

摘 要

基于 IEEE 802.16 无线城域网协议的 WiMAX 系统，着眼于解决城域网中“最后一公里”的宽带无线接入问题，由于其易于配置，容易扩展，较低的维护和更新成本等方面的优点而得到广泛的关注。IEEE 802.16d 标准采用各种不同的机制保证业务的 QoS 要求，例如分组调度，功率分配等，但是，机制的具体实施将留给设计者自由设计。本论文主要针对 WiMAX 系统的分组调度和功率分配技术展开研究讨论。

论文首先对 WiMAX 系统的演进、技术特点、网络构架及采用的无线资源管理方法等方面作了简要介绍，而后阐述了分组调度与功率分配技术的基本原理，并总结分析了现有无线通信系统采用的调度与功率分配方法的优缺点。

基于上述分析，提出了一种适用于 WiMAX 系统的联合调度与功率分配算法，在保证每个业务流的平均数据传输速率的前提下，将分组调度与功率分配相结合，使得基站在统计平均意义下的发射功率达到最小，以减小对其他用户和小区的干扰；此外，结合考虑由于用户等待而带来的系统运行成本，提高用户的时延性能。为便于考察所提出算法的性能，依据 IEEE 802.16d 协议，利用 OPNET 仿真工具搭建系统仿真平台对提出算法进行仿真实验，仿真结果表明，提出的联合调度与功率分配算法能够提高系统传输效率，改善用户之间的公平性，保障用户服务质量要求。

关键词：微波存取全球互通（WiMAX）；分组调度；功率分配；IEEE 802.16；系统吞吐量；用户公平性；服务质量；联合调度与功率分配；无线资源管理

ABSTRACT

The WiMAX, based on the IEEE 802.16 standard for constructing wireless metropolitan area networks (WMAN), is originally developed to address the “last mile” problem. The WiMAX systems are attracting more and more attention for its rapid deployment, high scalability, and low maintenance and upgrade costs. IEEE 802.16d standard utilize different mechanisms to provide quality of service (QoS), such as packet scheduling, power allocation, admission control and so on. While, these mechanisms are mentioned in standards, the details of the designs are directly left to developers. In this paper, we mainly research on resource scheduling and power allocation for WiMAX systems.

In the paper, the evolution, technology characteristics, network framework and RRM of the WiMAX are overviewed at first. And then we describe the principle of the packet scheduling and power allocation. Meanwhile, we review and analyze the advantages and disadvantages of packet scheduling and power allocation adopted in wireless communication systems.

Afterwards, a novel joint scheduling and power allocation algorithm was proposed for IEEE 802.16d downlink. First, on account of the joint scheduling and power allocation, it minimize the total transmission power, subject to the QoS requirement of stream services, a minimum-data-rate requirement for each user within the cell, and thus alleviate the interference to other co-channels. In addition, the relationship between the scheduling priority and packet waiting time is taken into account, so as to improve the delay performance of the users. We construct IEEE 802.16d system simulation platform and put performance of the algorithm by OPNET. Simulation results show that, by the proposed scheme, system transmission efficiency is increased, fairness between users is improved and users' quality requirement is guaranteed.

Key words: Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX); Packet Scheduling; Power Allocation; IEEE 802.16; Throughout; Fairness; Quality of Service (QoS); Joint Scheduling and Power Allocation (JSPA); Radio Resource Management (RRM)

插图目录

图 1-1 WiMAX 网络参考模型.....	5
图 2-1 无线资源调度算法基本模型.....	9
图 3-1 IEEE 802.16d 协议栈模型 ^[1]	19
图 3-2 MAC PDU 的数据格式 ^[1]	20
图 3-3 PHY-OFDM FDD 下行帧结构 ^[1]	23
图 3-4 WiMAX 仿真平台网络结构图.....	24
图 3-5 PDF of Rayleigh.....	27
图 3-6 调制曲线.....	28
图 3-7 TRAFFIC_SERVER 节点模型.....	30
图 3-8 BS 节点模型.....	31
图 3-9 SS 节点模型.....	31
图 3-10 BS MAC 节点进程模型.....	32
图 3-11 ARQ 状态转移图.....	34
图 3-12 ARQ 实现流程.....	35
图 3-13 ss_mac 节点模块的进程模型.....	36
图 3-14 信道质量估计.....	37
图 3-15 DATA_RVD 和 ARQ 模块实现流程.....	38
图 4-1 调度及功率分配实现流程示意图.....	47
图 4-2 RR 算法程序结构流程.....	49
图 4-3 OP, JSPA 算法实现流程.....	50
图 4-4 三种算法的 SS 在 BS 中的平均数据速率估计值 (Mbps).....	52
图 4-5 JSPA 算法 SS 实际接收平均数据速率.....	53
图 4-6 OP 算法 SS 实际接收平均数据速率.....	54
图 4-7 RR 算法 SS 实际接收平均数据速率.....	54
图 4-8 三种算法平均发送功率.....	55
图 4-9 node_22 数据包延时累积分布函数图.....	56
图 4-10 小区吞吐量曲线图.....	57

表格目录

表 1.1	IEEE 802.16 系列标准族谱.....	2
表 1.2	IEEE 802.16d/e 主要技术特征.....	4
表 2.1	三种算法性能比较.....	12
表 3.1	IEEE 802.16d 空中接口物理层分类.....	22
表 3.2	规划频带宽度为 14MHz 时 3400~3414MHz 频带的允许信道带宽.....	23
表 3.3	传播路径损耗参数.....	25
表 3.4	SUI-3 信道参数配置.....	26
表 3.5	达到 10^{-6} 误比特率所需 SNR 比较.....	28
表 3.6	系统参数假设.....	29
表 4.1	数据速率与所需信噪比 (10^{-6} 误比特率) 对应关系表.....	44
表 4.2	schedule_scheme 属性.....	46
表 4.3	JSPA_Latency 属性.....	46

英文缩略语

AAA	Authentication、Authorization、Accounting	认证、授权和计费
AAS	Adaptive Antenna System	自适应天线系统
AMC	Adaptive Modulation and Coding	自适应调制编码
ARQ	Automatic Repeat Request	自动请求重传
ASN	Access Service Network	接入业务网络
ATM	Asynchronous Transfer Mode	异步传输模式
BE	Best Effort	尽力而为
BPSK	Binary Phase Shift Keying	二进制移相键控
BS	Base Station	基站
BTC	Block Turbo Code	分组 Turbo 码
BWA	Broadband Wireless Access	宽带无线接入
CBR	Constant Bit Rate	恒定比特率业务
CC	Convolutional Code	卷积码
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CID	Connection Identifier	连接标识
CPS	Common Part Sublayer	公共部分子层
CRC	Cyclical Redundancy Check	循环冗余校验
CS	Convergence Sublayer	汇聚子层
CSN	Connection Service Network	连接业务网络
CTC	Convolutional Turbo Code	卷积 Turbo 码
DAMA	Demand Assigned Multiple Access	按需分配多址接入
DCD	Downlink Channel Descriptor	下行信道识别符
DL-MAP	Downlink Map	下行链路映射
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准协会
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FEC	Forward Error Correction	前向纠错
FIFO	First-In First-Out	先入先出
FUSC	Full Usage of the Subchannels	使用所有子信道
GPC	Grant per Connection	保证每个连接带宽需求
GPS	Generalized Processor Sharing	通用处理机共享
GPSS	Grant per SS	保证每个 SS 带宽需求
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	混合自动重传请求
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access	高速下行分组接入

IMS	IP Multimedia Subsystem	IP 多媒体子系统
JSPA	Joint Scheduling and Power Allocation	联合调度与分组调度
LMDS	Local Multipoint Distribution System	本地多点分配系统
LDPC	Low Density Parity Check	低密度奇偶校验码
LOS	Line-of-Sight	视距
LS	Least Square	最小二乘方法
MA	Margin Adaptive	裕量自适应
MAC	Media Access Control	媒体接入控制
MAN	Metropolitan Area Network	城域网
MAX C/I	Maximum Carrier-to-Interference Rate	最大载干比
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制编码方式
MIB	Management Information Base	管理信息库
MMDS	Multichannel Microwave Distribution System	多路微波分配系统
MS	Mobile Station	移动台
NLOS	Non-Line-of-Sight	非视距
nrtPS	non-real-time Polling Service	非实时轮询业务
NSP	Network Service Provider	网络服务提供商
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex	正交频分复用
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access	正交频分多址接入
OP	Opportunistic Scheduling	机会调度
PDF	Probability Density Function	概率密度函数
PDU	Protocol Data Unit	协议数据单元
PF	Proportional Fairness	正比公平性
PFQ	Packet Fair Queuing	分组公平排队
PHS	Payload Header Suppression	负荷头抑制
PHY	Physical Layer	物理层
PKM	Privacy Key Management	密钥管理
PMP	Point-to-Multipoint	点对多点
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
QoS	Quality of Service	服务质量
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	正交相移键控
RA	Rate Adaptive	速率自适应
RNC	Radio Network Controller	无线网络控制器
RR	Round Robin	轮询
RRM	Radio Resource Management	无线资源管理
rtPS	real-time Polling Service	实时轮询业务

SAP	Service Access Point	业务接入点
SEFF	Smallest Eligible virtual Finish time Fist	最小合格完成时间标签优先
SFF	Smallest virtual Finish time Fist	最小完成时间标签优先
SFID	Service Flow Identifier	业务流标识
SNR	Signal to Noise Rate	信号噪声比
SIR	Signal to Interference Ratio	信号干扰比
SSF	Smallest virtual Start time First	最小开始时间标签优先
SS	Subscriber Station	用户终端
STC	Space Time Coding	空时码
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TDM	Time Division Multiplexing	时分复用
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
UCD	Uplinklink Channel Descriptor	上行信道识别符
UGS	Unsolicited Grant Service	主动带宽分配业务
UL-MAP	Uplink Map	上行链路映射
VBR	Variable Bit Rate	可变数据速率
WCDMA	Wideband CDMA	宽带 CDMA 系统
WFI	Worst-case Fair Index	最坏公平指数
WFQ	Weighted Fair Queuing	加权公平排队
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	微波存取全球互通
WLAN	Wireless Local Area Network	无线局域网
WRR	Weighted Round Robin	加权轮询

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：周雄弟 日期：2007.2.4

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名：周雄弟 导师签名：于京明 日期：2007.2.5

第1章 绪论

1.1 研究背景

多年来 802.11x 技术一直与许多其他专有技术一起被用于 BWA, 并获得很大成功, 但是 WLAN 的总体设计及其提供的特点并不能很好地适用于室外的 BWA 应用。当其用于室外时, 在带宽和用户数方面将受到限制, 同时还存在着通信距离等其他一些问题。基于上述情况, IEEE 决定制定一种新的、更复杂的全球标准 IEEE 802.16, 这个标准应能同时解决物理层环境和 QoS 两方面的问题, 以满足 BWA 和“最后一英里”接入市场的需要。IEEE 802.16 系列标准以其容量高, 覆盖面广, 部署灵活, 配置伸缩性强, 可快速提高宽带业务等优点得到广泛青睐。

1.1.1 WiMAX 系统演进

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, 微波存取全球互通) 是 IEEE 802.16 在市场推广时采用的名称, 也是 IEEE 802.16 d/e 的别称。WiMAX 的物理层和 MAC 层基于 IEEE 802.16 工作组中开发的系列无线城域网技术。WiMAX 技术涉及到两个国际组织: IEEE 802 标准委员会 802.16 工作组和 WiMAX 论坛。IEEE 802.16 工作组是标准的制定者, 主要针对无线城域网的物理层和 MAC 层制定规范和标准。WiMAX 论坛是 IEEE 802.16 技术和产业链的推动者, 该组织的目标在于建立一套基于 IEEE 802.16 标准和 ETSI HiperMAN 标准的认证体系, 同时还致力于可运营的宽带无线接入体系的研究、需求的分析、应用模式的探索、市场的拓展等一系列大力促进宽带无线接入市场发展的工作。WiMAX 论坛成立于 2001 年 4 月, 是一个非盈利组织, 现已发展有 350 多个成员单位, 其中包括众多业界领先的设备制造商、部件供应商(芯片、射频、天线、软件和测试服务等)、服务供应商和系统集成商, 人们熟悉的 Intel、Nokia、摩托罗拉、思科等公司都位列其中。该论坛促进了供应商解决设备兼容问题, 加速了 WiMAX 技术的使用。

IEEE 802.16 标准又称为 IEEE Wireless MAN 空中接口标准, 规范了工作于不同频带的无线接入系统空中接口。由于它规定的无线系统覆盖范围在公里量级, 因此 IEEE 802.16 系统主要应用于城域网。根据使用频带高低的不同, IEEE 802.16 系统可分为应用于视距 (LOS) 和非视距 (NLOS) 两种。使用 2GHz~11GHz 频带的系统应用于非视距范围, 而使用 10GHz~66GHz 频带的系统应用于视距范围。根据是否支持移动特性, IEEE 802.16 标准又分为固定宽带无线接入空中接口标准和移动宽带无线接入空中接口标准。

目前, IEEE 802.16 标准系列包括 IEEE 802.16、IEEE 802.16a、IEEE 802.16c、IEEE 802.16d、IEEE 802.16e、IEEE 802.16f 和 IEEE 802.16g 共 7 个标准。各种 IEEE 802.16 系列标准如表 1.1 所示。2001 年 12 月颁布的 IEEE 802.16 标准^[34]对使用 10GHz~66GHz 频段的固定宽带无线接入系统的空中接口物理层和 MAC 层进行了规范, 为宽带无线接入的实现提供了基础, 由于其使用的频段较高, 因此只能承载在视距的环境中, 这些限制不利于固定宽带无线接入技术的推广, 所以在 2003 年 1 月份,

IEEE 又发布了扩展协议 IEEE 802.16a^[35], 目的在于使固定宽带无线接入技术也能支持非视距传输, IEEE 802.16a 标准规范了使用 2GHz~11GHz 许可和非许可频段的固定宽带无线接入系统的空中接口物理层和 MAC 层, 覆盖范围最远可达 50km (通常小区半径在 10km 以内)。此外, IEEE 802.16a 的 MAC 层提供了 QoS 保证机制, 支持语音和视频等实时业务。

2002 年正式发布的 IEEE 802.16c^[36] 标准是 IEEE 802.16 标准的增补文件, 规范工作在 10GHz~66GHz 频段 IEEE 802.16 系统的兼容性, 它详细规定了 10GHz~66GHz 频段 IEEE 802.16 系统的一系列特性和功能。

表 1.1 IEEE 802.16 系列标准族谱

标准号	定义及主要业务应用
802.16	2001 年发布 定义了 10G~66G 固定宽带无线接入系统空中接口标准, 采用了 TDM/TDMA 多址接入方式, 单载波调制。本质上是为了 LDMS 实现互操作而制定的一个标准, 其业务与应用与 LMDS 相似。
802.16a	2003 年发布 定义了 2G~11G 的固定宽带无线接入系统空中接口标准, 本质上是为了 MMDS 实现互操作而制定的一个标准, 其业务与应用与 MMDS 相似。
802.16c	2003 年发布 10G~66G 固定宽带无线接入系统空中接口标准增补文件, 详细系统框架。
802.16d	2004 年发布 2G~66G 固定宽带无线接入系统空中接口标准, 802.16a 的改进版本, 用 WiMAX 微型天线取代以前版本中的室外天线结构, 可用于 PC 机网卡等小型设备, MAC 协议支持 TDM/IP 综合业务。
802.16e	2006 年初发布 802.16d 的增补版本, 是支持客户端移动性的规范, 使用户可以在基站之间自由切换和漫游, 进而实现在不同的 802 网络之间切换。
802.16f	2006 年初发布 固定宽带无线接入系统空中接口管理信息库 (MIB) 要求。
802.16g	固定和移动宽带无线接入系统空中接口管理平台流程和服务要求。

IEEE 802.16d 标准^[1]是前几个 IEEE 802.16 标准的修订版本, 在 2004 年下半年正式发布, 该标准冻结版本称为 IEEE 802.16-2004。IEEE 802.16d 详细规范了 2GHz~66GHz 频段的空中接口物理层和 MAC 层, 定义了支持多种业务类型的固定宽带无线接入系统的 MAC 层和相对应的多个物理层, 引入 OFDM 技术, 允许非视距传输和点到多点 (PMP) 通信、支持网状 (MESH) 拓扑结构, 并且允许灵活的用户部署和操作。为了能够平滑过渡到支持用户站以车辆速度移动的 IEEE 802.16e 标准, IEEE 802.16d 增加了部分功能以支持用户的移动性。按照目前的技术发展情况, IEEE 802.16d 主要定位于企业用户, 提供长距离传输的手段。它对 IEEE 802.16 和 IEEE 802.16a 进行了整合和修订, 但仍属于固定宽带无线接入规范, 是相对比较成熟并且最具有实用性的一个标准版本。目前各大厂商都基于该标准设计和推出各种固定无线接入产品, IEEE 802.16d 协议已经成为业界标准。

IEEE 802.16e 标准^[2]于 2006 年初发布, 该标准冻结版本称为 802.16-2005, 暂时还没有正式产品

面市。IEEE 802.16e 标准与前几个标准的最大区别在于对移动性的支持，它规定了同时支持固定和移动宽带无线接入的系统，工作在 2GHz~6GHz 之间适宜于移动性的许可频段，支持用户终端以车辆速度（至少 120 km/h）移动，IEEE 802.16d 规定的固定无线接入用户能力并不因此受到影响，同时，该标准也规定了支持基站或扇区间高层切换的功能。IEEE 802.16e 的用户群定位于个人用户，支持用户在移动状态下宽带接入网络。IEEE 802.16e 标准面向更大范围的无线点到多点城域网系统，该系统可提供核心公网接入。

IEEE 802.16f 是 IEEE 最新的 16 系列标准之一，定义 IEEE 802.16 固定无线接入系统 MAC 层和物理层的管理信息库。IEEE 802.16g 的目的是为了规定 802.16 管理流程和接口，从而实现 802.16 设备的互操作和网络资源、移动性和频谱的有效管理。IEEE 802.16g 标准的工作是围绕管理平面进行的，目前正处于征求文稿阶段。

1.1.2 WiMAX 技术特点及网络结构

IEEE 802.16d/e 的物理层可选用单载波、OFDM 和 OFDMA 共 3 种技术。因为 OFDM 和 OFDMA 只用于小于 11GHz 频段的信道条件传输，为了兼容 10G~66GHz 频段的视距传输，这里 IEEE 802.16d/e 采用了单载波这个选项。虽然在 IEEE 802.16d/e 协议中，单载波物理层也可以用于 2G~11GHz 频段，但通常认为 IEEE 802.16d 典型的物理层技术是 OFDM，IEEE 802.16e 的典型物理层技术是 OFDMA。IEEE 802.16d OFDM 物理层采用 256 个子载波，OFDMA 物理层采用 2048 个子载波，信号带宽从 1.25M~20MHz 可变。IEEE 802.16e 对 OFDMA 物理层进行了修改，使其可以支持 128、512、1024 和 2048 共四种不同的子载波数量，但子载波间隔不变，信号带宽与子载波数量成正比，这种技术称为可扩展的 OFDMA。采用这种技术，系统可以在移动环境中灵活适应信道带宽的变化。

在多址方面，IEEE 802.16d/e 在上行采用了 TDMA，下行采用了 TDM 支持多用户传输。另一种多址方式是 OFDMA，以 IEEE 802.16d 标准 2048 个子载波的情况为例，采用 FUSC 模式时系统将所有可用的子载波分为 32 个子信道，每个子信道包含若干个子载波。多用户多址采用与跳频类似的方式实现，只是跳频的频域单位为一个子信道，时域单位为 1、2 或 3 个符号周期。

在调制技术方面，IEEE 802.16d/e 支持的最高阶调制方式为 64QAM，相对于蜂窝移动通信系统，IEEE 802.16d/e 更强调在信道条件较好时实现极高的峰值速率。为适应高质量数据通信的要求，IEEE 802.16d/e 选用了块 Turbo 码、卷积 Turbo 码等纠错能力很强但解码延时较大的信道码，同时也考虑使用低复杂度、低时延的 LDPC 码。

