 平台的性能

#### 5.1.1 UE 端的性能

在用户 UE 端，设计一个用户 UE 端的模块 MOBSTATS（统计模块），用来统计分析用户 UE 的相关数据。用户 UE 端需要统计分析的变量如下：

- (1)Id: 用户 UE 的索引;
- (2)ChMod: 用户 UE 所在的信道类型;
- (3)FO: 帧偏移;
- (4)Xpos: 用户 UE 在小区中所处位置的横坐标值;
- (5)Ypos: 用户 UE 在小区中所处位置的纵坐标值;
- (6)AS: 用户 UE 的激活级大小;
- (7)C\_Id0/ C\_Id1/ C\_Id2: 用户的激活小区;
- (8)Dis0/ Dis1/ Dis2: 用户 UE 距离激活小区的距离;
- (9)FLSNR0/ FLSNR1/ FLSNR2: 用户经过不同路径的信噪比;
- (10)FLPL0/ FLPL1/ FLPL2: 用户 UE 经过不同路径的路径损耗;
- (11)AvPTxPwr: 平均导频发射功率;
- (12)AvTxPwr: 平均发射功率;
- (13)PER: 误码率;
- (14)Thrpt: 用户的吞吐量;
- (15)AvPH: 平均剩余功率;

- (16)AvSG: 授权值;
- (17)PktRsn.Tx: 按次数统计(0、1、2、3 或 0、1), 发送的总数据包数;  
PktRsn.Err: 按次数统计(0、1、2、3 或 0、1), 发送的错误数据包数;  
PktRsn.Per: 按次数统计(0、1、2、3 或 0、1), 误包率,  $PktRsn.Err / PktRsn.Tx$ ;
- (18)PktRate.Tx: 按块统计, 发送的总数据包数;  
PktRate.Err: 按块统计, 发送的错误数据包数;  
PktRate.Per: 按块统计, 误包率,  $PktRate.Err / PktRate.Tx$ 。

### 5.1.2 NodeB 端的性能

在 NodeB 端, 设计一个 NodeB 端的模块 NodeBSTATS (统计模块), 用来统计分析 NodeB 的相关数据。NodeB 端需要统计分析的变量如下:

- (1)CellId: 小区的索引;
- (2)RoT: 小区的噪声抬升量;
- (3)F\_act: 其他用户接收到的能量与激活用户的能量的比值;
- (4)F\_srv: 其他用户接收到的能量与主服用户接收到的能量的比值;
- (5)Thrpt: 小区吞吐量;
- (6)RoTHist.Min: ROT 的最小值;  
RoTHist.Max: ROT 的最大值;  
RoTHist.Avg: ROT 的平均值;  
ROT 在各个范围所占的百分比;
- (7)小区/基站的吞吐量的最大值、最小值、平均值以及各个范围所占的百分比;
- (8)每条径的 Ecp (码片能量) 和 EcpNt (码片能量/噪声能量) 在各个信道的最大值、最小值以及在各个范围内所占的百分比。

## 5.2 性能的统计分析

在模块 MOBSTAS/NodeBSTAS (用户端/基站端的统计模块) 中, 定义统计分析时用到的相关变量和相关的更新函数。在需要进行统计分析的数据所在的模块中通过指针调用 MOBSTAS/NodeBSTAS 中相应的更新函数, 将变量值赋值给 MOBSTAS/NodeBSTAS 中相应的变量, 进行相关的运算, 再将所需要进行统计分析的变量打印输出到 excel 表格中。这样就完成了该变量的统计。