在双工方面，IEEE 802.16d/e 支持 FDD 或者 TDD 两种方式，其物理层技术基本相同。相对而言，3G 技术中 FDD 和 TDD 模式采用的物理层有较大的不同。IEEE 802.16d/e 在 5MHz 频带上可以实现约 15Mbit/s 的速率，频谱效率为 3bit/s/Hz，与 HSDPA 类似。但是 IEEE 802.16d/e 在固定或低速环境下可以使用更大带宽（20MHz），实现高达 75Mbit/s 的峰值速率，这是现有蜂窝移动通信系统难以达到的。这充分体现出 OFDM 技术在使用更宽频带方面的优势。

IEEE 802.16d/e 标准支持全 IP 网络层协议，IEEE 802.16d/e 设备可以作为一个路由器接入现有的 IP 网络。但现有 IP 核心网缺乏有效的移动性管理能力。WiMAX 论坛已经开始开发网络层协议，IEEE 802.16 NetMAN 工作组也已开展这方面的工作。同时，IEEE 802.16 协议也可以通过一个 ATM 汇聚

子层将 ATM 信元映射到 IEEE 802.16d/e MAC 层, 具备支持 3G 核心网的潜力。也就是说, WiMAX 支持和 3G 系统的互通和融合。

IEEE 802.16d/e 的 MAC 层支持多种 QoS 等级以适应 VoIP、可视电话、流媒体、在线游戏、浏览、下载等不同的业务类型, 包括主动分配带宽、实时轮询、非实时轮询和尽力而为, 其中最后一种为竞争接入的调度机制。IEEE 802.16e 增加了节点模式, 以支持移动终端。除正常工作状态外, 还支持空闲状态和睡眠状态。

表 1.2 IEEE 802.16d/e 主要技术特征

技术参数	IEEE 802.16d	IEEE 802.16e
子载波数	OFDM: 256 OFDMA: 2048	OFDM: 256 OFDMA: 128、512、1024、2048
带宽 (MHz)	1.75~20	1.25~20
频段 (GHz)	2~11, 10~66	<6
移动性	固定或者游牧	<120km/h
双工方式	FDD/TDD	FDD/TDD
峰值速率 (Mbit/s)	75 (20MHz)	15 (5MHz)
调制方式	BPSK、QPSK、16QAM、64QAM	
信道编码	CC、BTC、CTC、LDPC	
链路自适应	AMC、功率控制、HARQ	
小区间切换	不支持	支持
省电模式	不支持空闲、睡眠模式	支持空闲、睡眠模式
增强性技术	智能天线、空时码、空分多址、宏分集 (802.16e)、mesh 网络拓扑	
接入控制	主动带宽分配、轮询、竞争接入相结合	
QoS	支持 UGS、rtPS、nrtPS 和 BE 等 4 种 QoS 等级	

WiMAX 网络架构应该可以同时满足多种宽带应用场景的要求, 如固定、游牧、便携、简单移动、全移动等模式并基于全 IP 的网络架构, 充分利用 IP 交换、路由以及其它可以重用的 IP 网络功能。WiMAX 网络参考模型如图 1-1 所示。WiMAX 网络参考模型由接入业务网络 (ASN), 连接业务网络 (CSN), 固定和移动用户组成。

(1) 接入业务网络 ASN (Access Service Network)

ASN是一套网络功能的集合, 为WiMAX用户提供无线接入。主要包括以下功能:

- 在基站和WiMAX终端之间建立层2连接, 网络发现和选择功能;
- 在Proxy Mobile IP (PMIP) 模式下, 将AAA 控制消息传递给WiMAX 用户所属的归属NSP (H-NSP) 协助完成鉴权、授权和计费;
- 协助高层与WiMAX终端建立层3连接, 即IP地址分配;
- 无线资源管理。

一个 ASN 由基站和接入网关 (ASN-GW) 组成。一个 ASN 可以被一个或者多个 CSN 共享。

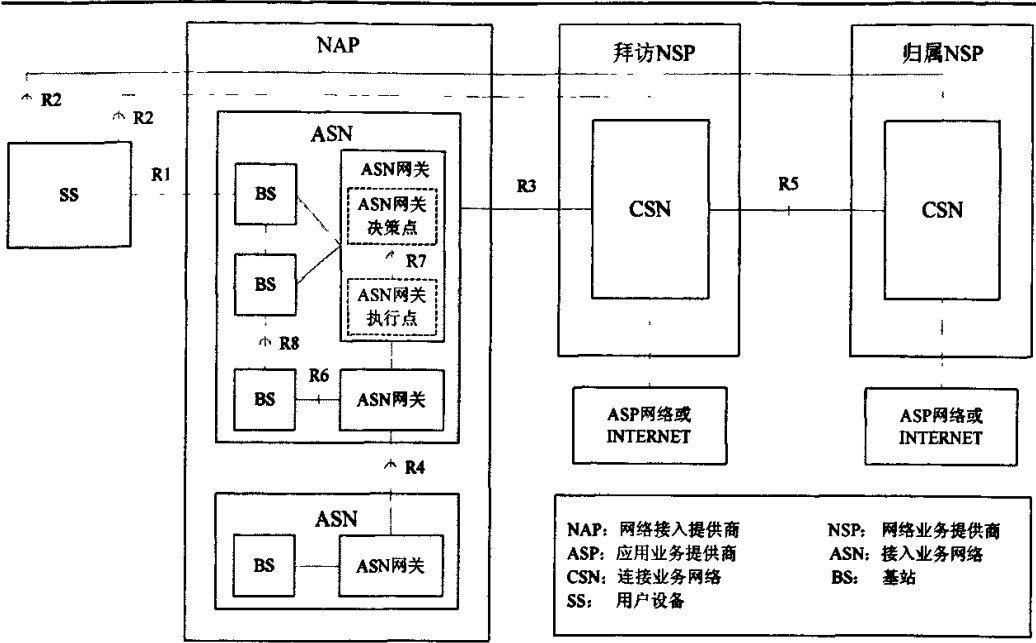


图 1-1 WiMAX 网络参考模型

(2) 连接业务网络 CSN(Connection Service Network)

CSN 被定义为一套网络功能的组合，为 WiMAX 用户提供 IP 连接。一个 CSN 可以提供以下功能：

- 为用户会话连接，给终端分配 IP 地址；
- Internet 接入；
- AAA 代理或者服务器；
- 基于用户系统参数的 QoS 以及许可控制；
- ASN 和 CSN 之间的隧道建立以及管理；
- 为漫游服务的 CSN 之间的隧道建立和管理；
- 用户计费以及运营商之间的结算；
- ASN 之间的移动性管理；
- WiMAX 服务，例如基于位置的服务、点对点服务、多播组播服务、IMS 和紧急呼叫等。

CSN 可以由路由器、AAA 代理/服务器、用户数据库、Internet 网关设备等组成。CSN 既可以作为全新的 WiMAX 系统的一个新建网元，也可以利用部分现有的网络设备实现 CSN 功能

(3) 网络参考点

R1: WiMAX 终端与接入网络 ASN 之间的接口，与 IEEE 802.16 的空中接口物理层和 MAC 层一致，根据需要可能增加管理面的功能。

R2: 在 WiMAX 终端与连接服务网 CSN 之间的逻辑接口，提供与鉴权，业务授权以及 IP 主机配置管理等服务。该接口仅仅是一个逻辑的接口。通过其他的物理接口提供实质的连接。

R3: 接入网络 ASN 和连接业务网络 CSN 之间互操作的接口，包括一系列控制和承载平面的协

议。

R4: 主要定义与 ASN 之间移动性有关的控制面和承载面协议。

R5: 该接口包括控制面和承载面的协议栈, 以满足拜访 CSN 与归属 CSN 之间互连需要。

R6: 属于 ASN 内的接口, 由承载面和控制面的协议栈构成, 以满足 BS 和 ASN-GW 之间交互的需要。

R7: ASN 网关的内部接口, 即 ASN 网关决策点与 ASN 网关执行点之间的控制平面的接口。

R8: 该接口属于 BS 之间的接口, 由承载面和控制面协议栈组成, 为了满足基站之间快速无缝切换的需要。承载面定义了一套协议, 允许切换时在所有涉及到的 BS 之间传递数据。控制面包含了 BS 之间的通信协议, 同时在切换时, 允许在所有涉及到的 BS 之间传递控制信息。

1.1.3 无线资源管理 (RRM)

无线资源管理的目标是在有限带宽的条件下, 为网络用户提供服务质量(QoS)保障, 灵活分配和动态调整无线网络的可用资源, 防止网络拥塞和降低信令负荷。无线资源管理功能由几个功能实体来实现, 包括功率控制实体、接纳控制实体、越区切换以及分组调度等方面。每个实体的具体算法与网络结构、多址接入方式、智能天线运用方式, 业务种类和业务模型、上下行场合等因素有关^[9]。

第三代移动通信系统(3G) 的无线资源管理机制主要集中在无线网络控制器(RNC)中, 由 RNC 统一集中控制资源的分配、共享和使用^[10]。但在 WiMAX 系统中, 无线资源管理主要集中在基站端, 并没有一个专门的集中控制器, 不同基站的无线资源管理信息需要相互交流, 以保证整个网络高效工作。WiMAX 系统的无线资源管理算法在标准中并没有定义, 由设备产家自行确定。对于 WiMAX 系统来说, 其无线资源管理算法主要包括: 接入和负载控制、功率控制、基于 OFDM 的资源单元分配、业务流排队管理和分组调度等。

(1) 接入和负载控制

接入控制是无线资源管理中一个很重要的组成部分, 它的任务是决定一个新的业务是否被网络允许或者当前的业务是否可以被更新。接入控制算法估计由业务的接入和更新在网络中引起的负载增量, 分别在上行链路和下行链路中进行计算。当且仅当上下行链路的接入标准都满足了, 才允许业务的建立、更新和数据的发送。负载变化的估计不仅需要接入小区内部进行, 为了把相邻小区间的干扰考虑进去, 也必须在相邻小区进行负载变化的估计。目前, 接入控制算法的研究难点在于如何评估基于 OFDM 物理层技术的上下行链路负载, 如何提出先进的适合不同调度业务 QoS 要求的接入控制机制, 在保证尽量多的用户能接入网络得到高质量服务的同时, 充分兼顾不同业务的 QoS 要求。

当系统负荷超过某一预定的门限时, 必须采用负载控制策略保证系统迅速返回到系统稳定工作状态。无线资源管理体系的一个重要任务是确保系统不过载并保证系统稳定。如果系统进行了很好的规划, 且接入控制和分组调度算法都正常高效工作, 可以大大降低过载发生的可能。由于 WiMAX 系统主要用于传输分组数据业务, 可以通过降低非实时业务的传输速率来确保系统迅速达到稳定状态。

(2) 功率控制

在无线城域网中需要一个功率控制算法来进行接入时的功率校准和通信中的周期性功率调整。功率控制过程包括两部分：固定部分和由反馈自动调整部分。功率控制算法应充分考虑不同数据脉冲传输格式的不同，把功率控制算法和自适应调制编码方式结合起来。IEEE 802.16 协议中只给出了一个功率控制算法所应遵循的准则，如何设计一个性能优良且遵循协议框架的功率控制算法由厂家自己决定。

(3) OFDM 资源分配及调度

无线城域网在实现带宽分配时，BS 分配给用户 (SS) 的带宽有“保证每个连接带宽需求 (Grant per connection, GPC)”与“保证每个 SS 带宽需求 (Grant per SS, GPSS)”两种方式^[4]。当采用 GPC 模式时，BS 调度器按照不同的连接分配带宽，连接独立于 SS，就是说同一个 SS 可能有多个连接；当采用 GPSS 模式时，BS 调度器根据不同的 SS 分配带宽而不区分连接。另外，由于无线城域网采用了 OFDM 传输技术，而 OFDM 无线网络中的资源分配又和现存的无线网络中的资源分配有很大不同，可以大致分为两类：MA 算法(Margin Adaptive Algorithm)，其算法的优化目标是在满足各个用户传输速率的前提下，根据各个用户的瞬时信道状况，动态的为用户分配子载波，并确定在各个子载波上传输的比特和功率，使总的发射功率最小；RA 算法(Rate Adaptive Algorithm)，其目标是在总的发射功率和每一个用户的最小速率的限制下，动态分配系统资源，使系统的吞吐量最大。

(4) 切换控制

IEEE 802.16e 标准化工作完成后，移动宽带无线接入系统要实现商业应用就必须解决切换、移动性管理和终端状态管理（激活和休眠状态转换）等与蜂窝组网有关的问题，因此结合用户基站移动性的无线资源管理算法就变得非常必要。IEEE 802.16e 标准并未提出切换中的无线资源分配方案，这是重要研究内容之一。3G 网络的移动性管理和切换过程中的资源分配方案具有借鉴意义，但无线城域网系统主要针对多媒体宽带数据业务，目前已有的与切换及接入控制有关的算法大多基于电路交换型业务。电路交换型业务在通信过程中的服务质量要求固定不变，而无线城域网系统中实时服务流速率可在上下界之间变化，系统负载随业务流的速率变化而变化，因此需要研究基于承载多种业务的无线网络的动态 QoS 管理或动态资源分配算法。

(5) 分组调度

调度算法在分组层面上给出带宽分配和复用机制。基于 QoS 结构需要采用一系列调度机制：在 GPSS 方式下，SS 内的上行调度模块内使用多级的调度机制，即最上层为基于严格优先级的调度，然后为每种业务根据其特性选择不同的调度算法，例如 UGS 业务采用分配周期固定带宽；rtPS 业务采用 EDF 调度策略；nrtPS 使用 WRR 算法；BE 采用 FIFO 算法。

WiMAX 是为具有不同服务质量需求的各种业务类型提供服务的无线网络系统，分组调度要考虑无线信道的变化，才能在保障 QoS 的基础上达到系统整体性能的提高。在 WiMAX 系统中，上下行调度相互独立，基站只负责调度下行链路业务流，上行链路不需要基站调度。基站将无线资源分配给各个用户站，由用户站调度上行链路业务流，保证了上行调度的实时性。在这类网络模型下，

研究调度算法需要处理下行所有业务流之间的公平性和每个用户站中的上行业务流之间的公平性，为无线城域网系统中的业务流提供不同程度的长短期公平性、长短期吞吐量界限、平均和最差延迟。

1.2 本论文的主要内容

本论文的主要研究工作是针对 IEEE 802.16 标准，对无线资源调度和功率分配技术以及两者的联合进行研究，探讨能够优化系统性能的合理的资源调配方案。再利用 OPNET 等工具构建 WiMAX 系统仿真平台，重点考察提出方案在吞吐量，延时及发送功率等方面的性能，验证方案的可行性。论文共五章，各章主要内容安排如下：

第一章主要介绍了本论文的研究背景，首先简要介绍了 WiMAX 系统从 IEEE 802.16 到 IEEE 802.16g 共七个版本的演进；而后从多址方式，调制编码等方面描述了 WiMAX 系统的技术特点，同时详细介绍了 WiMAX 系统的网络构架；最后就 WiMAX 系统采用的无线资源管理方法作了简要介绍。

第二章详细阐述了分组调度和功率分配技术的基本原理，分析了现有的调度算法及功率分配方案的特点及其对系统性能的影响，总结了现有的调度算法及功率分配方案的优点和缺点。

第三章首先简要介绍了 IEEE 802.16d 标准的 MAC 层规范和物理层规范，而后从网络拓扑结构、节点模型、进程模型三个层次，对使用 OPNET 搭建的基于 IEEE 802.16d 标准的 WiMAX 系统仿真平台作了详细的介绍。

第四章对联合无线资源管理进行研究，提出了一种适用于 WiMAX 系统的联合调度与功率分配算法，同时详细说明了算法在系统仿真平台中的实现并进行仿真，最后对仿真结果作了简要分析。

最后，第五章对全文进行了总结。

第2章 调度算法及功率分配原理

随着无线通信技术的发展,业务类型百花齐放,用户数量迅速增长,分组调度算法和功率分配策略等无线资源管理方法的设计显得越来越重要。由于每种业务都有着多方面的性能要求,如何同时满足多个方面的性能要求是当前的研究难点。本章主要分析了现有的调度算法及功率分配方案的特点及其对系统性能的影响。

2.1 调度算法原理

图 2-1 给出了一个无线资源管理算法的基本模型^[12]。这里假定无线资源管理功能由每个基站独立完成。当有新用户或切换用户发出呼叫请求时,基站首先调用接纳控制算法,决定是否阻塞该呼叫,如果允许接纳该呼叫,则根据系统划分的业务类型将该请求添入对应类别的请求队列中,同时为其分配相应的缓冲队列存储其数据信息。而后,系统调用分组调度算法决定为不同呼叫的服务顺序,并为之分配发射功率和传输速率。为简化起见,将功率和速率控制算法统一纳入了分组调度算法模块中,在实际系统中,可以采用电路交换方式为实时业务提供优先服务以保证其延迟要求,而采用分组交换方式为非实时业务提供尽力而为的服务以充分利用系统的剩余容量,优化频谱利用率。因此,对于电路交换的实时业务而言,分组调度算法蜕化为功率控制算法,由功率控制算法计算不同用户所需的发射功率,对于分组交换的非实时业务而言,分组调度算法将决定不同用户分组的传输顺序、传输时间、传输速率与发射功率。

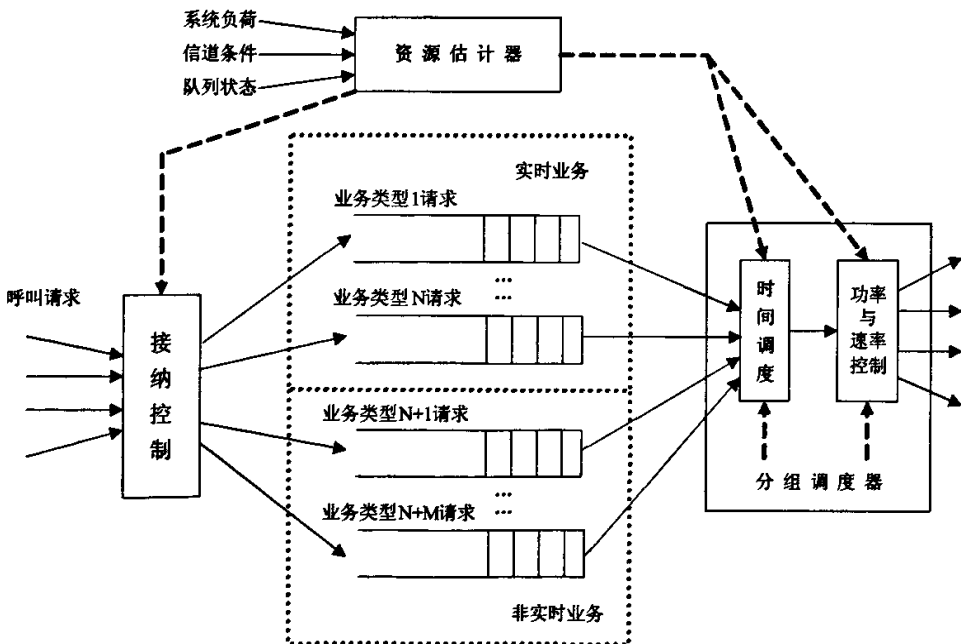


图 2-1 无线资源调度算法基本模型

本小节主要针对分组调度器展开讨论，无线网络同有线网络相比具有很大的特殊性，最重要的三点就是其带宽有限、信道的位置依赖性以及信道误码率高，具有突发性。基于上述原因，尽管在有线网络中有许多成熟的调度算法，但是这些算法却不能直接应用在无线通信领域。在探讨将有线网络的调度算法引入无线网络需要注意无线通信自身的特性^[11]：

- 信道的容量是动态变化的，且信道状态具有位置依赖性；
- 信道误码高，具有突发性；
- 由于带宽有限，存在多用户对信道的竞争，而移动用户并不知道竞争状态；
- 调度过程应该同时兼顾上行链路和下行链路，即上下行链路存在不同的状态；
- 对于移动用户还存在处理器能力不同以及电量限制的问题。

因此，在研究无线网络分组调度算法时需要考虑到随时间和终端位置变化的无线链路容量、增加了传输链路的易变性的用户移动性。这样的链路需要我们研究具备某种动态机制的调度算法，从而处理时间相关和位置相关的信道条件变化。因此，在分组调度算法中应合理考虑无线信道的变化，采用跨层设计思想，提出更优的无线调度算法。

2.1.1 经典调度算法

在无线资源管理调度算法的研究中，公平性和系统吞吐量是衡量调度策略的重要指标之一，在提高系统吞吐量的同时，必须使各个用户尽可能公平地共享无线资源。但是，在无线网络中，由于用户处于不同的信道状态，提高系统吞吐量和保证公平性两者是矛盾的，为了保证公平性，须将部分信道分配给信道状态差的用户，从而降低了系统吞吐量；换言之，调度策略在达到一定的系统吞吐量前提下，存在一个能保证的最大公平性。因此，分析无线分组调度算法的公平性及其与吞吐量之间的关系，对设计分组调度策略有较大的参考价值。下面简要分析三种经典调度算法的公平性与吞吐量性能。

A. 轮询调度算法 (Round Robin, RR)

在无线网络中，由于不同用户在不同时刻呈现不相等的信道容量，调度算法的公平性可以分为两种^[13]，一是时间公平，以各个用户获得信道的的时间或者几率来衡量；二是容量公平，以各个用户获得的信道容量来衡量。一般说来，两者是不相等的，而且调度策略为了保证容量公平，必须比保证时间公平牺牲更多的系统吞吐量，因为为保证容量公平，信道状态好的用户得到少的信道时间，信道状态差的用户得到多的信道时间，而为保证时间公平，各用户拥有相同的信道时间。

RR 调度算法^[15]是一种让用户按一定权值轮流使用信道的调度策略，设 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M]$ 是用户的权向量，则是 β_m 用户 m 得到信道的的时间，满足 $\beta_m \geq 0, \forall m$ ，且 $\sum_{m=1}^M \beta_m = 1$ 。根据文献[14]中关于公平性的定义，RR 调度的时间公平性和容量公平性分别为：

$$F_T(\beta) = \frac{(\sum_{m=1}^M \beta_m)^2}{M \sum_{m=1}^M \beta_m^2} = \frac{1}{M \sum_{m=1}^M \beta_m^2} \quad (2.1)$$

$$F_C(\beta) = \frac{(\sum_{m=1}^M \beta_m C_m)^2}{M \sum_{m=1}^M (\beta_m C_m)^2} \quad (2.2)$$

注意到公平性是非负的数。最大值为 1，是最公平的情况，此时对于时间公平性，每个用户得到相同的信道使用时间，即 $\beta_m = 1/M, \forall m$ ；对于容量公平性，每个用户得到相同的信道容量，即 $\beta_i C_i = \beta_j C_j, \forall i, j$ 。公平性最小值为 $1/M$ ，是最不公平的情况，此时只有一个用户可以使用信道。

RR 调度算法系统容量为：

$$W(\beta) = \sum_{m=1}^M \beta_m C_m \quad (2.3)$$

其中 C_m 是用户 m 的信道遍历容量，

$$C_m = E_n \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h \cdot P}{\sigma^2} \right) \right\} = \int_0^\infty \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{h \cdot P}{\sigma^2} \right) \cdot p_m(h) dh \quad (2.4)$$

式中 $p_m(h)$ 为用户 m 信道增益的概率密度函数， P 和 σ^2 分别为信号功率和噪声功率。

系统吞吐量 $W(\beta)$ 的最大值和最小值分别为 $\max_m \{C_m\}$ 和 $\min_m \{C_m\}$ ，在这两种情况下，公平性 $F_T(\beta)$ 和 $F_C(\beta)$ 均为 $1/M$ ，是最不公平状态。可以证明，当时间公平性 $F_T(\beta) = 1$ ，即最公平状态时， $W(\beta) = (\sum_{m=1}^M C_m) / M$ ；当容量公平性 $F_C(\beta) = 1$ ，即最公平状态时， $W(\beta) = M / \sum_{m=1}^M (1/C_m)$ 。

B. 最大载干比 (MAX C/I) 调度算法

MAX C/I 调度算法是根据信道状态信息 (C/I) 实现资源动态调配，减弱信道衰落影响并从中获益的一种调度方案。C/I 调度算法的目标是获得最大的系统容量和最高的资源利用率，而不考虑用户间的公平性。它在每一时隙根据用户的信道状态，选择信道可用速率最高的用户进行服务。MAX C/I 调度算法有两个分支：(1) 最大 C/I 的优先级高于重传的优先级，称为完全 MAX C/I 调度算法；(2) 重传的优先级高于最大 C/I 的优先级，称为重传优先的 MAX C/I 调度算法。MAX C/I 调度算法的两个分支都是逐帧调度的算法，即每帧都要计算下一帧发送哪个用户队列的信息。

完全 MAX C/I 调度算法：

- (1) 逐帧比较所有发送队列非空用户的 C/I 大小，选择最大 C/I 用户的数据帧发送；
- (2) 当有更高 C/I 出现时，转而发送此更高 C/I 用户的数据帧；
- (3) 当最高 C/I 用户的发送队列中的数据为空时，转而发送第二高 C/I 用户的数据帧，以此类推，直至所有队列为空；
- (4) 当接收方检测到错误要求重发时，若此时该用户的 C/I 还为最高，则重发此数据帧；若此时该用户的 C/I 不为最高，则发送其它用户的数据帧，直到该用户的 C/I 处于最高。

重传优先 MAX C/I 调度算法：

- (1) 逐帧比较所有发送队列非空用户的 C/I 大小，选择最大 C/I 用户的数据帧发送；
- (2) 当有更高 C/I 出现时，转而发送此更高 C/I 用户的数据帧；
- (3) 当该最高 C/I 用户的发送队列中的数据为空时，转而发送第二高 C/I 用户的帧，以此类推，直至所有队列为空；
- (4) 当接收方检测到错误要求重发时，不论此时该用户的 C/I 是否为最高，都重发此帧，直到发送成功。

假设下行链路只有一条共享物理信道，在基站有 N 个用户队列等待发送，因为 N 个用户的位置不同，所以其信道传播特性也不同， N 个用户的 C/I 值不同。完全 MAX C/I 调度算法只根据 N 用户的 C/I 值进行调度， C/I 值最大的用户占用这一帧发送，其它用户只能等待。重传优先 MAX C/I 调度算法则不仅根据 N 个用户的 C/I 值进行调度，还根据上一帧的反馈信息调度。如果反馈信息指示上一帧被正确接收，则根据 N 个用户的 C/I 值进行调度，如果反馈信息指示上一帧没有被正确接收，则重发上一帧。因为在信道上传送的每帧的 C/I 值都是 N 个用户中最高的，其被正确接收的概率也是最高的，所以完全 MAX C/I 调度算法比重传优先 MAX C/I 调度算法有更好的吞吐量性能。

C. 正比公平性 (Proportional Fairness, PF) 调度算法

RR 调度算法和 MAX C/I 调度算法，分别是公平性最佳和吞吐量最大化的代表，为了做好吞吐量和公平性的折衷，Qualcomm 公司提出了一种称为正比公平的调度算法。其原理如下：在时刻 t ，移动台 k 的平均传输速率用 $R_k(t)$ ($k=1,2,\dots,K$) 表示，其请求传输的速率用 $D_k(t)$ 表示，则被选中的用户为：

$$k = \arg \max_{j=1, \dots, K} \{D_j(t)/R_j(t)\} \quad (2.5)$$

如某一用户此刻没有数据要传输，则 $D_k(t) = 0$ 。这里的平均传输速率 $R_k(t)$ 按式(2.6)更新：

$$R_k(t + \Delta t) = (1 - 1/T_c)R_k(t) + 1/T_c \times B_k(t) \quad (2.6)$$

式中的 T_c 是时间常数，表示滑动时间窗口的长度，实际上反映了一个用户对接收不到数据传输的忍受能力，较长的 T_c 将允许等待较长的时间直到该用户的信道质量变好，这有利于系统吞吐量的提高，但可能带来附加的延迟。式中的 $B_k(t)$ 是用户 k 当前传输速率。

在实际计算时，通常把时间都折算成时隙，平均速率的更新都是每时隙一次。如果在上一时隙用户 k 没有被调度上，则： $R_k(i) = (1 - 1/T_c)R_k(i - 1)$ ， i 表示第 i 个时隙。如果在上一时隙用户 k 被调度上，则： $R_k(i) = (1 - 1/T_c)R_k(i - 1) + 1/T_c \times B_k(i - 1)$ 。

可以看出，如果移动台信道条件较好，其请求传输的速率 $D_k(t)$ 也较高，就会使其优先权提高。如果一个用户因为信道条件较差，特别是由于其处于小区边缘， C/I 长时间较低，得不到传输机会，则其平均吞吐量就会减小，这同样会使其优先权提高，获得传输机会。PF 算法是寻求系统的吞吐量最大化和各用户的公平性之间折中的一种尝试。

表 2.1 三种算法性能比较

调度算法	用户公平	信道适应性	时延 QoS 保证	系统吞吐量	复杂度
RR	最好	差	差	最低	小
MAX C/I	最差	好	差	最高	较小
PF	较好	较好	较好	较高	较大

2.1.2 基于公平排队的调度算法

近年来, 基于 GPS^[18]模型的分组公平排队 (Packet Fair Queuing, PFQ)^{[19][20][21][22][26][29]}调度算法得到了较为广泛的研究。所有的 PFQ 算法皆基于: (1) 系统维持一个全局函数 $V(\tau)$, 称为系统虚时间函数^[18], 用以记录调度器已提供的服务量; 调度器利用系统虚时间函数为每个分组计算其相应的开始时间标签和完成时间标签; (2) 执行一定的分组选择策略, 有最小完成时间标签优先 (SFF^[18])、最小合格完成时间标签优先 (SEFF^[20])、最小开始时间标签优先 (SSF^[21])。GPS 是一个理想化的流模型, 它根据各队列的共享比例对所有的活动队列同时服务。在任何时间间隔内, 如有 M 个非空的队列, 这个服务器就按照一定的服务比例对这 M 个队列同时进行服务, GPS 对每个队列业务流保证有明确的端到端的时延上限, 而与其他队列业务流无关。WFQ^[23]及其在 WFQ 基础上发展起来的一系列分组公平排队算法^{[20][21]}都是基于对 GPS 的模拟。

WFQ 调度算法就是在实际系统中模拟 GPS 算法而提出的。其基本思想就是当调度器准备发送一个分组时, 它在等待调度的所有分组中选取一个与该 WFQ 调度系统相对应的 GPS 调度系统中最先结束服务的分组进行发送。WFQ 将一个分组模型化为相应的 GPS 参考系统的一定流量, 当 GPS 服务了与分组相对应的流量时就视同该分组被发送。为此 WFQ 引入虚拟服务时间函数 $V(\tau)$ 表示调度器在时刻 τ 已经提供的服务, 并选择参考系统中具有最小结束服务时间 F_i^k 的分组进行发送。与相应的 GPS 参考系统相比, 在 WFQ 情况下, 对各业务流 i 有:

$$d_{i,WFQ}^k - d_{i,GPS}^k \leq L_{\max} / r \quad (2.7)$$

$$W_{i,GPS}(0, \tau) - W_{i,WFQ}(0, \tau) \leq L_{\max} \quad (2.8)$$

如果业务流由令牌桶 (σ_i, r_i) 定义和限定, 则时延 D_i 保证上限为:

$$D_{i,WFQ} \leq \sigma_i / r_i + L_{i, \max} / r \quad (2.9)$$

可见与相应的 GPS 参考系统相比, WFQ 的分组结束服务的时间最多滞后发送该业务流的一个最长分组的时间, $D_{i,WFQ}$ 最后一项反映了实际系统逐个分组传输的特点。所以在一个实际的系统中, 仅针对服务结束时间而言, WFQ 已经具备了最佳的性能参数。另外, 由于 WFQ 总是选择最早离开的分组进行发送, 因而可以采用一个优先级队列予以实现。

WFQ 仅以分组在 GPS 参考系统中的 F_i^k 为依据选择分组进行发送, 这就会造成一些尚未在 GPS 参考系统中得到服务的分组仅因其 F_i^k 较小而被选中并发送, 导致超前 GPS 参考系统很多。所以 WFQ 的分组离开次序与 GPS 参考系统的离开次序间可能会存在明显差异, 导致时延抖动累计效应增大和算法效率的下降。WF²Q (Worst-case Fair Weighted Fair Queuing) 调度算法^[20]改变了 WFQ 算法选择分组的策略。与 WFQ 算法在所有等待调度的分组之中选择下一个要发送的分组不同, WF²Q 算法首先需要等待调度的分组进行资格测试, 只有开始服务时间小于系统的虚拟时间的分组才可以通过测试。然后 WF²Q 算法在通过测试的分组中选择具有最小结束服务时间的分组进行发送。这种策略称为 SEFF 分组选择策略。WF²Q 与 WFQ 调度算法具有相同量级的复杂度, 均为 $O(N)$ (N 为当前等待调度的流的数目), 但是由于 WF²Q 算法具有更小的 WFI (Worst-case Fair Index) 因子, 从而可以

使得由采用 WF²Q 算法的中继节点构成的网络，端到端的时延抖动达到最小。

WF²Q+ (Worst-case Fair Weighted Fair Queuing+) 调度算法^[24]针对 WF²Q 重新定义了系统虚拟时间的更新公式，从而简化了调度算法的复杂度：

$$V(t + \tau) = \max\{V(t) + \tau, \min_{i \in B(t)} S_i^{h_i(t)}\} \quad (2.10)$$

$$S_i^k = \begin{cases} F_i^{k-1} & Q_i \neq 0 \\ \max\{V(a_i^k), F_i^{k-1}\} & Q_i = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

$$F_i^k = S_i^k + L_i^k / R_i(t) \quad (2.12)$$

其中 $V(t)$ 是系统虚拟时间函数； τ 是系统虚拟时间更新的时间间隔； $B(t)$ 是 t 时刻系统中等待调度的所有流的集合； Q_i 是第 i 个流当前待调度的分组个数； $h_i(t)$, $R_i(t)$ 是 t 时刻第 i 个流的头分组及流速率； a_i^k , L_i^k , S_i^k , F_i^k 是第 i 个流的第 k 个分组的到达时间，分组长度，虚起始服务时间，虚结束服务时间。

WF²Q+ 算法与 WFQ 算法相同也是采用 SEFF 分组选择策略，即在通过资格测试（即开始服务时间小于系统的虚拟服务时间）的分组中选择具有最小结束服务时间的分组进行发送，但由于重新定义了系统虚拟时间的计算方法，使其算法复杂度降为 $O(\lg N)$ ，其中 N 为当前等待调度的流的数目，而且 WF²Q+ 算法与 WF²Q 即算法有一致的性能上界和公平度。

WF²Q+ 由于具有很好的公平性和时延性，而且在算法复杂度上有所降低，因此得到了业界的广泛关注。但是，WF²Q+ 算法的复杂度随着被调度流数量的增加而增大，当接入的流很多时，特别是在核心调度的地方（如核心路由器），流的数量变得异常庞大，算法的复杂度将变得很高，理论模型的应用将会给系统带来巨大的负担。

除上述 WFQ, WF²Q, WF²Q+ 外，基于 GPS 的无线调度算法还有 CSDPS(Channel State Dependent Packet Scheduling)^[37]、CIF-Q(Channel-condition Independent Fair Queuing)^[26]、SBFA(Server Based Fairness Approach)^[27]、WRR-CSDPS^[38]、WDRR (Wireless Deficit Round Robin)^[39]等^{[40][41][42]}。

2.1.3 机会调度算法 (Opportunistic Scheduling)

在无线系统中由于信道的多变性，给资源分配增加了复杂度，但在资源分配中同时也可利用无线信道的多变性来提高频谱效率，这就是机会调度(Opportunistic Scheduling)。Liu 提出了针对时间片分配(time-fraction assignment)的机会调度算法^[43]，随后衍生出一系列机会调度算法^{[44][45][46][47]}，这种机会调度算法实质是在满足各个连接 QoS 的基本条件下，力求系统吞吐量的最大化。从优化系统总吞吐量的目标出发，最优结果是在每个时刻调度信道状态最好的用户。

文献[48]中将机会调度理论应用到OFDMA下行链路中，讨论了系统中用户数小于子载波数，所有用户的业务类型为单一的非实时业务时基于效用公平调度策略的实现及效果。考虑用户吞吐量和系统总吞吐量。用户 k 在 T 个时隙内的平均吞吐量为：

$$U_k^T(\pi) = \frac{1}{T} \sum_{l=1}^T \sum_{n=1}^N \omega_{k,n}^l \cdot \mathbf{1}_{\{c_n^l=k\}} \quad (2.13)$$

式中： $k=1,2,\dots,K$ 为用户编号； $n=1,2,\dots,N$ 为子载波编号； $\omega_{k,n}^t$ 为用户 k 第 t 时隙时在第 n 子载波上的吞吐量； $\pi(\omega)=\{\pi(\omega^1), \pi(\omega^2), \dots, \pi(\omega^T), \dots\} \in \Pi$ 为调度的某一确定方案； Π 为所有调度方案的集合， $\pi(\omega^t)=A^t$ 为 t 时隙时的一种调度方案， $\pi^*(\omega^t)$ 是 t 时隙时的最优调度方案， $A^t=\{A_1^t, A_2^t, \dots, A_N^t\}$ 为 t 时隙占用各子载波的用户序号矢量。

$\mathbf{1}_{\{A_n^t=k\}}$ 的取值为 1 或 0， $\mathbf{1}_{\{A_n^t=k\}}=1$ 时表示第 t 时隙时第 n 子载波分配给用户 k ， $\mathbf{1}_{\{A_n^t=k\}}=0$ 时表示第 t 时隙时第 n 子载波未分配给用户 k 。

系统平均吞吐量为：

$$\begin{aligned} U(\pi) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \sup U^T(\pi) \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \sup \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \omega_{k,n}^t \cdot \mathbf{1}_{\{A_n^t=k\}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

在 OFDMA 系统中，由于有多个用户同时共享系统资源，在资源分配时就应考虑各用户之间的公平性，又由于信道的多变性，一般考虑的是系统分配资源之后所能达到的效用比例是否符合不同业务之间的性能（如吞吐量）比例关系，这就是基于效用公平的调度问题。其描述如下^[48]：

$$\begin{aligned} &\max_{\pi \in \Pi} U(\pi) \\ &s.t. \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \inf U_k^T(\pi) \geq a_k U(\pi) \\ &\quad k=1,2,\dots,K \end{aligned} \quad (2.15)$$

式中， a_k 为用户要求的最小吞吐量比例， $a_k \geq 0$ 且 $\sum_{k=1}^K a_k \leq 1$

上述数学模型最优解为：

$$\pi^*(\omega^t) = \arg \max_{A^t} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (\kappa + \nu_k^*) \omega_{k,n}^t \cdot \mathbf{1}_{\{A_n^t=k\}} \right\} \quad (2.16)$$

式中 $\kappa = 1 - \sum_{k=1}^K a_k \nu_k^*$ ； ν_k^* 为控制参量。对应式(2.16)最优解的控制参量 ν_k^* 的设定原则为：

- a) $\nu_k^* \geq 0, \forall k$ ；
- b) $\lim_{T \rightarrow \infty} \inf U_k^T(\pi) \geq a_k U(\pi), \forall k$ ；
- c) 若 $\lim_{T \rightarrow \infty} \inf U_k^T(\pi) > a_k U(\pi)$ ，则 $\nu_k^* = 0, \forall k$ 。

上述文献[43][44][45][46][47][48]中的算法都可以归结为在信道状态变化引起系统容量改变的情况下，如何在保障一定 QoS 的前提下，提高系统的吞吐量，其结果是保障了各连接的长期公平性，但对短期公平性保障不了。由于系统吞吐量最大化与公平服务在无线网络的情况下是比较大的一对矛盾，因此如何在它们之间进行有效的折中就成为无线调度算法的研究热点。