统计功能设计的总体算法流程图如图 5.1 所示。

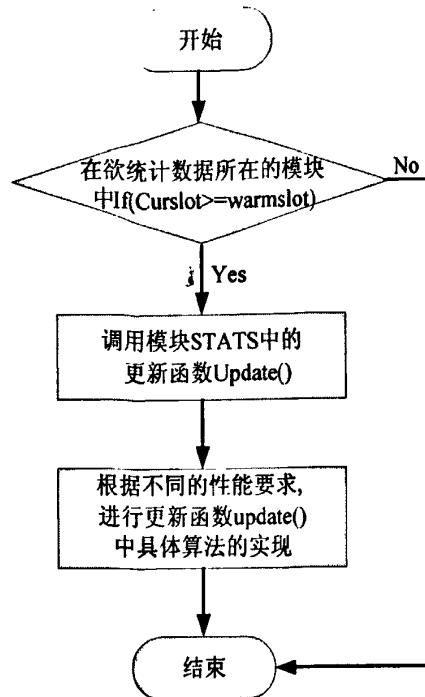


图 5.1 统计功能算法流程图

(1)在统计性能的过程中,对于不同的更新函数 `update()`,有不同的算法与之对应。针对具体问题进行具体分析。其中,涉及到几种关键算法,包括包数统计的算法、吞吐量统计的算法以及 RoT/EcpNt/Ecp/小区吞吐量/基站吞吐量的最大值、最小值、平均值和百分比的一些算法等。统计用户吞吐量的算法流程图如图 5.2 所示。

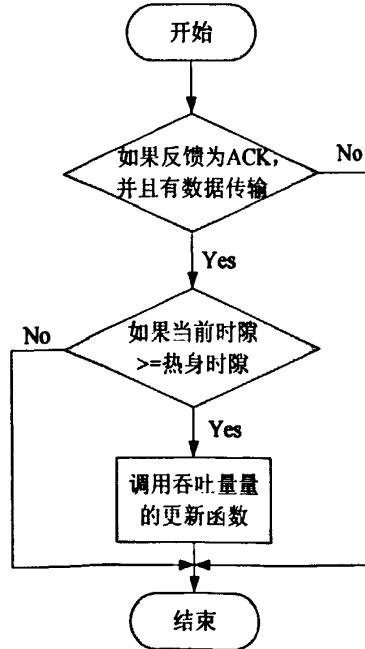


图 5.2 用户吞吐量统计算法流程图

根据用户的吞吐量可以计算出小区的吞吐量和基站的吞吐量。小区的吞吐量是位于该小区的所有用户的吞吐量的加和。基站的吞吐量是位于该基站的所有小区的吞吐量的加和。即通过用户的吞吐量可以有效地求出小区的吞吐量和基站的吞吐量。