2.1.4 现有无线调度算法的一些不足

目前的无线分组调度算法主要集中在保障各连接的 QoS 前提下，追求系统吞吐量极大化，也就

是系统利用率的提高。但是系统吞吐量极大化与公平服务是一对矛盾，举例来说，假设系统中存在两个同一类型的连接(用户)A 和 B，A 处于基站附近，信道质量很好，而 B 处于小区边缘，信道质量较差，这两个连接均为可变速率连接，当系统有空闲容量可供分配时，为了追求系统吞吐量的极大化，显然应该将空闲容量分配给 A，这样对 B 来说是不公平的。如何在系统吞吐量极大化和公平服务之间折中成为了研究热点，但至今也没有好的方案。

另外，大多数算法的公平性主要体现在长期上，而未考虑短期公平性的问题，也就是未考虑无线信道特殊性引入的补偿问题：当一个连接的链路从故障恢复后，如何对这个连接进行有效的补偿。目前已有的考虑了补偿问题的一些算法在如何补偿的方式上也有所欠缺，算法大多是让系统预留补偿信道，或者牺牲低优先级业务的服务用来补偿等等。这些补偿方式从某种程度上说也是不公平的，因为从完全公平的角度出发，应该是那些得到额外服务的连接对滞后流做出补偿。

2.2 功率分配技术

功率控制技术是无线通信技术中的一项关键技术，通过对功率的分配和控制，可以提供更高的通信容量。在第三代移动通信系统中，无论是 WCDMA 系统还是 CDMA2000 系统，由于用户共用相同的频带，且各用户的扩频码之间存在着非理想的相关特性，用户发射功率的大小将直接影响系统的总容量，从而使得功率控制技术成为 CDMA 系统中的最为重要的核心技术之一。CDMA 为一干扰受限系统，即干扰的大小直接影响系统容量。因此要控制干扰的大小，在不影响通信质量的情况下，尽量减少发射信号的功率，使每个 MS 的信号到达 BS 时都达到最小所需的 SIR，就可以提高系统的容量与可靠性。而功率控制是可以尽量减少发射信号的功率、进而控制 SIR 并有效地克服和抑制干扰的，它是改善与提高 3G 蜂窝移动通信系统可靠性的核心技术之一。常见的第三代移动通信技术中的功率控制技术可分为开环功率控制、闭环功率控制和外环功率控制三种类型。

在 OFDM 系统中，由于 CDMA 系统中的远近效应的一系列问题在 OFDM 系统中不再成为干扰系统正常工作的主要因素，所以，我们在考虑 OFDM 系统的资源分配算法时，主要考虑的是资源，包括功率与速率的分配问题，我们要做的是在保持误码率一定的情况下，使消耗总功率最小化或传输总速率最大化。

一般来说，在多载波系统中，动态资源分配可以包括子载波分配、比特分配和功率分配。这些动态分配可以使用一个联合的算法来实现，也可以采用分步的算法分别来完成。不同的优化算法采用不同的优化准则，动态资源分配的优化准则有两种：（1）在给定最大误比特率和总数据传输速率的条件下使发射功率最小化^[49]；（2）在给定最大误比特率和总发射功率的条件下达到最大数据传输速率^[50]。在多用户系统中，这两种优化准则仍然适用，只是具体的表达式有所不同。很显然，不同的最优化准则下系统的性能表现也是不同的。

动态子载波分配是根据用户数据流的速率和在接收机端该用户所观察到的各个子载波的信道状况来决定该用户能够使用的子载波数量以及使用哪些子载波，以便达到高效的利用子载波的目的。

动态比特分配是在子载波分配的基础上，将用户的数据比特按照各个可用子载波的质量分配到各个子载波上面去，这里，子载波的质量用子载波在用户上的信道增益来衡量。信道增益较高的子

载波被分配给较多的比特，并映射到一个大的信号星座上面，以便充分利用高质量的子载波，提高总体数据传输速率；而信道增益较差的子载波则被分配给少量的比特甚至不被分配比特，利用低阶调制对于噪声干扰的鲁棒性来降低整个系统的误比特率。

动态比特分配和动态功率分配有着密切的联系。不同的子载波发送不同数量的比特，其发送功率也会相应的变化。对于被分配了较多比特数的高质量子载波来说，较大的信号星座意味着较多的发射功率的投入，以保证接收端达到一定的信噪比。此外，在实际的系统实现中，对每个数据符号来说，信号星座都只能对整数数量的比特进行编码和映射，这就对每个子信道上的功率分配提出严格的限制条件。从本质上来说，这是一个整数规划问题，并且已知是非常难于求解的，需要极大的运算量，因此，一般在实际中都使用的是复杂度较低的次优化算法。功率分配问题源于信息论中经典的在一个频谱成形的高斯信道中获得最大信道容量的问题，这就是注水原理。然而，注水算法仅仅适用于单用户系统或使用固定资源分配的多用户系统，例如，使用固定资源分配的 TDMA 或 FDMA 系统。在这些情况下，每个用户可以等效为一个与所有其他用户独立的用户，这样，就可以对每个用户执行注水算法以最大化其传输速率。对于多用户的 OFDM 系统，我们一般不采用注水算法解决功率分配问题，而采用其他算法。

针对 OFDM 系统的动态资源分配，目前已经提出了许多自适应比特及功率分配的算法，如 Hughes-Hartogs 算法^[64]，Czylwik 算法^[65]，位去除算法^[66]等等。Hughes-Hartogs 算法可根据实际需要限定发射的总功率或比特数，其分配过程是逐比特进行；每次选择增加一比特所需能量最少的子载波，给其加载一比特，重新算出该子载波增加一比特所需能量。重复此过程直至在满足给定 BER 条件下分完指定的比特数，或者重复分配至加载到子载波的总功率达到指定的发射功率为止。这种算法能达到比特和能量的优化分配，分配运算次数达 $O(R_{total} + N_c)$ ，其中 R_{total} 为所要分配的总比特数， N_c 为子载波总数。但是，此算法对于实际应用显得过于复杂，尤其不适合要求高速率传输的无线接入系统。

下面简要介绍多用户 OFDM 动态资源分配的系统模型。假设系统共有 N 个子信道， K 个用户，以 R_k 代表第 k 个用户所需的传输速率，单位为 bit/s。假设所有 K 个用户的下行链路的信道特性对于基站来说都是已知的。基站根据信道特性在 K 个用户之间分配子信道和功率以及设定各自调制方式，以 $c_{n,k}$ 表示第 k 个用户在第 n 个子信道上传输的比特数，最大值取 D ，以 $h_{n,k}$ 表示第 k 个用户在第 n 个子信道上的复增益。 $f_r^k(c)$ 表示为了有效地接收 1 个 OFDM 符号内某一子信道传输的 c 比特信息，接收机所必须获得的信号功率，由于不同用户有不同的 QoS 要求，所以它是一个和 k 有关的函数，而发射机对于第 k 个用户在第 n 个子信道上传输 c 个比特所需的发射功率 $p_k(n)$ 为：

$$p_k(n) = \frac{f_r^k(c_{n,k})}{h_{n,k}^2} \quad (2.17)$$

考虑传输速率和性能一定的条件下的功率分配算法，即找到一种最佳的分配算法，使得所有用户以及子载波需要的总发射功率在给定传输速率 R_k 及以 $f_r^k(\bullet)$ 表示的 QoS 条件下，能够达到最低。这个问题的数学表达式为^[49]：

$$\min_{c_{n,k}} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{f_k^r(c_{n,k})}{h_{n,k}^2} \quad (2.18)$$

约束条件如下：

- a) 对于所有的 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 来说，满足 $\sum_{n=1}^N c_{n,k} \geq R_k$ ；
- b) 对于所有的 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 来说，满足：如果 $c_{n,k} \neq 0$ ，则 $c_{n,k'} = 0$ ， $k' \neq k$ ，即一个载波只能被一个用户占用。

类似地，对于可变速率的多用户 OFDM 系统，是在总发送功率和性能要求一定的情况下，使系统的信息速率最大化，数学表达式为：

$$\begin{aligned} & \max \sum_{n=1}^N c_{n,k} \\ \text{s.t.} & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{f_k^r(c_{n,k})}{h_{n,k}^2} \leq P^{\max} \\ & \frac{f_k^r(c_{n,k})}{h_{n,k}^2} \geq 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

C. Y. Wong^[49]提出了基于拉格朗日乘子法的最优比特和功率分配算法，可以在满足所有用户传输速率要求前提下使总的传输功率最小，此算法在理论上可以达到最优的水平。文献 [49][50][64][65][66]都是通过迭代运算，对每个子载波根据系统要求分配比特数和功率值，理论上可以达到很好的性能，但是由于实际系统中的子载波数较多，如果针对每个子载波分配功率和比特，计算过于复杂，计算量太大，效率较低，因此依据每个子载波的信噪比分配比特的理想方案在实际系统中不太可行。

2.3 本章小结

分组调度和功率分配技术是无线通信系统中保证用户 QoS 不可或缺两种关键技术。本章分析了三种经典调度算法 RR、MAX C/I 及 PF 对系统吞吐量和用户公平性的影响，RR 算法能够达到最好的用户公平性，MAX C/I 算法能够获得最大的系统吞吐量，PF 算法是两者的折中。本章还总结了 WFQ、WF²Q、WF²Q+ 等基于 GPS 的公平排队调度算法以及机会调度算法的优缺点，分析发现目前的无线分组调度算法主要集中在保障各连接的 QoS 前提下，追求系统吞吐量极大化，如何在系统吞吐量极大化和公平服务之间折中成为了研究热点；而且大多数算法的公平性主要体现在长期上，而未考虑短期公平性的问题。

此外，本章还介绍了多载波通信系统中的动态子载波、比特、功率分配问题。描述了多用户 OFDM 动态资源分配的系统模型，分析发现现有的依据每个子载波的信噪比分配比特的理想方案由于其计算过于复杂，计算量太大，在实际系统中不太可行。

第3章 WiMAX 系统及其仿真平台

WiMAX 以其传输速率高、建网速度快、建设成本低、覆盖面积广、频谱效率高等特点成为未来最富有竞争力的无线宽带技术之一。WiMAX 除能提供公众网络的语音、数据等业务外，也将专业网络中获得大规模的应用，逐渐成为专网用户、电信运营商，尤其是网络设备基础设施相对匮乏地区运营商关注的无线宽带技术。

本章主要介绍 IEEE 802.16 系列标准中的 IEEE 802.16d 标准及使用 OPNET 搭建的基于 IEEE 802.16d 标准的系统仿真平台的各个模块的功能。

3.1 WiMAX 系统简要介绍

目前，IEEE 802.16 系列标准只针对 SS 和 BS 之间的无线空中接口进行了规范，其空中接口由物理层和媒体接入控制层组成，而 BS 间的 IB 接口、BS 与 RNC（与 WCDMA 系统的无线网络控制器 RNC 功能类似）间的 A 接口不属于 IEEE 802.16 标准组织工作范畴。本论文研究的 WiMAX 系统主要基于 IEEE 802.16d 标准，论文以下部分如果没有特别说明，所提到的 WiMAX 系统与 IEEE 802.16d 是等价的。

3.1.1 固定无线接入技术的空中接口规范

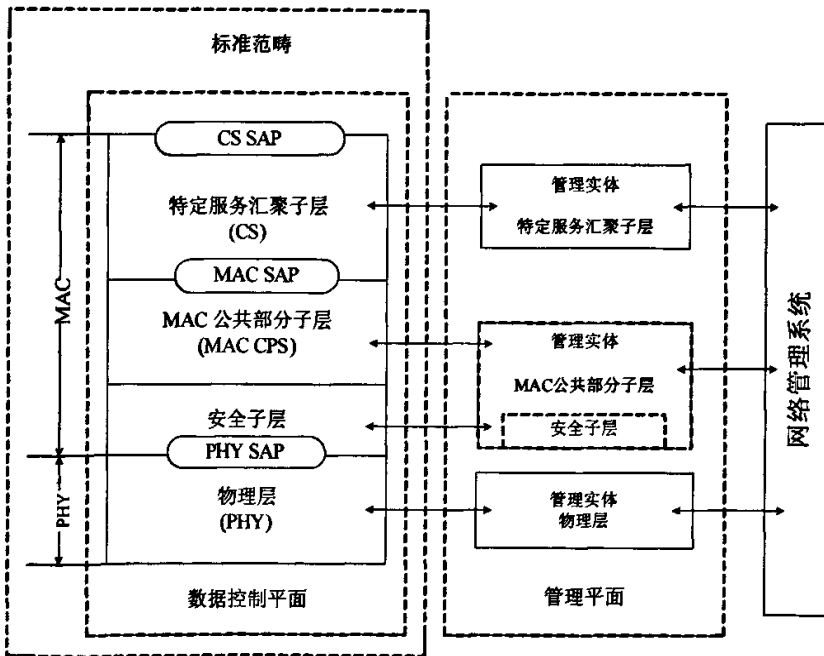


图 3-1 IEEE 802.16d 协议栈模型^[1]

IEEE 802.16d 标准主要描述了一个点到多点的固定宽带无线接入系统的空中接口, 包括 MAC 层和物理层两大部分, 其协议栈模型如图 3-1 所示^[1]。IEEE 802.16d 定义了多种物理层规范 (WirelessMAN-SC PHY 、 WirelessMAN-SCa PHY 、 WirelessMAN-OFDM PHY 、 WirelessMAN-OFDMA PHY), 不同的物理层技术适用于不同的无线传输环境。MAC 层又分成了三个子层: 特定服务汇聚子层(Service Specific Convergence Sublayer)、公共部分子层(Common Part Sublayer)、安全子层(Privacy Sublayer), MAC 层的结构设计为能支持多种物理层规范以适合各种应用环境。

3.1.2 MAC 层规范

MAC 层包括三个子层: 从上至下分别为:

(1) 特定服务汇聚子层 (Service-Specific Convergence Sublayer), 简称 CS 子层

CS 子层主要负责完成外部网络数据与 CPS 子层数据之间的映射。它将所有从汇聚层服务接入点(CS SAP)接收到的外部网络数据转化并且映射成 MAC SDU, 并通过 MAC 服务接入点(MAC SAP)发送给 CPS 子层。在这个过程中, CS 子层对外部网络数据进行分类, 并将其与合适的 MAC 业务流标识 SFID 以及连接标识 CID 进行关联, 同时还执行负荷头压缩功能 PHS。

标准中定义了两种 CS 子层规范, 以便与不同的上层协议进行接口, 包括 ATM CS 子层及 Packet CS 子层。

(2) MAC 公共子层 (MAC Common Part Sublayer), 简称 CPS 子层

CPS 子层提供了 MAC 层的核心功能, 包括系统接入、带宽分配、连接建立和维护等。CPS 子层通过 MAC SAP 从不同的 CS 子层接收数据, 形成 MAC SDU。MAC SDU 可以被拆分, 也可以与其他一个或数个 MAC SDU 合并为一个新的 MAC PDU, 并按 MAC 连接分类, 以保证 QoS。图 3-2 表示了 MAC PDU 的数据格式, 分为 MAC header、payload 和 CRC 三部分。

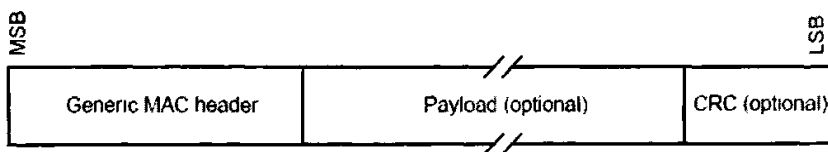


图 3-2 MAC PDU 的数据格式^[1]

➤ MAC header:

每个 PDU 以一个固定长度的 MAC header 开始。IEEE 802.16d 标准中定义了两种类型的 MAC header: 一种是普通 MAC header, 另一种则是带宽请求 MAC header。带宽请求 MAC header 单独发送, 后面不携带 payload。

➤ Payload: 负责传输 CS 数据和 MAC 管理消息。

传输 CS 数据时, payload 包括零个或多个 subheader 以及零个或多个 MAC SDU, payload 可以是变长度的, 取决于高层数据类型。Payload 中的 MAC subheader 可分为下面 5 种类型: Fragmentation

subheader、Grant Managementsubheader、Mesh subheader、FAST FEEDBACK_Allocation subheader、Packing subheader，以区别负荷数据的格式。

传输 MAC 管理消息时，payload 包括 Management Message Type 以及 Management Message Payload。IEEE 802.16d 标准中共定义了 49 种管理消息，用于上下行信道描述、系统接入、注册、连接建立、资源申请、动态服务管理、接入认证等功能。MAC 层的管理信息种类决定了其性能，在标准中还预留了部分管理信息域空间，可增补新的管理信息，以增强未来 MAC 层的功能。

► CRC：对于 SCa、OFDM、OFDMA 是必须的。

802.16 技术具有完善的 QoS 机制，可根据 4 种不同的业务类型进行调度和带宽分配。另外，标准中还定义了按需分配多址接入(DAMA)，可以在数据传输过程中根据需要动态地调整带宽分配。通过 CPS 子层中定义的这些机制，使得整个系统的资源分配非常的灵活，在保证 QOS 的同时大大提高了资源利用率。

(3) 安全子层 (Security Sublayer)

MAC 层包含一个单独可选的安全子层来提供认证，密钥交换及加密。

IEEE 802.16 通过加密 SS 和 BS 之间的连接给用户秘密接入固定宽带无线网络的能力，此外 BS 通过加密相关的业务流禁止未经授权的访问，还给运营商提供强大的防盗用功能。

IEEE 802.16d 标准的安全子层定义了两部分内容：

a) 加密封装协议。

该协议负责加密接入固定 BWA 网络的分组数据，定义了加密和鉴权算法，以及这些算法在 MAC PDU payload 中的应用规则（加密只针对 MAC PDU 中的 payload 部分，MAC header 不被加密）。

b) 密钥管理协议 (PKM)。

PKM 负责从 BS 到 SS 之间密钥的安全分发，SS 和 BS 之间密钥数据的同步，以及 BS 强迫接入网络业务。

PKM 采用服务器/客户机模型，SS 作为客户端来请求密钥，BS 作为服务器端响应 SS 的请求并授权给 SS 唯一的密钥。PKM 使用 CPS 子层中定义的 MAC 管理消息来完成上述功能。PKM 支持周期性地重新授权及密钥更新机制。PKM 使用 X.509 数字证书 (IETF RFC 3280)、RSA (Rivest-Shamir-Adleman public-key system) 公钥加密算法和强对称算法进行 BS 与 SS 之间的密钥交换。通过使用基于数字证书的认证方式，进一步加强了 PKM 的安全性。

3.1.3 物理层规范

IEEE 802.16d 系统可支持 TDD (时分双工) 和 FDD (频分双工) 两种无线双工方式，根据使用频段的不同，802.16d 分别规范了多种物理层与之相对应，如表 3.1 所示。

► WirelessMAN-SC 物理层

WirelessMAN-SC 主要应用于 10~66GHz 频段的 PMP 结构系统，具有 LOS 传输的特点，可采用 FDD 或 TDD 双工方式。下行方向采用 TDM 方式，且调制方式必须支持 QPSK 和 16-QAM，可选支持 64-QAM。上行方向采用 TDMA 和 DAMA 方式，且调制方式采用 QPSK。

► WirelessMAN-SCa 物理层

WirelessMAN-SCa 采用单载波调制技术, 主要应用于 2~11GHz 频段, 具有 NLOS 传输的特点, 可采用 FDD 或 TDD 双工方式。下行方向采用 TDM 或 TDMA 方式, 上行方向采用 TDMA 方式。此外, 上下行均可采用 FEC 编码技术, 当选择不支持 FEC 编码时, 差错控制采用 ARQ 技术。可选支持 AAS 和 STC。调制方式必须支持 Spread BPSK、BPSK、QPSK、16-QAM 和 64-QAM, 可选支持 256-QAM。当滚降因子为 0.25、调制方式为 256-QAM 时, 20MHz 信道带宽可提供高达 100Mbps 的传输速率。