(2)包数统计的算法流程图如图 5.3 所示。

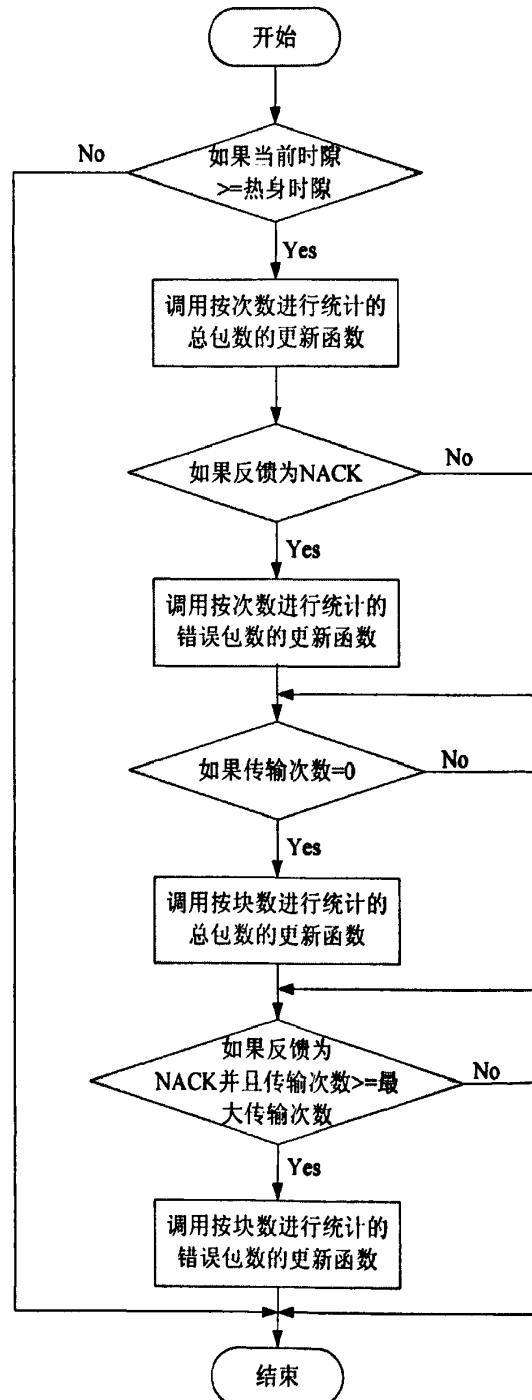


图 5.3 包数统计的算法流程图

不同块数发送的总包数加和等于传输次数 RSN 为 0 时的总发送包数, 误码率等于错误的数据包数与总的数据包数的比值。

### (3)求最小值、最大值、平均值及百分比的算法流程图

在特定的模块中定义最小值函数 printmin(文件流, 二维动态数组)、最大值函数如 printmax(文件流, 二维动态数组)、平均值函数如 printavg(文件流, 二维动态数组)和百分比函数如 printpercent(文件流, 二维动态数组)。

由于求 RoT、EcpNt、Ecp、小区吞吐量和基站吞吐量的最小值、最大值、平均值以及百分比的方法相同, 所以流程图也相似。如图 5.4 所示。

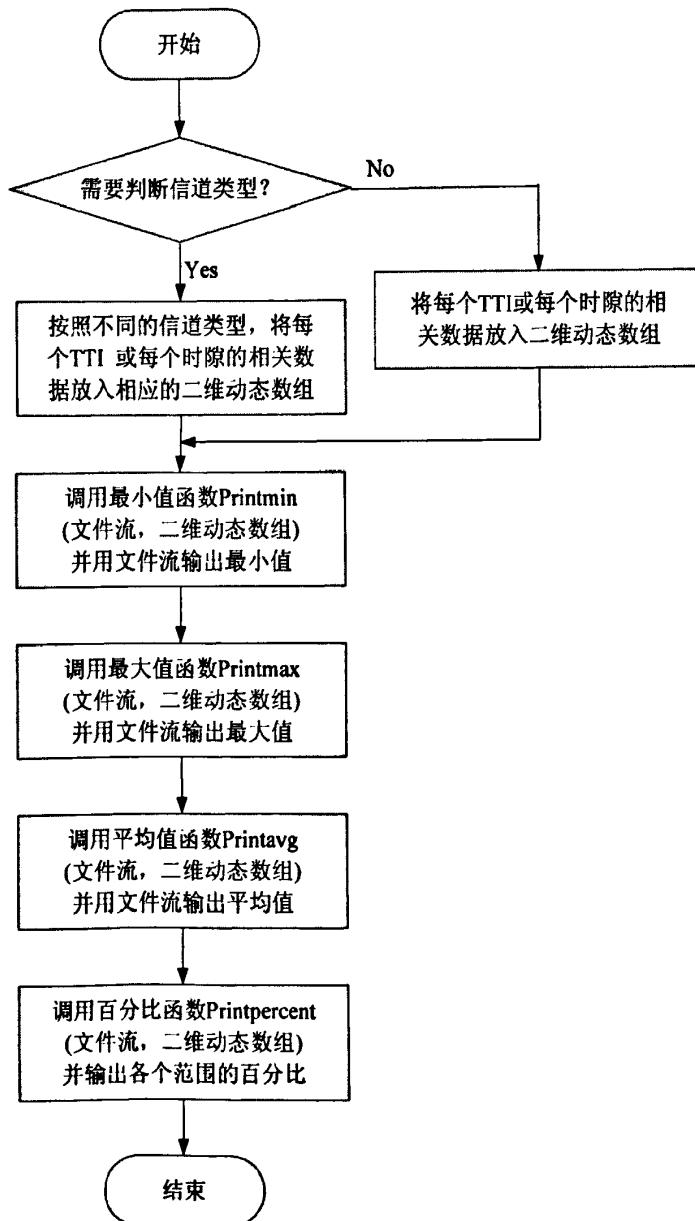


图 5.4 最小值、最大值、平均值和百分比流程图

## (4)其它性能算法流程图

将不同时隙或不同 TTI 的相关数据通过调用更新函数的方式进行加和，然后加和的值再除以系统总的运行时间，即为各个相关数据的平均值。统计的性能指标都是用平均值来表示的。如图 5.5 所示。