表 3.1 IEEE 802.16d 空中接口物理层分类

物理层类型	使用频段	基本特点
WirelessMAN-SC	10~66GHz 许可频段	采用单载波调制方式, 视距传输, 可选信道带宽 20MHz、25MHz 或 28MHz, 上行采用 TDMA 方式, 双工方式可采用 FDD 和 TDD。
WirelessMAN-SCa	<11GHz 许可频段	采用单载波调制方式, 非视距传输, 允许信道带宽不小于 1.25MHz, 上行采用 TDMA 方式, 可选支持自适应天线系统 (AAS)、ARQ 和空时编码 (STC) 等, 双工方式可采用 FDD 和 TDD。
WirelessMAN-OFDM	<11GHz 许可频段	采用 256 个子载波的 OFDM (正交频分复用) 调制方式, 非视距传输, 可选支持 AAS、ARQ、网格模式和 STC 等, 双工方式可采用 FDD 和 TDD。
WirelessMAN-OFDMA	<11GHz 许可频段	采用 2048 个子载波的 OFDM 调制方式, 非视距传输, 允许信道带宽不小于 1.0MHz, 可选支持 AAS、ARQ 和 STC 等, 双工方式可采用 FDD 和 TDD。

► WirelessMAN-OFDM 物理层

WirelessMAN-OFDM 采用 256 个子载波的 OFDM 调制技术, 主要应用于 2~11GHz 频段的 PMP 结构系统, 具有 NLOS 传输的特点。在许可频段, 双工方式可采用 FDD 或 TDD, 且 BPSK、QPSK、16-QAM 和 64-QAM 是必须支持的调制方式; 在免许可频段, 只能采用 TDD 双工方式, 而且除了 BPSK、QPSK 和 16-QAM 外, 可选支持 64-QAM 调制方式。在许可频段, 信道带宽应是规划频带宽度除以 2 的幂以后, 四舍五入到 250KHz 的倍数, 但不小于 1.25MHz, 表 3.2 给出了当规划频带宽度为 14MHz 时 3400~3414MHz 频带的允许信道带宽。在 64-QAM 调制方式下, 20MHz 信道可提供高达 73Mbps 的传输速率。可选支持 Mesh 网络结构、AAS 和 ARQ。

表 3.2 规划频带宽度为 14MHz 时 3400~3414MHz 频带的允许信道带宽

Channelization(MHz)	Center frequencies(MHz)
14	3407
7	$3403.5 + n \cdot 0.25 \quad n \in \{0 \dots 28\}$
3.5	$3401.75 + n \cdot 0.25 \quad n \in \{0 \dots 42\}$
1.75	$3400.875 + n \cdot 0.25 \quad n \in \{0 \dots 49\}$

下行帧结构：下行帧头部由帧同步前缀和广播控制信息组成。后者是由 DL-MAP、UL-MAP、DCD（下行信道识别符号）、UCD（上行信道识别符号）组成。头部后面是以 burst 形式携带的各 SS 的数据。本论文所采用的 PHY-OFDM FDD 下行帧结构如图 3-3 所示，且假设所有的 burst 采用相同的 MCS 方式，都为相同的 SS 传送数据。

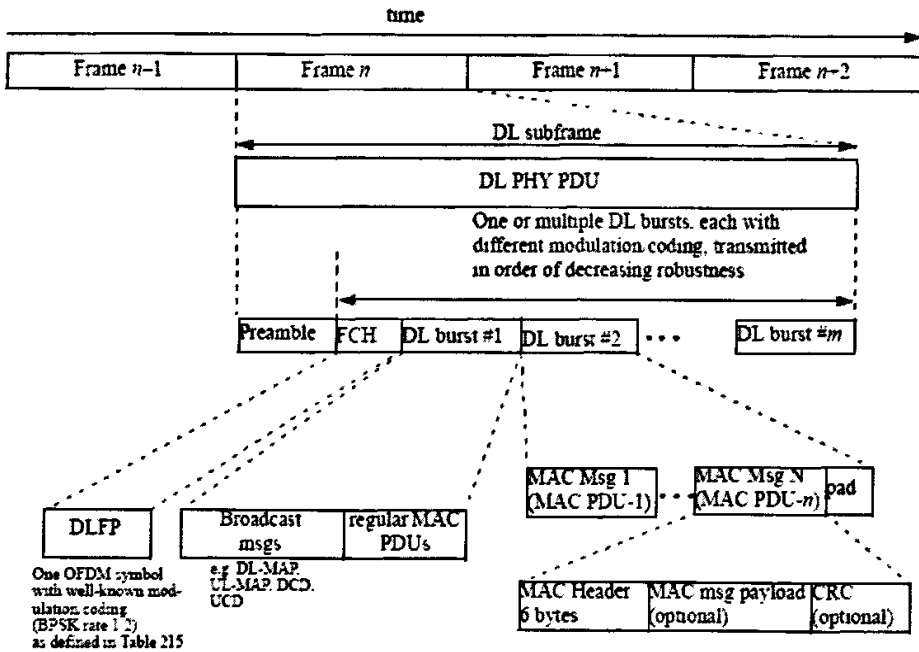


图 3-3 PHY-OFDM FDD 下行帧结构^[1]

DL-MAP 为各 SS 指明了在当前下行帧中信息的访问方式（如 burst 起始时间），UL-MAP 为各 SS 指示了下一上行帧中它们所需带宽分配信息、发射起始时间等。DCD 消息定义了下行物理信道特性。UCD 消息则定义了相应的上行帧中各 burst 的描述文档，以及 minislot 包含的 PS 数、前缀和 SS Transition Gap 长度、竞争冲突时退避窗的窗口值等信息。DCD, UCD 由 BS 周期性发射，不一定在每一帧中出现。

➤ WirelessMAN-OFDMA 物理层

WirelessMAN-OFDMA 采用 2048 个子载波的 OFDMA 技术，主要应用于 2~11GHz 频段的 PMP 结构，具有 NLOS 传输的特点。在许可频段，双工方式可采用 FDD 或 TDD，在免许可频段，只能采用 TDD 双工方式。可选支持 AAS、ARQ 和 STC。调制方式采用 QPSK 和 16-QAM，可选支持

64-QAM。信道带宽应是规划频带宽度除以 2 的幂,但不小于 1.0MHz。在 64-QAM 调制方式下,20MHz 信道可提供高达 75Mbps 的传输速率。

3.2 WiMAX 系统仿真平台

本节简要介绍了根据 IEEE 802.16d 标准,按照 OPNET 的建模机制搭建的 IEEE 802.16 系统仿真平台,其中包括无线信道建模、物理层等效建模、BS 及 SS 的行为描述等方面内容,本文第四章提出的联合调度和功率分配算法,也是在这个仿真平台上进行仿真的。

3.2.1 仿真场景的网络拓扑结构

本论文采用 OPNET 仿真工具,模拟通信中的发包、收包、统计等过程。OPNET 是一个功能强大的网络开发和应用平台。OPNET 工具采用三层结构对协议实体的功能进行模拟:网络层、节点层、进程层,自顶向下逐步细化。网络模型是最高层次的模型,由网络节点和连接网络节点的通信链路组成,通过网络模型可以直接建立起网络仿真的拓扑结构。节点模型由协议模块和连接模块的各种连接组成,如物理接口模块、MAC 层模块、IP 模块、分组数据流等,每个模块对应一个或多个进程,进程模型由多个有限状态机来描述。用户可以在上述三个层次的任何地方切入编程,建立所需的网络、节点或进程模型。图 3-4 所示的是 WiMAX 仿真平台网络结构图。

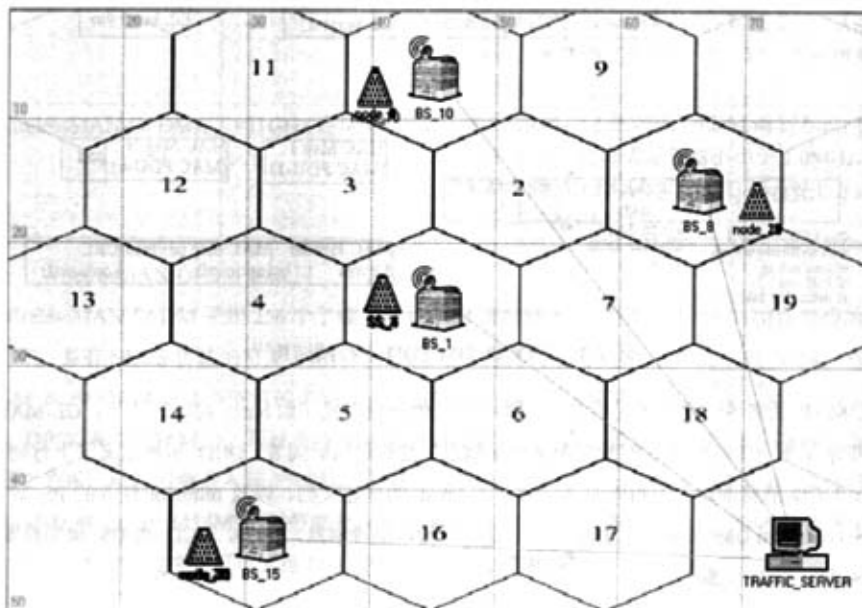


图 3-4 WiMAX 仿真平台网络结构图

如图 3-4, WiMAX 仿真平台的无线网络模型包括业务服务器 (TRAFFIC_SERVER)、BS、用户

设备 SS 三种类型的节点。采用蜂窝结构，一共 19 小区，在各小区的中央放置一个基站，基站采用全向天线，每个基站服务若干 SS，所有的基站都连接到骨干网上（由 TRAFFIC_SERVER 模拟）。

3.2.2 信道建模

A. Path-loss (including shadowing)

在宏小区环境中广泛使用的传播路径损耗的仿真模型是 Hata-Okumura 模型^[67]，但是 Hata-Okumura 模型对于山区，森林密集区域以及基站天线低于 30m 的情况下不够精确，文献[68]对 Hata-Okumura 模型进行了修正，适用于三种典型的环境：

- 1) Category A: 传播路径损耗最大的森林密集山区；
- 2) Category C: 传播路径损耗最小的平坦低密度森林区域；
- 3) Category B: 除 A、C 外其他环境。

下面简要介绍该模型：传播路径损耗 $PL(\text{dB})$ 可以表示为

$$PL = A + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + s \quad \text{for } d > d_0 \quad (3.1)$$

其中： d_0 是一个参考距离，取 100m； $A = 20 \log_{10}(4\pi d_0 / \lambda)$ (λ 表示波长)；针对天线高度 h_b 在 10m~80m 之间的基站，路径损耗指数 $\gamma = (a - bh_b + c/h_b)$ ， a, b, c 对于不同的环境取不同的参数，见表 3.3。

表 3.3 传播路径损耗参数

模型参数	Category A	Category B	Category C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

式(3.1)中 s 代表阴影衰落影响，阴影衰落是服从对数正态分布的。当信号用分贝表示时阴影衰落就成为正态分布，有如下概率密度函数：

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(r-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.2)$$

式中， r 为信号中值的分贝值， m 为信号中值 r 的均值（分贝）， σ 为信号中值 r 的标准方差（分贝），一般情况下 $8.2 < \sigma < 10.6$ ，另设 m 为 0。

阴影衰落的计算采用如下公式：

$$s = \sigma \times N(0,1) \quad (3.3)$$

式中， σ 为 8.2dB， $N(0,1)$ 为随机产生的标准正态值。

以上所描述的模型主要针对于载波频率为 2GHz 和接收机天线高度接近 2m 的情况，将该模型应用于其他频率段时需要对其(3.1)作修改，如下：

$$PL_{modified} = PL + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (3.4)$$

其中 $\Delta PL_f = 6 \log_{10}(f/2000)(dB)$ 是频率修正项, f 单位 MHz; $\Delta PL_h(dB)$ 是天线高度修正项, 设天线高度为 $2m < h < 10m$:

$$\Delta PL_h = -10.8 \log_{10}(h/2); \text{ for } A, B \quad (3.5)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log_{10}(h/2); \text{ for } C \quad (3.6)$$

在平台的实现中, 仿真参数选择参见 3.2.4 节。

B. 快衰落建模

快衰落信道的衰落特性可以通过 Rayleigh 特性的信道冲击响应来表示。假设有 N 个反射波到达移动接收端, N 个反射波的入射角 α_n 是均匀分布, 每个反射波的最大多普勒频偏为 ω_d 。如果 N 足够大, 根据中心极限定理, 由多个反射波叠加得到的入射波满足复高斯分布。文献[70]给出的一种改进的 Clarke 模型产生 Rayleigh 衰落信道第 k 条路径的数学公式为:

$$Z_k^c(t) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=1}^M \cos[w_{d,k}t \cos(\frac{2\pi n - \pi + \theta_k}{4M}) + \phi_{n,k}] \quad (3.7)$$

$$Z_k^s(t) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=1}^M \cos[w_{d,k}t \sin(\frac{2\pi n - \pi + \theta_k}{4M}) + \phi_{n,k}] \quad (3.8)$$

$Z_k^c(t)$ 和 $Z_k^s(t)$ 分别为同相分量和正交分量。 $Z_k(t) = \sqrt{(Z_k^c(t))^2 + (Z_k^s(t))^2}$ 服从 Rayleigh 分布。其中, $N = 4M$, $\alpha_{n,k} = (2\pi n - \pi + \theta_k)/4M$ 。仿真中选取 $M = 8$, 三条独立的衰落路径。 $\phi_{n,k}, \theta_{n,k}, \theta_k$ 服从 $[0, 2\pi)$ 上的均匀分布。仿真场景的配置选择 SUI-3 信道^[69], 具体参数见表 3.4。

表 3.4 SUI-3 信道参数配置

SUI-3 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Power	0	-5	-10	dB
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz

图 3-5 是根据以上描述的模型, 使用 OPNET 集成的编译环境仿真出的 Rayleigh 衰落的概率密度函数。

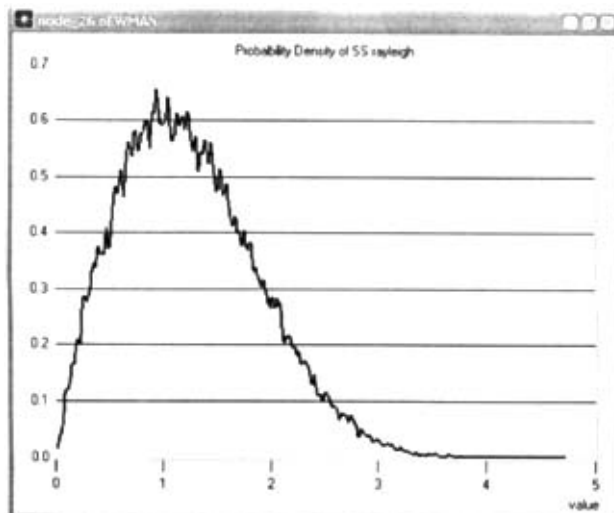


图 3-5 PDF of Rayleigh

3.2.3 物理层等效建模

A. 信噪比计算

背景噪声计算背景热噪声和背景环境噪声，通过计算接收机温度转化成等效噪声，加上环境噪声，选取落在带内的部分作为背景噪声。背景噪声功率建模如下：

- (1) 背景环境噪声：环境噪声功率=带宽*功率谱密度；
- (2) 背景热噪声：累计热噪声功率=带宽*波尔兹曼常数*(背景温度+设备温度)；
- (3) 背景噪声功率=环境噪声功率+背景热噪声功率。

具体计算如下：

$$T_{rx} = (NF - 1.0) * 290.0$$

$$NF = \text{Noise Figure}, T_{rx} = \text{Receiver Temperature}$$

$$T_{bx} = 290.0$$

$$T_{bx} = \text{Background Temperature}$$

$$k = 1.379 * 10^{-23}$$

$$k = \text{Boltzmann's Constant}$$

$$N_b = (T_{rx} + T_{bx}) * B_{rx} * k$$

$$B_{rx} = \text{Receiver Bandwidth}, N_b = \text{Background Noise}$$

$$N_a = B_{rx} * 10^{-26}$$

$$N_a = \text{Ambient Noise}$$

$$N = N_b + N_a$$

$$N = \text{Noise}$$

接收功率的计算：接收功率=发送功率*传播损耗*快衰落。

信噪比计算公式如下所示：

$$SNR = 10 * \log_{10}(\text{接收功率}/N) \quad (3.9)$$

B. 误比特率计算

根据式(3.9)计算所得 SNR 值查找调制曲线得到误比特率, 仿真中采用 QPSK 1/2、16QAM 1/2、16QAM 3/4、64QAM 3/4 四种 MCS 方式。对图 3-6 所示误比特率曲线进行采样, 将采样值存储于表格中, 根据测量 SNR 值搜索表格即可得到对应的误比特率。

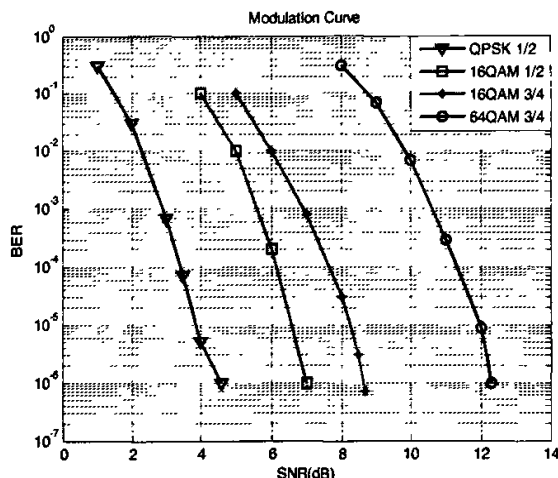


图 3-6 调制曲线

图 3-6 所示误比特率曲线是在以下仿真假设中所得: 测试信道为 AWGN 信道, 噪声序列由同余法产生, 译码采用 Viterbi 硬译码算法, 信道估计采用 LS 算法。标准规定的在不同的 MCS 方式下误码率达到 10^{-6} 要求的 SNR 与图 3-6 所示误比特率曲线的对比关系如表 3.5 所示。

表 3.5 达到 10^{-6} 误比特率所需 SNR 比较

MCS	Viterbi(dB)	标准要求(dB)
QPSK 1/2	4.6	7.4
16QAM 1/2	7.0	11.4
16QAM 3/4	8.7	11.44
64QAM 3/4	12.3	15.8

C. 数据包正误判断

首先计算数据包的误码数目。假设在整个数据包接收过程中的误比特率保持不变。一个数据包的位差错并不是每一位模拟, 而是随机选择差错位, 其思想是: 根据 MCS 方式和 SNR 得到的 BER 值, 计算有 k 个比特错误的概率 (建模为二项分布), 再和 $0\sim 1$ 之间的随机数比较, 如果大于这个随机数, 则给包分配 k 个比特错误。具体实施方法是以误码率为每一位产生错误的概率 p , 则在 N 个位中产生 k 个位错误的可能性是

$$P(k) = C_N^k * p^k * (1-p)^{N-k}$$

$P(k)$ = Probability of k Errors, p = Probability of Error

N = Packet Length (bits), k = Number of Errors

然后在 0~1 之间产生一个随机数 r , 从 1 到 N 逐个判断

$$r < \sum_{k=0}^i P(k) \tag{3.10}$$

是否成立, 成立则为数据包分配 i 个错误。

由于物理层采用了信道编码等纠错技术, 接收端对错误比特数目在一定范围内的数据具有校正能力。本文描述的数据包正误的判断建模为: 如果数据包的误比特数小于纠错门限, 则数据包被判断为正确接收, 否则将销毁包。

3.2.4 系统参数配置

表 3.6 系统参数假设

参数	参数值	注释	
复用方式	FDD		
PHY 模式	OFDM		
PHY 参数	N_{FFT}	256	Dynamic sub-channels allocation is unused
	N_{data}	192	
	G	1/16	
	信道带宽	7MHz	
帧长	2.5 ms ARQ process=3	ARQ process 表示最大重传次数	
BS 天线高度	30m		
阴影衰落	Lognormal fading	$\sigma = 8.2dB$	
传播损耗	$PL_{modified} = PL + \Delta PL_f + \Delta PL_h$	Category C; $h = 3m$; $f_c = 3.5GHz$	
BS 天线增益	14.5dBi		
SS 天线增益	18dBi		
BS 最大发送功率	44dBm	i.e. 25w. 47dBm(50w) 是可选的	
Receiver Noise Figure	5dB		

小区用户数	Up to 70	
小区半径	7km	
信道模型	SUI-3	
业务模型	FTP、Game、Video	
仿真时间	200s	
调度算法	(1) Round robin (2) Opportunistic Scheduling (3) JSPA	JSPA: Joint Scheduling and Power Allocation

3.2.5 节点模型

1. TRAFFIC_SERVER 的节点模型

OPNET 仿真时，业务源的节点模型如图 3-7 所示。

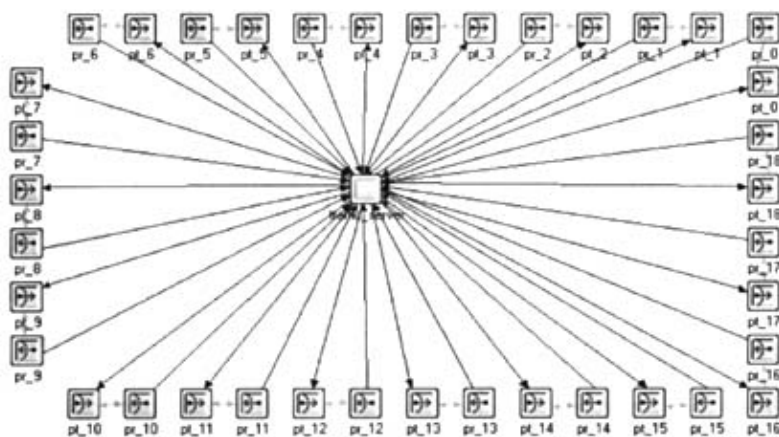


图 3-7 TRAFFIC_SERVER 节点模型

由图 3-7 可见，业务源的节点模型由“traffic_server”节点模块和周围的 19 组点对点有线收发机组成。其中每组有线接收机模块和有线发射机模块分别与对应索引号小区中 BS 的有线发射机模块和有线接收机模块相连。“traffic_server”模块将为不同小区中的 SS 产生相应的数据业务。

2. BS 的节点模型

OPNET 仿真时，BS 的节点模型如图 3-8 所示。

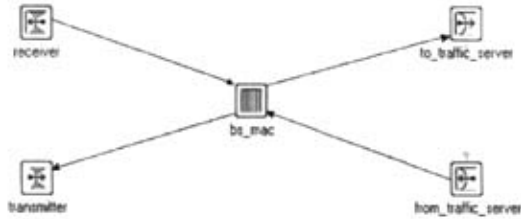


图 3-8 BS 节点模型

由图 3-8 可见，BS 的节点模型由“receiver”、“transmitter”、“bs_mac”、“to_traffic_server”和“from_traffic_server”五个节点模块组成。BS 的节点模型中，各个节点模块的主要功能如下所示。

- to_traffic_server 和 from_traffic_server：分别为 BS 的有线发射机模块和有线接收机模块。它们分别与业务源 TRAFFIC_SERVER 中的有线接收机模块和有线发射机模块相连；
- bs_mac：进行一个传输时间间隔内的传输控制，包括分组调度、重传控制以及功率分配等；
- transmitter 和 receiver：分别为 BS 节点的无线发射机模块和无线接收机模块。

3. SS 的节点模型

OPNET 仿真时，SS 的节点模型如图 3-9 所示。

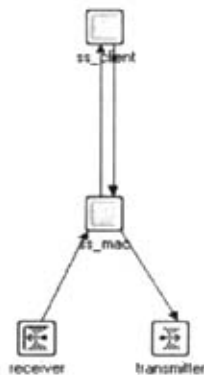


图 3-9 SS 节点模型

由图 3-9 可见，SS 的节点模型由“receiver”、“transmitter”、“ss_mac”和“ss_client”四个节点模块组成。SS 的节点模型中，各个节点模块的主要功能如下所示。

- transmitter 和 receiver：分别为 SS 节点的无线发射机模块和无线接收机模块。

- ss_mac: 完成 SS MAC 的数据处理。
- ss_client: 发起 SS 的业务定制请求等。

3.2.6 进程模型

1. BS MAC 层节点的进程模型

OPNET 仿真时, BS MAC 层节点的进程模型如图 3-10 所示。

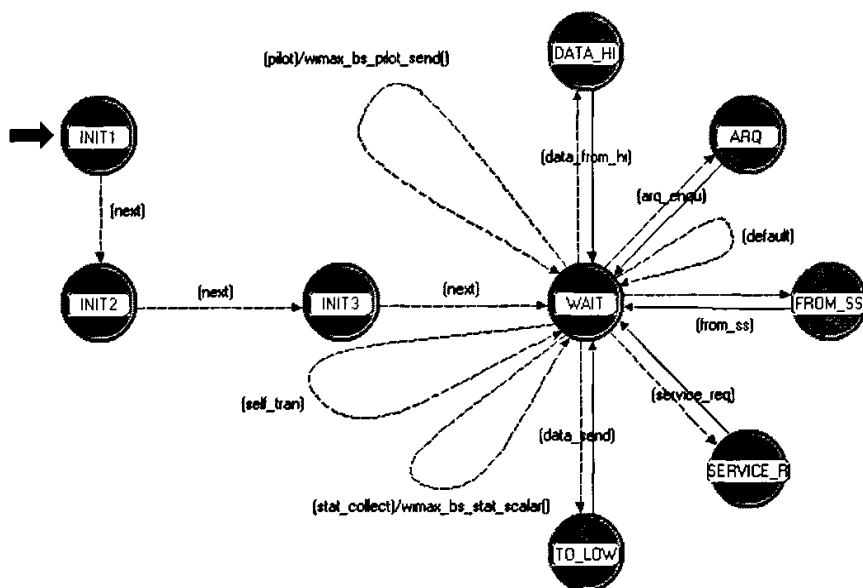


图 3-10 BS MAC 节点进程模型

由图 3-10 可见, BS MAC 层节点的进程模型由“INIT1”、“INIT 2”、“INIT3”、“WAIT”、“DATA_HI”、“TO_LOW”、“SERVICE_REQ”、“ARQ”和“FROM_SS”这 9 个状态组成。各个状态之间的转移条件在进程模型的 HB (Header Block) 中以宏定义的形式给出。

➤ INIT1、INIT2、INIT3 状态

这几个状态负责进程的初始化, 包括设置各种参数, 获取仿真中需要用到的各种参数和统计量等, 包括: 初始化一些状态变量, 并注册统计量; 创建并初始化 BS 中 SS 的参数记录数组; 设置转移条件和中断条件; 动态分配内存, 初始化全局变量等。

➤ WAIT 状态

在初始化状态结束后, 就进入 WAIT 状态。在该状态中, BS MAC 进程模型获取引发中断的事件, 判断不同的中断类型并做相应处理。WAIT 状态下的 Exit Execs 执行完毕后, OPNET 内核判断当前满足哪一个转移条件, 然后执行相应的转移。

➤ DATA_HI 状态

当接收到 TRAFFIC_SERVER 传递来的数据包时执行该状态，该状态主要功能是提取数据包的 `ss_mac_address` 域，并将其映射到本地 BS 的内部 SS 索引，根据该内部索引把数据包存于 BS 为该 SS 分配的 buffer 中，等待 BS 的调度传送。

➤ TO_LOW 状态

该状态用于对 SS 进行资源调度。首先获得 BS 的剩余可利用带宽、发射功率等信息，然后根据相应的调度算法给 SS 分配可用的资源；最后向 SS 发送相应的数据包，并等待 SS 的反馈信息。

➤ SERVICE_REQ 状态

当接收到用户的业务定制请求时执行该状态，首先对 SS 在 BS 中的记录数组赋初值。然后向 TRAFFIC_SERVER 发送业务定制请求。

➤ ARQ 状态

该状态用于处理 SS 的自动请求重发。当有数据需要重传时，BS 将重传数据存于重传 buffer 中，并等待下一帧的调度，下一 frame 的调度将先从重传 buffer 开始。

➤ FROM_SS 状态

该状态用于处理 SS 反馈回来的信息，当 BS 接收到 SS 反馈回来的确认信息时，核对 BSN 是否在 `ARQ_TX_WINDOW_START` 到 `ARQ_TX_NEXT_BSN-1` 范围之内，如果在上述范围之外，则丢弃该确认信息；否则 BS 将根据接收到的确认信息设置重传标识，由于重传有较高的优先级，BS 将首先处理重传。此外，该状态还用于记录 SS 反馈回来的信道状态质量。

下面介绍 ARQ 功能模块在 BS 仿真器中的实现，BS MAC 层的其他主要功能在第四章中作介绍。

标准规定执行 ARQ 时对数据分块处理。即使不支持 Fragment，ARQ 处理过程也类似于支持 Fragment 的情况，数据在逻辑上被分割成若干个长度均为 `ARQ_BLOCK_SIZE` 的数据块，并为每个数据块分配一个 BSN (Block Sequence Number)。

执行 ARQ 过程中，ARQ block 有四个状态，Not-send、Discarded、Outstanding 和 Waiting-for-retransmission。当 block 从 TRAFFIC_SERVER 进入 BS 时，首先进入 Not-send 状态，即等待传送阶段；如果 block 被发送，BS 将 block 复制以备重传，ARQ block 进入 Outstanding 状态，此时如果 block 等待 `ACK_RETRY_TIMEOUT` 时间未得到确认信息或 BS 接收到 SS 反馈的 NACK 信息，则 block 进入 Waiting-for-retransmission 状态等待重传；如果 block 接收到 ACK 信息或者 `ARQ_BLOCK_LIFETIME` 时间达到，block 将从 Waiting-for-retransmission 状态转到 Discarded 状态；如果 block 被发送后在 `ACK_RETRY_TIMEOUT` 时间段内接收到 SS 反馈的 ACK 信息，将直接进入 Discarded 状态。如图 3-11 所示。

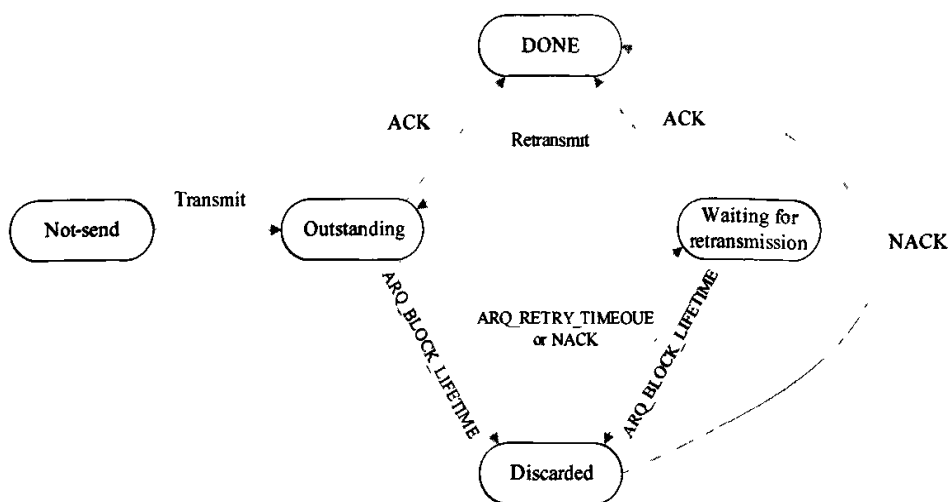


图 3-11 ARQ 状态转移图

程序结构实现流程如图 3-12 所示，图中变量说明如下：

TX_buffer: 存储 Not-send 状态 block 的数据缓存；

RETX_buffer: ARQ block 发送后将被复制并存储于该缓存；

ARQ_buffer: 存储需要重传的 ARQ block；

ARQ_BLCOK_STATUS: LOSS 表示 Discarded，ERROR 表示错误接收，COLLECT 表示正确接收。

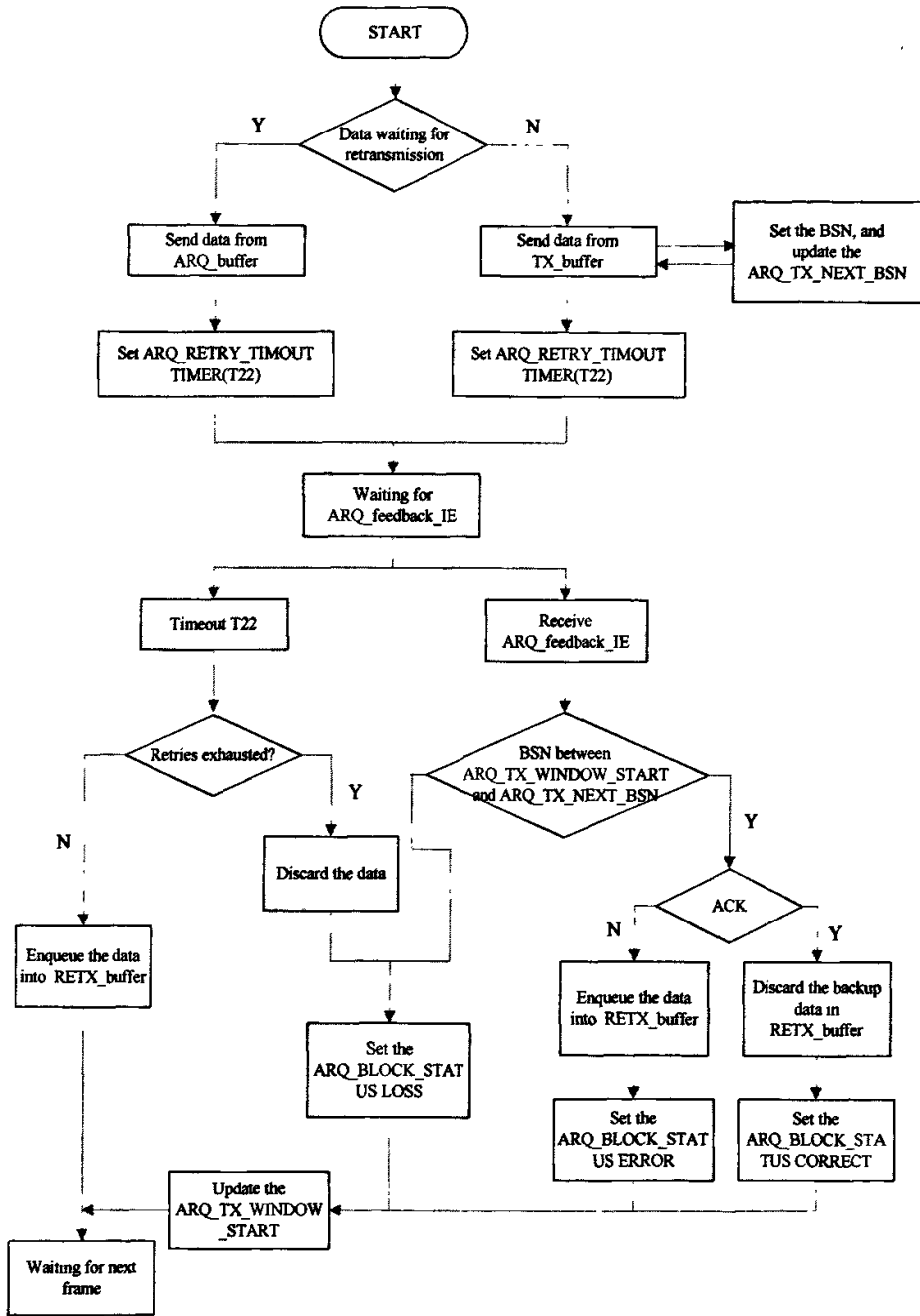


图 3-12 ARQ 实现流程

2. ss_mac 节点模块的进程模型

OPNET 仿真时, ss_mac 节点模块的进程模型如图 3-13 所示。

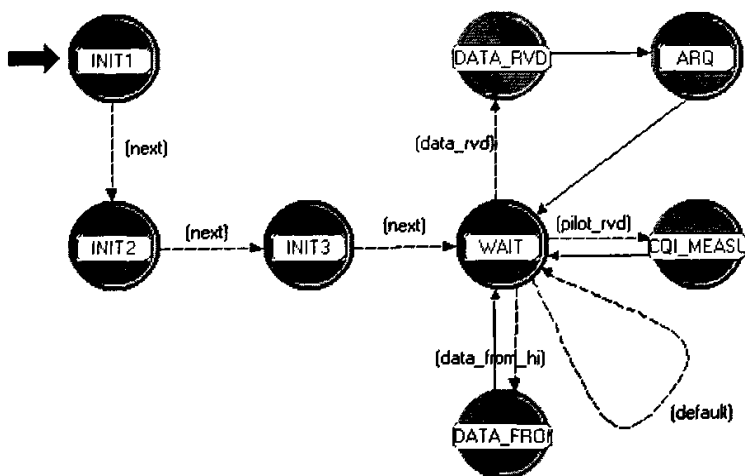


图 3-13 ss_mac 节点模块的进程模型

由图 3-13 可见，ss_mac 模块的进程模型由“INIT1”、“INIT 2”、“INIT3”、“WAIT”、“DATA_FROM_HI”、“DATA_RVD”、“ARQ”和“CQI_MEASURE”这 8 个状态组成。各个状态之间的转移条件在进程模型的 HB 中以宏定义的形式给出，它们的含义分别为：

- next: 产生自中断；
- data_from_hi: 接收到 ss_client 模块的数据包；
- data_rvd: 接收到 BS 发送的数据包；
- pilot_rvd: 接收到 BS 周期性发送的前导码数据包；
- default: 其它的中断。

下面分别介绍“INIT1”、“INIT 2”、“INIT3”、“WAIT”、“DATA_FROM_HI”、“DATA_RVD”、“ARQ”和“CQI_MEASURE”这 8 个状态的主要功能。

➤ INIT1、INIT2、INIT3 状态

这些状态主要负责对进程的初始化，包括设置进程参数，获取仿真网络 SS 数量，获取仿真中需要用到的统计量，注册全局变量、句柄；将本地进程注册到仿真模型的全局进程注册表中，并设定其它模块可能需要访问的参数等；初始化完成后转入 WAIT 状态。

➤ WAIT 状态

在该状态中，进程获取数据流中断，根据数据流中断产生的来源设置不同的转移条件，进入不同的状态。该状态的功能类似于 BS MAC 层节点进程模型的 WAIT 状态。

➤ DATA_FROM_HI

该状态用于处理来自 ss_client 模块的数据流。如果是业务定制请求数据包，直接将其发送给 BS；如果是业务结束标识数据包，部分状态变量将被重新初始化

➤ CQI_MEASURE

当接收到 BS 周期性发送的前导码数据包, SS 进入该状态, 根据 3.2.2 节和 3.2.3 节描述的信道建模方法进行信道质量估计, SNR 测量以及向 BS 反馈信道增益值。

程序结构实现流程如图 3-14所示。

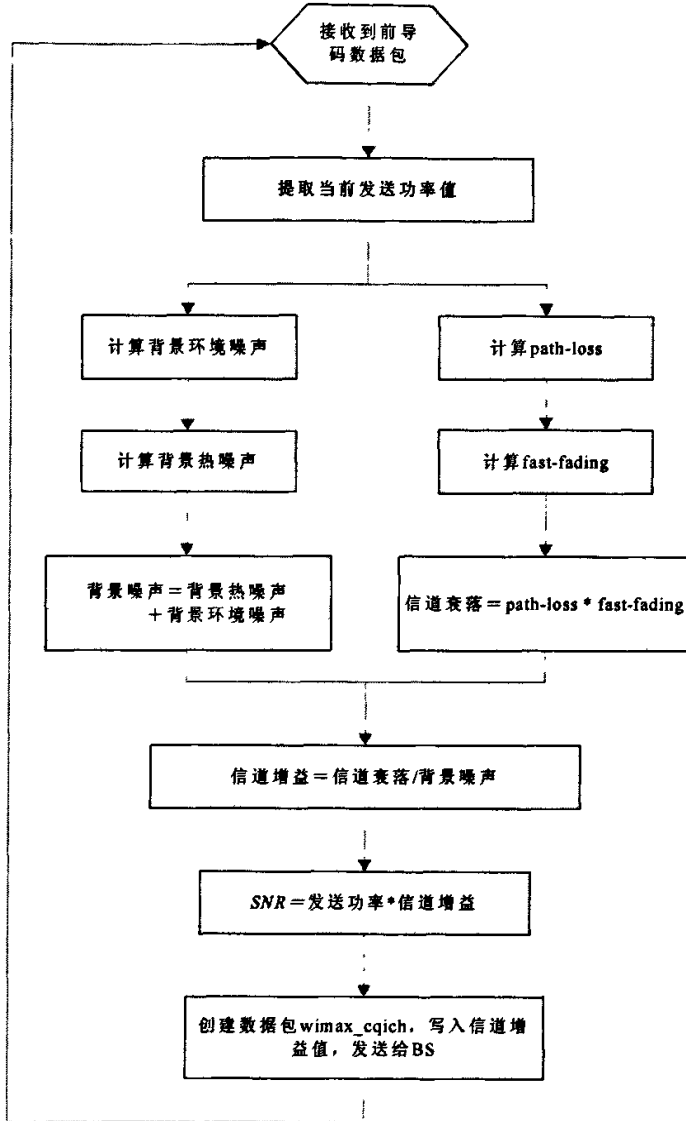


图 3-14 信道质量估计

➤ DATA_RVD

该状态用于处理来自 BS 的业务流。如果接收数据包中 blocks 的 BSN 在 $ARQ_RX_WINDOW_START$ 到 $ARQ_RX_WINDOW_START + ARQ_WINDOW_SIZE$ 范围之内, 根据 3.2.3 节所述等效信道建模方法判断是否正确接收该数据包; 如果 BSN 不在接收窗口范围之内, 丢弃该数据包。