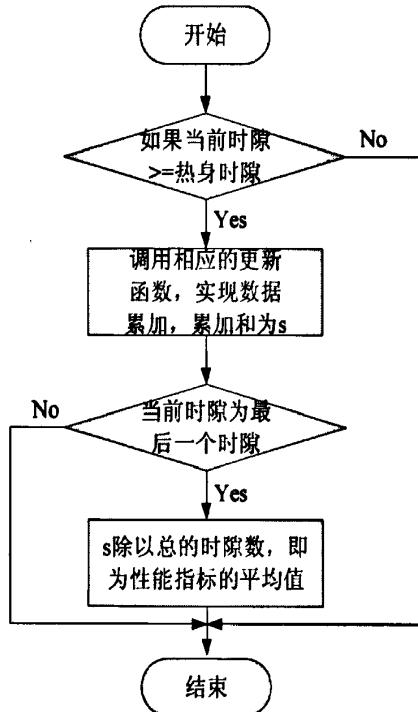


图 5.5 其它性能算法流程图

用这种方式统计数据有一定的好处，通过指针调用更新函数将各个数据的统计功能都放在同一个模块中来完成，便于查看和管理。

### 5.3 系统级仿真平台的性能分析

系统中有 19 个基站，每个基站有 3 个小区，每个小区有 10 个用户。系统中一共有 570 个用户。采用 BE 业务模型，2ms 的传输时间间隔。以高通平台中采用的正比公平调度算法为参照，与文中采用的改进正比公平调度算进行相关性能对比，进一步有效地说明了改进正比公平调度算法的可行性。

## (1)信噪比 EcpNt 的对比

高通平台参考值 EcpNt 的最小值、最大值、平均值如表 5-1 所示。

表 5-1 参考 EcpNt

	PA3 信道	PB3 信道	VA30 信道	VA120 信道
Min	-85.436	-94.108	-101.065	-117.383
Max	-11.1369	-16.15	-12.599	-11.0598
Avg	-28.9799	-36.96	-36.4127	-35.651

信噪比 EcpNt 的实际统计值如表 5-2 所示。

表 5-2 实际 EcpNt

	PA3 信道	PB3 信道	VA30 信道	VA120 信道
Min	-106.065	-100.219	-101.607	-123.954
Max	-11.1369	-16.15	-12.599	-11.0598
Avg	-34.996	-40.1317	-37.4189	-36.4871

由表 5-1 和表 5-2 可以看到，在参数配置相同的情况下，采用改进正比公平调度算法时，信噪比相应地减小了。由于改进正比公平调度算法考虑到了不同信道的衰落特性，公平度得以提高，信噪比应该相对减小，这一点与验证的结果相一致。进一步说明了改进的正比公平调度算法的可行性。

## (2) 数据包数、误包率

数据包数和误码率的参考值如表 5-3 所示。

表 5-3 参考数据包数

传输次数 Rsn	概率	总的发送包数	发送的错误包数	误包率
0	0.365146	6243927	6025287	0.964984
1	0.35236	6025286	3935451	0.653156
2	0.230151	3935535	895064	0.227431
3	0.052344	895074	73874	0.082534

数据包数及误包率的实际统计值如表 5-4 所示。

表 5-4 实际数据包数

传输次数 Rsn	概率	总的发送包数	发送的错误包数	误包率
0	0.422298	325050	285241	0.87753
1	0.370599	285257	132146	0.463252
2	0.171807	132243	27148	0.205289
3	0.035296	27168	2115	0.077847

对比表 5-3 和表 5-4 的数据可以看出, 实际的仿真平台与高通平台相比, 由于考虑到了不同用户经历信道的衰落特性不同的特点, 信噪比相应地较小 (如上面表 5-1 和表 5-2 的对比), 在同等时间内使得总的发送包数也相应地减少了, 这样会导致吞吐量的降低。这和第四章提出的改进正比公平调度算法使吞吐量减小的结论相吻合, 进一步证明了改进正比公平调度算法的可行性。

同时, 用 **excel** 表格统计数据, 由于有网格的原因, 统计出来的数据相比在文本文档中要好得多, 视觉上显得特别的规范和清晰。另外, 对于研发人员来说, 可以把表格中的数据与相应的参考值进行比较, 如果相差很悬殊, 说明平台的某个环节肯定出现了问题, 从而锁定问题所在, 进而完善平台。

## 5.4 本章小结

本章主要介绍了系统级仿真平台中涉及到的相关性能、性能的统计思想、模块的设计流程以及对相关数据进行的对比分析, 分析的结论与提出的改进正比公平调度算法的初衷相一致, 随后说明了采用本文中的统计方法的好处。大同小异, 其他的平台也可以运用此种方法, 具有一定的实际应用价值。

## 结 论

目前, HSUPA 系统由于关键技术的新调度算法的引入, 在性能上相比 R99 有了很大程度上的提高。为了使 HSUPA 系统能够具有更好的性能, 本文针对目前系统仍然存在的不足, 提出了几点创新。文章的创新点主要体现在以下几个方面:

首先, 由于高通公司提供的 VoIP 语音业务的静默期具有一定的延时, 使得静默时间不能很好地服从均值为 3s 的负指数分布的特点, 也不能保证任意一个 20ms 都发送一个数据包。针对这样的问题, 文章给出了相应的改进算法, 通过仿真对比, 新算法得到了较好的效果, 使得静默期没有了延时, 静默时间能够很好的服从均值为 3s 的负指数分布, 并且保证 20ms 发送一个数据包。

其次, 在无线通信环境中, 很难保证每个用户都经历相同或相似的衰落信道, 在各个信道的衰落特性相差悬殊的情况下, 正比公平调度算法不能很好的保证用户间的公平性。基于这样的问题, 本文给出了基于正比公平调度算法的两种改进算法, 改进算法通过增加一个监控更新模块来实现。将改进的调度算法与典型调度算法进行了仿真对比验证, 证明了改进调度算法有效地提高了用户的公平度。吞吐量虽然有所降低, 但是总体性能得到了改善。

最后, 一个平台的优劣主要是通过它的性能指标来进行衡量的。文章对性能指标的统计功能进行了相关的设计, 并对两个性能指标进行了分析, 有效地证明了改进正比公平调度算法的可行性。同时, 文章采用了 excel 表格来统计数据, 使得视觉上更加的清晰与规范。而且, 在实现的过程中, 文章采用的思想是将各个数据的统计功能都放在同一个模块中来完成, 对于研发人员来讲大大地方便了查看和管理。

在完成本课题的过程中, 由于无线通信环境是个庞大而又十分复杂的环境, 再加上时间的关系和本人学术水平的有限, 有些问题还需要进一步地改进与完善, 包括文中提到的其他业务模型的研究、平台中其它性能指标的分析等。