➤ ARQ

ARQ 状态主要完成功能:

- (1) 向 BS 反馈 ARQ Feedback IE;
- (2) 更新 ARQ_RX_WINDOW_START 值。

程序结构实现流程如图 3-15 所示。

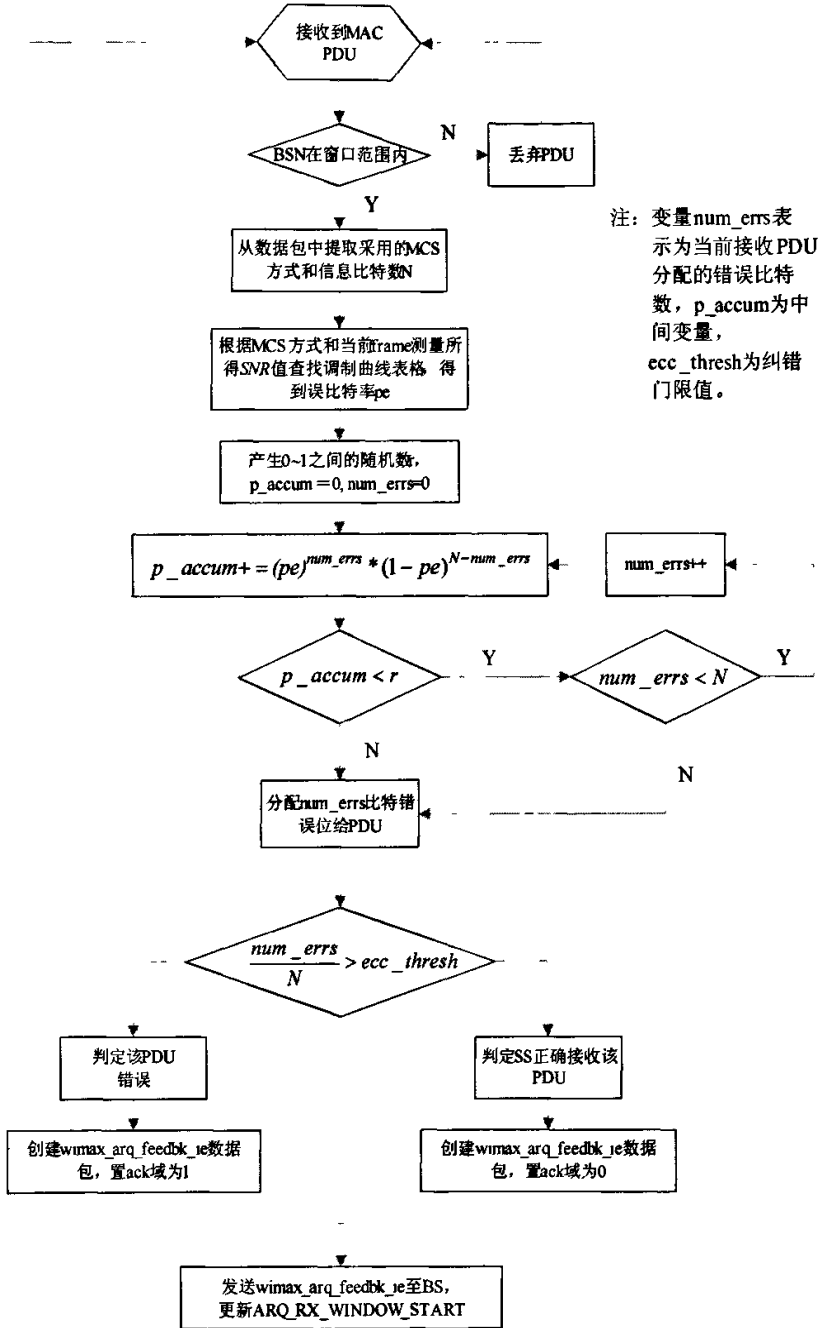


图 3-15 DATA_RVD 和 ARQ 模块实现流程

3.3 本章小结

本章第一节首先简要介绍了 IEEE 802.16d 标准的空中接口规范，然后从特定服务汇聚子层、公共部分子层、安全子层三个层面介绍 MAC 层规范，最后分别介绍了 IEEE 802.16d MAC 层所能支持的 WirelessMAN-SC、WirelessMAN-SCa、WirelessMAN-OFDM 以及 WirelessMAN-OFDMA 四种不同的物理层规范。

第二节依据 OPNET 工具采用三层结构对协议实体的功能进行模拟的原则，从网络拓扑结构、节点模型、进程模型三个层次，对利用 OPNET 搭建的基于 IEEE 802.16d 标准的 WiMAX 系统仿真平台作了详细的介绍。

第4章 联合分组调度与功率分配算法

未来的无线通信系统主要应用将从语音业务转向数据业务, 需要支持高速率的数据业务, 比如视频会议、视频点播、交互式游戏等等, 这些可变数据速率业务 (Variable Bit Rate, VBR) 的特性可以由平均数据传输速率, 峰值数据传输速率, 时延等参数来描述。恒定比特率业务 (Constant Bit Rate, CBR) 用于需要静态带宽的连接, 并且要求提供最高优先级。其特点是业务数据流稳定, 突发性很小, 典型应用是电路、仿真语音。

传统无线资源管理的目标是在有限带宽的条件下, 为网络内无线用户终端提供业务质量保障, 其基本出发点是在网络话务量分布不均匀、信道特性因信道衰弱和干扰而起伏变化等情况下, 灵活分配和动态调整无线传输部分和网络的可用资源, 最大程度地提高无线频谱利用率, 防止网络拥塞和保持尽可能小的信令负荷。近年来, 联合无线资源管理逐步成为研究热点, 联合无线资源管理则是一组网络的控制机制的集合。它能够支持智能的呼叫和会话接纳控制, 业务、功率的分布式处理, 从而实现无线资源的优化使用和达到系统容量最大化的目标。这些机制同时应用多种接入技术, 并需要可重配置或者多模终端的支持。就功能而言, 联合无线资源管理涵盖了原有无无线资源管理的各项功能。

分组调度算法和功率分配技术对系统性能的提高都具有很明显的作用, 此外, 系统层面的性能和用户层面的性能都受调度和功率分配的影响, 调度与功率分配两者本身也是相互关联, 相互影响的, 本章提出的联合分组调度与功率分配算法 (Joint Scheduling and Power Allocation, JSPA) 面向实时轮询业务 (rtPS), 考虑链路自适应技术引入的功率优化问题, 将分组调度与功率分配两种技术有机的结合起来, 进一步提高系统的性能。

4.1 JSPA 算法描述

4.1.1 系统模型

研究单小区 IEEE 802.16d 系统的下行链路, 它由一个 BS 和 K 个激活业务用户组成, BS 位于小区中央, 采用全向天线结构, 下行信道分成长度为 T 的物理帧, IEEE 802.16d 标准规定 PHY-OFDM FDD 下行链路采用 TDM 方式, 即一帧内只给一个 SS 发送数据。所有激活 SS 周期性估计与 BS 间的信道状态, 通过 REP-RSP 反馈给 BS。假设基站通过信道预测器能够准确预知各 SS 在下一帧的信道状态, 调度器确定下一帧被调度的 SS 以及调制编码方式, 通过 DL-MAP 通知 SS。

假设 SS k 的前向链路增益为 g_k , 表征当 BS 的发送功率为 0dB 时 SS k 的接收信噪比, 定义信道增益向量为 $\vec{g} = \{g_1, g_2, \dots, g_K\}$ 。以 C_k 代表 SS k 的最小平均数据速率要求, 假设 SS k 达到数据速率 c 所需信噪比为 $f_k(c)$, 由于不同 SS 具有不同的服务质量要求, 采用的调制编码方式也不尽相同,

进而需要的功率也是不相同的, 因此 $f_k(c)$ 是一个与 k 有关的函数。此外, $f_k(c)$ 是 c 的递增函数, 且 $f_k(0) = 0$, 发射机在给定信道增益 g_k 的条件下, 达到数据速率 c 所需的最小发送功率为 $f_k(c)/g_k$ 。

定义 Q 为调度策略, 如果 $Q(\bar{g}) = k, k = 1, 2, \dots, K$, 表明下一帧 SS k 被调度; 如果 $Q(\bar{g}) = Null$, 表明所有 SS 的信道条件都比较差, 下一帧不为任何 SS 传送数据。定义 $p(\cdot)$ 为功率分配策略, $0 \leq p(\bar{g}) \leq P_{max}$, 如果 SS k 被调度, 同时分配给它的功率为 $p(\bar{g})$, 则 SS k 可达到的数据速率可表示为 $c_k(p) = f_k^{-1}(g_k p)$ 。

BS 为每一个激活 SS 分配一段数据缓冲区, 每个 SS 的数据按照先进先出 (FIFO) 原则接受基站调度器的服务, 假设 SS k 数据缓冲区队列队首数据包的等待时间为 $d_k(t)$, 所能承受的最大延时为 D_k^{max} , 则调度器将销毁等待时间超过 D_k^{max} 的数据包。

我们的研究目标是采用何种调度策略与功率分配策略的组合 $\{Q, p\}$, 即判决调度哪个用户及用多大的功率为其发送数据, 使得在每个用户的平均数据传输速率及延时能够满足要求的前提下系统的平均发送功率最小。上述问题用如下数学优化模型表示:

$$\min_{Q, p} \sum_{k=1}^K E(p(\bar{g}) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) \quad (4.1)$$

$$s.t. \quad 0 \leq p(\bar{g}) \leq P_{max} \quad (4.2)$$

$$E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) \geq C_k \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4.3)$$

$$d_k(t) < D_k^{max} \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4.4)$$

其中: C_k 为用户 k 的平均数据速率要求, $\mathbf{1}_A = \begin{cases} 1 & \text{if } A \text{ occurs} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$ 。

记 $P(Q, p) = \sum_{k=1}^K E(p(\bar{g}) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}})$, 表示使用调度及功率分配策略 $\{Q, p\}$ 时系统的平均发送功率。式(4.1)为优化目标: 最小化系统平均发送功率, 受三个条件的约束:

- 1、系统的最大传输功率限制, 式(4.2);
- 2、每个用户有最小平均数据传输速率要求, 式(4.3);
- 3、用户的延时要求, D_k^{max} 为数据包有效期限, 基于流媒体业务的特性, 调度器对于超过有效期限 D_k^{max} 的流媒体数据包采取丢包处理, 式(4.4)。

实际上, (4.1)~(4.4)最优解的获得需要综合考虑调度及功率分配策略, 使得所有 SS 的平均数据传输速率和延时要求能够同时满足, 但由于 $d_k(t)$ 很难表示成调度及功率分配策略的函数, 这使得(4.1)~(4.4)的解决变得复杂而困难。本文提出一种次最优的解决方案, 主要从以下两个方面考虑:

- 1) 在保证 SS 平均数据传输速率要求的前提下, 使系统平均发送功率最小。首先, 不考虑 SS 的延时要求, 求得(4.1)~(4.3)的最优解, 进而为每个激活 SS 分配一个调度优先级, 该方法为机会调度算法 (OP 算法)。
- 2) 利用代价函数, 确定数据包等待时间与调度优先级之间的关系, 等待时间越长的数据包的调度优先级越高。

最后, 根据 1)、2)确定所有激活用户的调度优先级, 调度器调度具有优先级最高的用户并按一定规则为其分配功率。文章 4.1.2 节介绍 OP 算法, 4.1.3 节描述数据包等待时间与调度优先级之间的关系, 4.1.4 节阐述 JSPA 算法。

4.1.2 OP 算法

下面仅考虑数学优化模型中的(4.1)~(4.3)。使用 Lagrange 乘子法:

$$\begin{aligned} L(\bar{\lambda}) &= \sum_{k=1}^K E(p(\bar{g}) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) - \sum_{k=1}^K \lambda_k (E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) - C_k) \\ &= E\left(\sum_{k=1}^K (p(\bar{g}) - \lambda_k c_k(p)) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}\right) + \sum_{k=1}^K \lambda_k C_k \end{aligned} \quad (4.5)$$

定义:

$$l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, p) = p(\bar{g}) - \lambda_k c_k(p) \quad (4.6)$$

$$p_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) = \arg \min_{0 \leq p(\bar{g}) \leq P_{\max}} l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, p) \quad (4.7)$$

$$l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) = l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, p_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g})) \quad (4.8)$$

显然, $l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, 0) = 0$, 因此有 $l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) \leq 0$ 。

命题 1: 如果存在 $\bar{\lambda}^*$, 使得

$$E(c_k(p^*) \cdot \mathbf{1}_{\{Q^*(\bar{g})=k\}}) = C_k \quad (4.9)$$

其中

$$Q^*(\bar{g}) = \arg \min_k l_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g}) \quad (4.10)$$

那么, $\{Q^*, p^*\}$ 是(4.1)~(4.3)式的一个最优解^[72]。

由于 $f_k(c)$ 是 c 的递增函数, 且 $f_k(0) = 0$, 因此必将存在 $\bar{\lambda}^*$ 使得上述结论成立^[72]。根据命题 1, 最优调度方案为: 在所有激活 SS 集合中选取具有最小 $l_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g})$ 的 SS 并分配功率 $p_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g})$ 为其发送数据, 即 $l_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g}) \leq \min_j l_j^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g})$ 。事实上, 可以把 $-l_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g})$ 看作是调度器为 SS k 分配的优先级, 调度器调度优先级最高的 SS, $Q^*(\bar{g}) = \arg \max_k \{-l_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g})\}$ 。

利用式(4.7)计算得到 $p_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g})$, 并将其代入式(4.6)可获得 $l_k^*(\bar{\lambda}^*, \bar{g})$, 其中, λ_k^* 由 $c_k(p^*) \cdot \mathbf{1}_{\{Q^*(\bar{g})=k\}}$ 的概率分布决定, 因为要求 λ_k^* 的选取使得式(4.9)能够成立。在实际系统中, $c_k(p^*) \cdot \mathbf{1}_{\{Q^*(\bar{g})=k\}}$ 的概率分布是无法事先获知的, 因此必须对 λ_k^* 进行估计。

实际上, 可以把 λ_k^* 理解为平均数据速率的补偿量, 就是说, 如果 $E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) > C_k$, 我们将减少 λ_k , 增大 $l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, p) = p(\bar{g}) - \lambda_k c_k(p)$, 这样就减小了 SS k 被调度到的概率, 从而导致 $E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}})$ 变小, 同时可能使 $E(c_j(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=j\}}), j \neq k$ 增大; 同样, 如果 $E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) < C_k$, 我们将增大 λ_k 。我们的目标是找到 $\bar{\lambda}^*$, 使得对于所有的 k , 都有 $E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) = C_k$ 。

通过以上分析可知, λ_k^* 是 $g(\lambda_k) = E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) - C_k = 0$ 的根, 下面简要介绍一种随机逼近方法求取 λ_k^* [71]。 λ_k^* 的获得可用以下迭代方法求取, i 代表迭代次数:

$$\lambda_k^{i+1} = \lambda_k^i + \alpha' \left(C_k - E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}}) \right) \quad (4.11)$$

适当选取 α' (例如 $\alpha' = 0.001$), λ_k^i 将以概率 1 收敛于 λ_k^* [71]。式(4.11)中的 $E(c_k(p) \cdot \mathbf{1}_{\{Q(\bar{g})=k\}})$ 用

$$\begin{cases} \bar{R}_k^i = (1 - \frac{1}{i})\bar{R}_k^{i-1} + \frac{1}{i}c_k^i(p) & \text{如果 } Q(\bar{g}) = k \\ \bar{R}_k^i = (1 - \frac{1}{i})\bar{R}_k^{i-1} & \text{如果 } Q(\bar{g}) \neq k \end{cases} \quad (4.12)$$

替代, 可得

$$\lambda_k^{i+1} = \lambda_k^i + \alpha' (C_k - \bar{R}_k^i) \quad (4.13)$$

\bar{R}_k^i 为 SS k 的平均数据速率估计值, 取 $\lambda_k^0 = 0$ 。

如上所述, $f_k(c)$ 表示用户 k 达到数据速率 c 所需信噪比, 在实际系统中, 由于采用种类有限的自适应调制编码, 因此预计可达到的数据速率 c 是离散的。为降低实现复杂度, 提高系统效率, 在具体实施 JSPA 算法时, 可以将预计能够达到的数据速率与所需的信噪比制成一张表格, 如表 4.1 所示, 以查表的方式实现数据速率与信噪比, 乃至发送功率之间的映射。

表 4.1 数据速率与所需信噪比 (10^{-6} 误比特率) 对应关系表

调制编码方式	QPSK-1/2	16QAM-1/2	16QAM-3/4	64QAM-3/4
MCS_j	MCS_1	MCS_2	MCS_3	MCS_4
数据速率(Mbps)	$C_{MCS_1}^a = 4.608$	$C_{MCS_2}^a = 9.216$	$C_{MCS_3}^a = 13.824$	$C_{MCS_4}^a = 20.732$
SNR(dB)	$\gamma_{MCS_1}^* = 4.6$	$\gamma_{MCS_2}^* = 7.0$	$\gamma_{MCS_3}^* = 8.7$	$\gamma_{MCS_4}^* = 12.3$

根据以上分析易得式(4.6)~(4.8)可用式(4.14)~(4.17)代替:

$$l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, p) = p(\bar{g}) - \lambda_k c(p) = \frac{\gamma_{MCS_j}^*}{g_k} - \lambda_k \cdot C_{MCS_j}^a \quad (4.14)$$

$$\arg \min_{0 \leq p(\bar{g}) \leq P_{max}} l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, p) = \arg \min_{MCS_j} \frac{\gamma_{MCS_j}^*}{g_k} - \lambda_k \cdot C_{MCS_j}^a = MCS_n \quad (4.15)$$

$$p_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) = \frac{\gamma_{MCS_n}^*}{g_k} \quad (4.16)$$

$$l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) = l_k(\bar{\lambda}, \bar{g}, p_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g})) = \frac{\gamma_{MCS_n}^*}{g_k} - \lambda_k \cdot C_{MCS_n}^a \quad (4.17)$$

4.1.3 基于数据包等待时间的代价函数

调度优先级与数据包等待时间 $d_k(t)$ 的关系 $PRI_wait_k(t)$ 可以用以下代价函数表示^[73]

$$PRI_wait_k(t) = \begin{cases} m\alpha \cdot e^{-(D_k^{max}-d_k(t))/\alpha} & d_k(t) \leq D_k^{max} \\ 0 & d_k(t) > D_k^{max} \end{cases} \quad (4.18)$$