## 参考文献

- [1] 孙立新, 等. 第三代移动通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000.
- [2] 王立宁, 等. WCDMA 无线接入网原理与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 25-30, 356-382, 33-38.
- [3] 张新程, 等. HSUPA/HSPA 网络技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008:1.
- [4] Harri Holma, Antti Toskala. HSDPA/HSUPA 技术与系统设计—第三代移动通信系统宽带无线接入[M]. 叶银法等译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 55-83.
- [5] 李宇. HSUPA 系统级仿真及关键技术研究[D]. 电子科技大学硕士学位论文. 2006: 26-30.
- [6] 王东. WCDMA 高速上行分组接入技术及调度算法研究[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文. 2006: 43-50.
- [7] 刘琦. WCDMA HSUPA 中关键技术的研究和实现[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文. 2008.
- [8] 吕博. HSUPA 上行调度算法研究[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文. 2009.
- [9] 郑旸, 黄佩伟. HSUPA 基于 NodeB 的快速调度浅析[J]. 电信快报, 2006(07): 22-24.
- [10] 付琳, 周亮. 3GPP HARQ 简述[J]. 成都信息工程学院学报, 2002(2): 93-96.
- [11] 赵绍刚, 周兴围, 任树林, 陈莹莹. HSDPA 技术及其演进—HSUPA 与 HSPA+[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: (169-226), 39-40, 71-73.
- [12] 窦中兆, 雷湘. WCDMA 系统原理与无线网络优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004:232-234, 3-4, 7-8.
- [13] 张崇正, 陈明. HSUPA 系统中一种新的基于业务 QoS 的 TFC 选择算法[J]. 广东通信技术, 2005(11): 46-50.
- [14] 胡建村, 张萌, 陈滔, 杨大成. HSUPA 技术及其发展[J]. 电信科学, 2005(7):49-53.
- [15] 傅海洋, 沈晖, 陆素花. WCDMA 无线接入标准性能分析. 全国未来通信科技与产业发展战略高级研讨会, 2005: 49-62.
- [16] 范蕾. WCDMA HSUPA 技术中的上行接收机算法研究与仿真[D]. 电子科技大学硕士学位论文. 2006.
- [17] 王艳清. WCDMA HSUPA 技术中解调与功控算法的研究及实现[D]. 电子科技大学硕士学位论文. 2006.

学硕士学位论文. 2006.

- [18] 韩迪. HSDPA 关键技术及在 WCDMA 中的实现[J]. 黑龙江科技信息, 2007(6): p52.
- [19] 胡荣, 王洪玉, 黄爱苹等. 基于 WMSA 信道估计技术的 WCDMA 上行链路性能分析[J]. 电路与系统学报, 2000(3): 57-62.
- [20] J.Ylitalo and E.Tirola. Performance evaluation of different antenna array approaches for 3G CDMA uplink[J]. IEEE Proceedings of the 51<sup>st</sup> Vehicular Technology Conference, 2000, Vol.2: 883-887.
- [21] S. Moshavi. Multi-user detection for DS-CDMA communications[J]. IEEE Communications Magazine, 1996, 34(10): 124-136.
- [22] A. Duel-Hallen, J. Holtzman, and Z. Zvonar. Multiuser detection for CDMA systems[J]. IEEE Personal Communications, 1995, 2(2): 46-58.
- [23] S. Verdu. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1986, 32(1):85-96.
- [24] 3GPP TS 25.213 V5.7.0 Technical Specification. 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network. Spreading and modulation(FDD) (Release 6)[S], 2006-7.
- [25] X. H. Chen. Adaptive traffic-load shedding and its capacity gain in CDMA cellularsystems[C]. IEE Proc-Commun, Vol.142, No, 3, 1995:18-19.
- [26] Rutik K, et al. A. Wideband Radio Channel Model for MATLAB Environme, Version1.2. February 1997:11-13.
- [27] 3GPP TS 25.211 V5.7.0 Technical Specification. 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network. Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels(FDD) (Release 6)[S], 2004-12.
- [28] 3GPP TS 25.214 V5.7.0 Technical Specification. 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network. Physical layer procedures(FDD) (Release 6)[S], 2006-7.
- [29] 3GPP TS 25.321 V5.9.0 Technical Specification. 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network. Medium Access Control(MAC)protocol specification(Release6)[S], 2006-12.
- [30] 3GPP TSGR4-AHS R4AH-05066. Decisions and Further Steps for Enhanced

Uplink[S], 2004-12.

- [31] 3GPP TSGR1-37 R1-040519. Short Term Link Results[S], 2004-12.
- [32] 3GPP TSGR1-36 R1-040264. TP on Short Term LL Performance with 2 ms TTI[S], 2004-12.
- [33] 3GPP TSGR1-36 R1-040265. TP on Short Term LL Performance with 10ms TTI[S], 2004-12.
- [34] Harri Holma and Antti Toska. HSDPA and HSUPA for UMTS. John. Wiley& Sons, Ltd, 2006-2.
- [35] 于澄, 詹菲, 等. WCDMA 系统物理层设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [36] 竹南直, 等. 码分多址(CDMA)移动通信系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [37] 张长钢, 等. WCDMA 无线网络规划原理与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [38] 张平, 等. 第三代蜂窝移动通信系统-WCDMA[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000.
- [39] Kari Hooli, Markku Juntti. Inter-path interference suppression in WCDMA systems with low spreading factors[A]. VTC[C], 1999: 421-425.
- [40] Muckenheim Jens, Bernhard Urs. A Framework for Load Control in 3rd Generation CDMA Networks[J]. IEEE Globecom, 2001: 3738-3802.
- [41] Rave W, Kohler T, Voigtl J, et al. Evaluation of Load Control Strategies in an UTRA/FDD Network[J]. IEEE VTC, 2001.
- [42] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, et al. Data rate scheduling algorithms and capacity estimates for the CDMA forward Link[J]. Bell Labs Tech. Memo, 1999:17-23.
- [43] Hossam Fattah, Cyril Leung. An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks[J]. IEEE Wireless Communications, vol.9, 2002: 76-83.
- [44] Xu Zhaoji, Benoit Sebire. Impact of ACK/NACK Signalling Errors on High Speed Uplink Packet Access(HSUPA) [R] . Nokia Research Center, Beijing, 2005.
- [45] Duanyi Wang, Hisashi Kobayashi. Low-Complexity MAP Decoding for Turbo Codes [J] . Department of Electrical Engineering, Princeton University, VTC2000.
- [46] A. j. Viterbi. CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication [M] . Wesley, 1995.

- [47] Olivia Nemethova. HSDPA and HSUPA[R]. Mobile communication Seminar. 2005.
- [48] Jeong H K. Performance of Single. bit AdaptiVe Step-size Closed-Loop Power Control Scheme in DS-CDMA[J]. IEICE Trans commun. jul 1998: E(81)-B(7).

## 攻读硕士学位期间发表论文和取得的科研成果

- [1] 张春英, 栾晓明. 改进的正比公平调度算法. 哈尔滨: 信息技术, 已录用.

## 致 谢

转眼间，两年半的研究生生涯即将结束，它给我留下了深刻的体验和难忘的回忆。在此，谨向给予我帮助和支持的导师、同学、朋友和家人表示最诚挚的谢意！

首先要感谢我的导师栾晓明教授。在两年半的学习生活中，导师的言传身教使我受益匪浅，终生难忘。两年来，导师严谨的治学态度、渊博的专业知识、敏锐的洞察力和兢兢业业的科研精神深深地影响了我。在教给我们科研知识的同时，影响更深远的是老师潜移默化的传递给我们的人生观、价值观。从栾老师身上学到的东西，会使我受用终生！至此论文完成之际，谨向我的导师栾晓明教授表达我深深的敬意和最衷心的感谢。

本课题是我在中兴通讯实习期间所做的3G开发项目，在这里要感谢中兴通讯的同事们对我长期以来的宽容、鼓励和指导。

感谢我的同窗徐向斌、张茂磊。感谢他们在日常的学习和生活中给我的帮助和关心，使我的研究生生活变得更加充实和愉快。

感谢在我迷茫时给予我支持和鼓励的同学和朋友们，因为有了你们的信任，我才有勇气去克服学习和生活中遇到的种种困难，让我变得更加坚强、自信与独立。

感谢我的父母多年来对我的教导和养育之恩，含辛茹苦的为我创造良好的生活环境和学习机会，使我最终能够完成学业。

最后再一次对所有帮助和关心过我的人表示深深的感谢！