这里, D_k^{max} 为数据包有效期限, m 为正常数, α 为数据包的平均等待时间。对于 nPS 业务, 调度器对于超过有效期限 D_k^{max} 的数据包采取丢包处理, 于是(4.18)可以改写成:

$$PRI_wait_k(t) = m\alpha \cdot e^{-(D_k^{max}-d_k(t))/\alpha} \quad (4.19)$$

4.1.4 JSPA 算法

根据上文分析, BS 在调度时需要考虑信道状态、分配的发送功率和数据包时延等方面因素的影响。信道状态及分配的发送功率的大小主要决定系统在每帧能够正确传送的数据量, 即所能达到的数据速率; 数据包的时延情况用来判断各 SS 之间的公平性。为了提高系统容量并且保证调度过程的公平性, 各 SS 的调度优先级 $PRI_k(t)$ 应该是关于 $-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g})$ 和队首数据包等待时间 $d_k(t)$ 的函数

$$PRI_k(t) = F\{-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}), d_k(t)\} \quad (4.20)$$

其中 $F\{\cdot\}$ 是关于 $-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g})$ 和 $d_k(t)$ 的函数。

首先, 当 SS 的 $-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g})$ 大小相同或相近时, $F\{-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}), d_k(t)\}$ 应该是关于 $PRI_wait_k(t)$ 单调递增函数, 此时用户的调度优先级主要由各队列队首数据包等待时间确定, 不失一般性, 并且为了便于实现, $F\{-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}), d_k(t)\}$ 与 $PRI_wait_k(t)$ 之间可以用线性关系表示, 如下:

$$\frac{\partial PRI_k(t)}{\partial PRI_wait_k(t)} = -l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) \quad (4.21)$$

同理, 在各队首数据包等待时间 $d_k(t)$ 相同或相近时, $PRI_k(t)$ 与 $-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g})$ 之间用单调递增的线性关系表示

$$\frac{\partial PRI_k(t)}{\partial (-l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}))} = PRI_wait_k(t) \quad (4.22)$$

综合(4.21)和(4.22)两式, 可以得到各队列在每个调度周期的调度优先级 $PRI_k(t)$

$$PRI_k(t) = -l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) \cdot PRI_wait_k(t) + \theta_0 \quad (4.23)$$

其中 θ_0 是常数。代入式(4.19)并令 $\theta_0 = 0$ 可得各用户调度优先级 $PRI_k(t)$ 是

$$PRI_k(t) = -l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) \cdot m\alpha \cdot e^{-(D_k^{max}-d_k(t))/\alpha} \quad (4.24)$$

调度算法在调度过程中从优先级排序中查寻 $PRI_k(t)$ 最大的队列服务:

$$k = \arg \max \{PRI_k(t)\} \quad \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (4.25)$$

4.2 仿真平台中调度和功率分配功能模块

为了方便比较，同时对 OP 算法和 Round Robin 算法也做了仿真，此外，用数据包丢包率作为用户之间短期公平性的衡量尺度，采用用户达到的平均数据速率作为用户之间长期公平性的衡量尺度。分组调度和功率分配功能主要在 BS MAC 进程模型的 TO_LOW 状态中完成，如图 4-1 所示，实现流程框架如下：

- 1) 激活 SS 数据缓存队列队首数据包更新，对从进入 BS 到当前仿真时间间隔超过用户要求的最大等待时间数据包进行丢包处理；
- 2) 调度方式选择（选择 RR, OP, JSPA 中的一种），在 BS MAC 进程中添加了 `schedule_scheme` 和 `JSPA_Latency` 两个进程属性，调度方式的选择通过两个属性的不同组合方式来实现。如表 4.2、表 4.3 所示。其中，JSPA 与 `Considered` 组合表示 JSPA 算法；JSPA 与 `Unsidered` 组合表示 OP 算法；RR 算法由 `schedule_scheme` 属性的 RR 直接决定。

表 4.2 `schedule_scheme` 属性

Symbol	Value
RR	1
JSPA	2

表 4.3 `JSPA_Latency` 属性

Symbol	Value
Considered	1
Unconsidered	2

- 3) 计算所有激活 SS 的调度优先级，根据优先级对 SS 进行排序；
- 4) 调度优先级最高的 SS，确定 MCS 方式及分配功率，向 SS 发送数据。

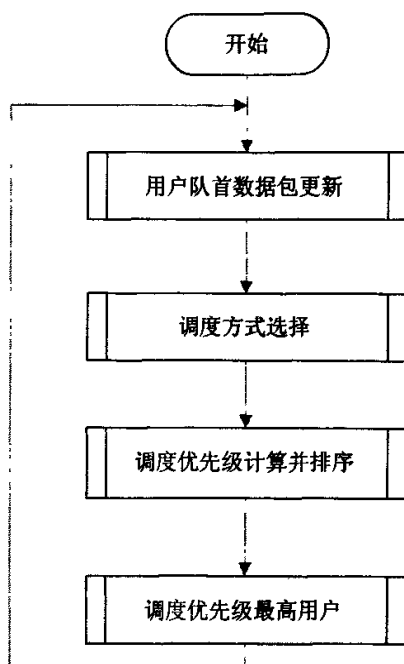


图 4-1 调度及功率分配实现流程示意图

4.2.1 调度优先级计算

下面分别介绍 RR, OP, JSPA 三种算法调度优先级计算流程。

1、RR 算法调度优先级计算:

- 输入: 激活 SS 的 ID 属性队列 `ss_status_array`, 激活 SS 的当前平均数据速率;
- 输出: 按调度优先级排序后的 `ss_status_array`。

与传统的 RR 算法不同, 实现 Round Robin 算法时, 按照 FIFO 原则服务所有激活用户, 如果队首用户的平均数据速率估计值低于用户要求的平均数据速率, 则为该用户分配一个功率值, 使其能够达到当前信道状态所能支持的最高阶 MCS 方式; 如果队首用户的平均数据速率估计值高于用户要求的平均数据速率, 将其移至队列尾部; 如果队列中所有用户的平均数据速率估计值都高于要求的平均数据速率, 则采用最低阶 MCS 方式服务队首用户。

用户平均数据速率在 BS MAC 中的计算:

$$\begin{cases} \bar{R}_k^i = (1 - \frac{1}{i})\bar{R}_k^{i-1} + \frac{1}{i}C_{MCS_n}^a, & \text{if scheduling } k \\ \bar{R}_k^i = (1 - \frac{1}{i})\bar{R}_k^{i-1} & \text{if not scheduling } k \end{cases} \quad (4.26)$$

其中, \bar{R}_k^i 为 SS k 平均数据速率在第 i 个调度周期的估计值, $C_{MCS_n}^a$ 如表 4.1 所示, 表示第 $i-1$ 个调度周期采用 MCS_n 为 SS k 传送数据。

综上所述, RR 算法调度优先级计算流程如下:

- 将队列 `ss_status_array` 队首用户 ID 移至队尾;

- b)、如果 ss_status_array 队首用户的平均数据速率小于要求的平均数据速率，则从最高阶 MCS 开始计算，直到找到功率小于最大发送功率的所能支持的 MCS 方式；
- c)、如果步骤 b) 未能找到满足要求的 MCS 方式，将队首用户 ID 移至队尾，重复 b)；
- d)、如果步骤 b) 重复次数大于激活用户数，则对 ss_status_array 队首用户使用最低阶 MCS 方式 (QPSK-1/2) 发送数据。

2、OP, JSPA 算法调度优先级计算：

- 输入：激活 SS 的 ID 属性队列 ss_status_array ，激活 SS 的当前平均数据速率，激活 SS 反馈回来的信道增益 g_k ；
- 输出：按调度优先级排序后的 ss_status_array 。

OP, JSPA 算法调度优先级计算流程如下：

A1、根据表 4.1 及关系式 $MCS_n = \arg \min_{MCS_j} (\gamma_{MCS_j}^* / g_k - \lambda_k^i \cdot C_{MCS_j}^a)$ 选择 SS k 的 MCS 方式，计算

$$l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) = \lambda_k^i \cdot C_{MCS_n}^a - \gamma_{MCS_n}^* / g_k, \text{ 如果采用 OP 算法, 令 } PRI_k(t) = l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}), \text{ 转到 A4, 否则}$$

执行 A2；

A2、利用 $PRI_wait_k(t) = 15 \cdot \exp[-12 \cdot (D_k^{\max} - d_k(t))]$ 计算基于各队列队首数据包等待时间的队列调度优先级，其中 $d_k(t)$ 为当前仿真时间与队首数据包进入 BS 的差值， D_k^{\max} 为 SS 业务定制请求阶段向 BS 发送的业务流参数，表示用户数据包的最大延时要求。

A3、根据 $PRI_k(t) = 15 \cdot \exp[-12 \cdot (D_k^{\max} - d_k(t))] \cdot l_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g})$ 生成各 SS 调度优先级；

A4、按 $PRI_k(t)$ 从大到小顺序排列 ss_status_array ；

A5、更新所有激活 SS 在 BS 中的记录：

$$\lambda_k^{i+1} = \lambda_k^i + \alpha^i (C_k - \bar{R}_k^i) \quad (4.27)$$

$$\begin{cases} \bar{R}_k^i = (1-1/i)\bar{R}_k^{i-1} + (1/i) \cdot C_{MCS_n}^a & \text{for } k \\ \bar{R}_j^i = (1-1/i)\bar{R}_j^{i-1} & \text{for } j \neq k \end{cases} \quad (4.28)$$

其中 $\lambda_k^0 = 0, \alpha^i = 0.001$ 。

4.2.2 调度用户及分配功率判定

根据 4.2.1 节输出的激活 SS ID 属性队列 ss_status_array ，如果当前调度周期没有需要重传用户，则调度 ss_status_array 队首用户，并分配功率 $p_k^*(\bar{\lambda}, \bar{g}) = \gamma_{MCS_n}^* / g_k$ 。

RR 算法程序结构实现流程如图 4-2 所示，OP, JSPA 算法实现流程如图 4-3 所示。

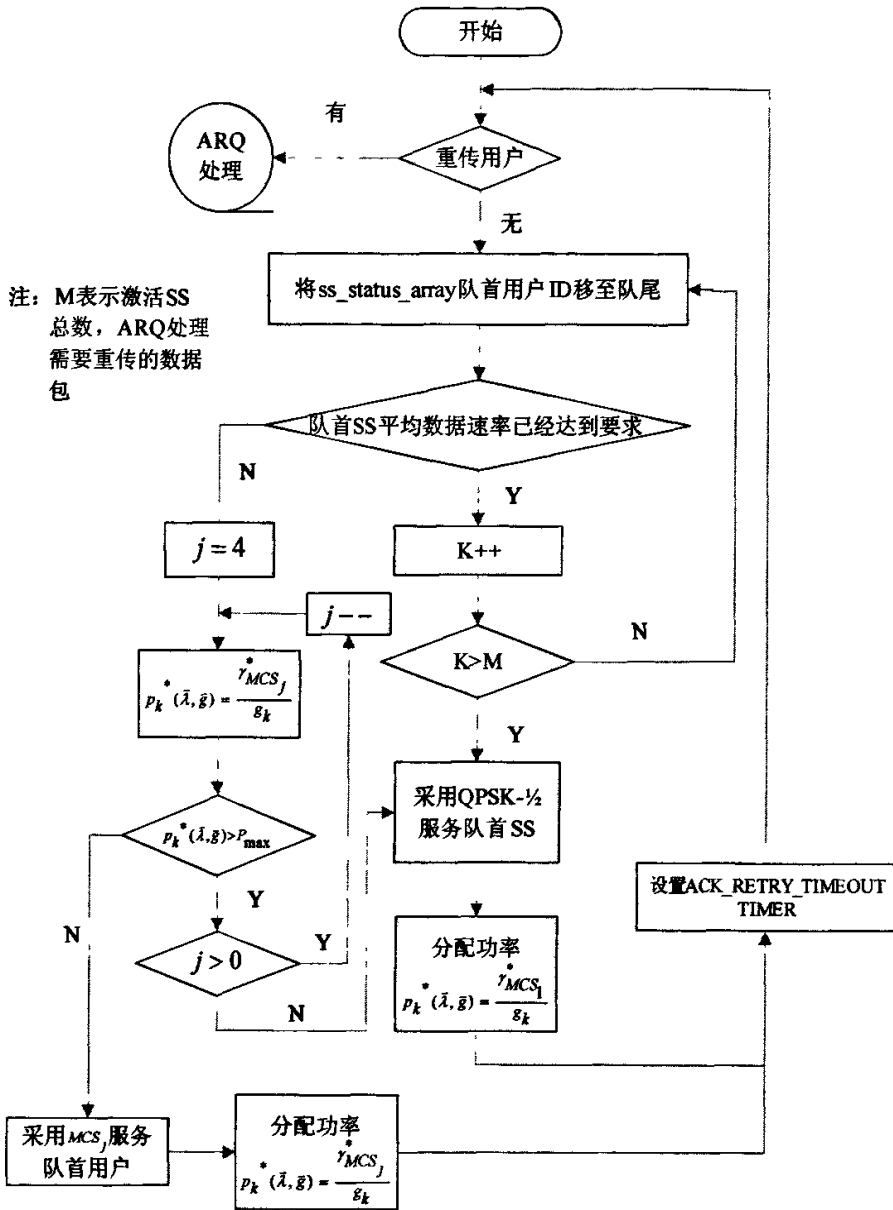


图 4-2 RR 算法程序结构流程

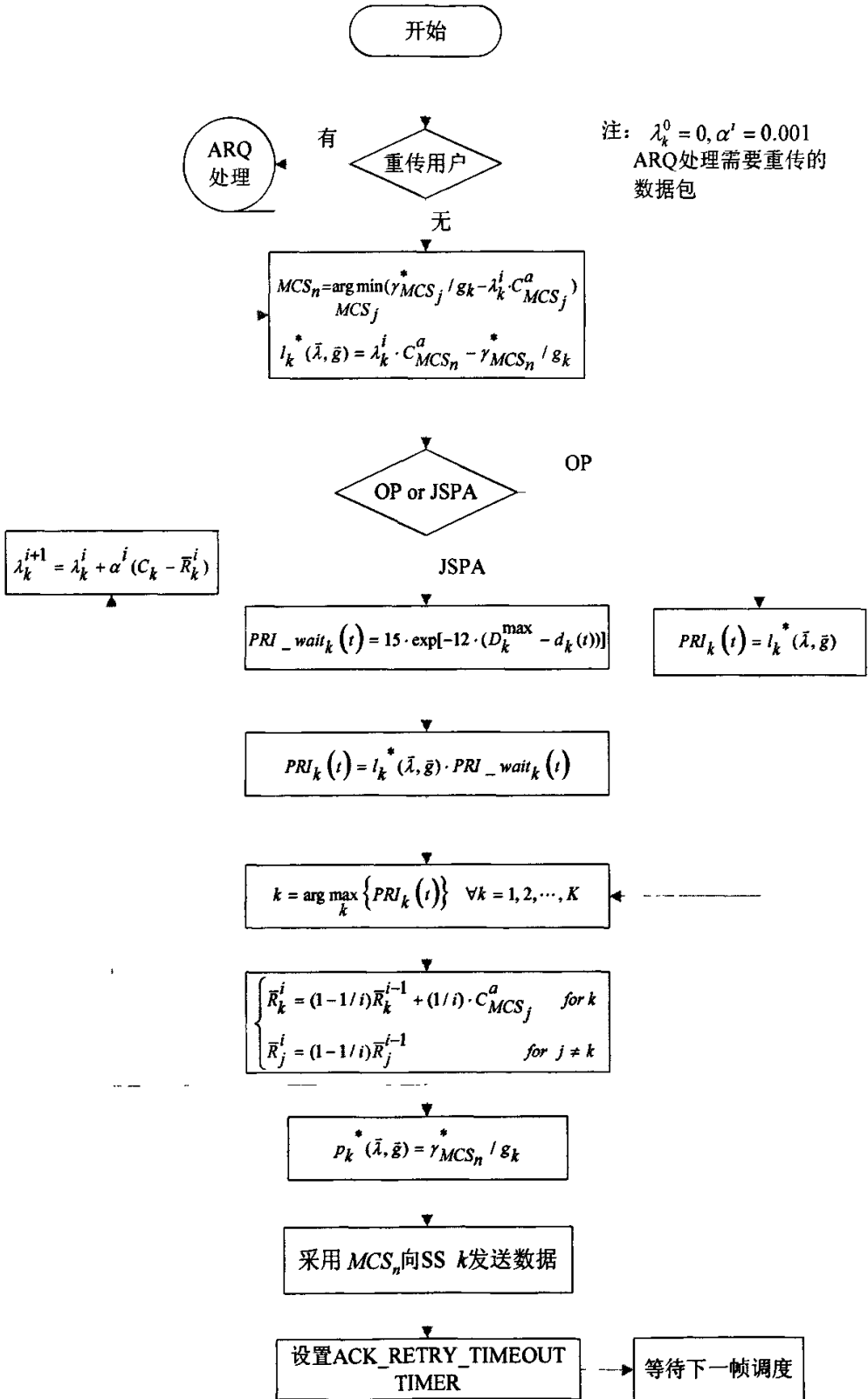


图 4-3 OP, JSPA 算法实现流程

4.3 仿真结果分析

4.3.1 系统性能统计指标

- 吞吐量

吞吐量的统计可以分为小区吞吐量和用户吞吐量两个层面。

在 BS 中统计小区吞吐量。在单位时间内将 BS 中正确发送的数据比特数（去除校验码、填充等冗余后）写入仿真的统计变量中。计算公式如下：

$$Cell_throughput = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K(n)} \sum_{p=1}^{P(n,k)} I(n,k,p)}{T} \quad (4.29)$$

参数说明如下：

T ：系统仿真时间；

N ：一个小区中的 SS 总数；

n ：仿真中 SS 的索引，即 $n=1,2,\dots,N$ ，这样，SS n 可以用 $ss(n)$ 表示；

$K(n)$ ： $ss(n)$ 产生的总的分组呼叫数；

k ：一个用户的分组呼叫索引，对于 $ss(n)$ ， $k=1,2,\dots,K(n)$ ；

$P(n,k)$ ： $ss(n)$ 第 k 次分组呼叫所产生的总的分组数；

p ：在一个分组呼叫内的数据分组索引，对 $ss(n)$ 的第 k 次分组呼叫而言， $p=1,2,\dots,P(n,k)$ ；

$I(n,k,p)$ ： $ss(n)$ 第 k 次分组呼叫的第 p 个数据分组所包含的信息比特数，如果该数据分组到仿真结束仍没有被成功接收，则 $I(n,k,p)=0$ 。

在 SS 中统计用户吞吐量。在单位时间内将 SS 中正确接收的数据比特数写入仿真的统计变量中。计算公式如下：

$$Throughput_{ss(n)} = \frac{\sum_{k=1}^{K(n)} \sum_{p=1}^{P(n,k)} I(n,k,p)}{T} \quad (4.30)$$

- 延时

在仿真程序的设计时，每一个新建的数据包都会附上一个时间标签（time stamp）记录数据包的创建时刻，统计延时只需将仿真的当前时刻减去时间标签即可得到数据包的传输延时。

- 数据速率

在仿真设计时，SS 在每个 frame 时间段内记录正确接收的信息比特数，如果当前 frame 无接收数据，则记录信息比特数为 0。在统计 SS 瞬时数据速率时只需在每个 frame 结束时刻将记录的信息比特数除以 frame 长度即可得到当前 SS 的数据速率。

平均数据速率统计量的收集只需使用 OPNET 自带的平均功能对瞬时数据速率进行平均即可获得。

● 发送功率

在仿真设计时，BS 记录每个 frame 对 SS 发送数据时的功率值，并将其写入仿真统计量中即可得到瞬时发送功率值，平均发送功率统计量的收集只需使用 OPNET 自带的平均功能对瞬时发送功率进行平均即可获得

4.3.2 仿真结果简要分析

系统仿真比较了 RR（仿真场景名为 wimax_pc-multirate_RR），OP（仿真场景名为 wimax_pc-multirate_OP），JSPA（仿真场景名为 wimax_pc-multirate_JSPA）三种调度与功率分配方案在基站平均发送功率，小区吞吐量，用户平均数据速率以及数据包延时等方面的性能。网络模型采用蜂窝结构，一共 19 小区，在各小区的中央放置一个基站，基站采用全向天线，每个基站服务若干 SS，所有的基站都连接到骨干网上，SS 平均数据速率要求为 1.3Mbps，最大延时不得超过 200ms，对等待时间超过 200ms 的数据包采取丢包处理，最大发送功率为 25W，仿真时间 200s。

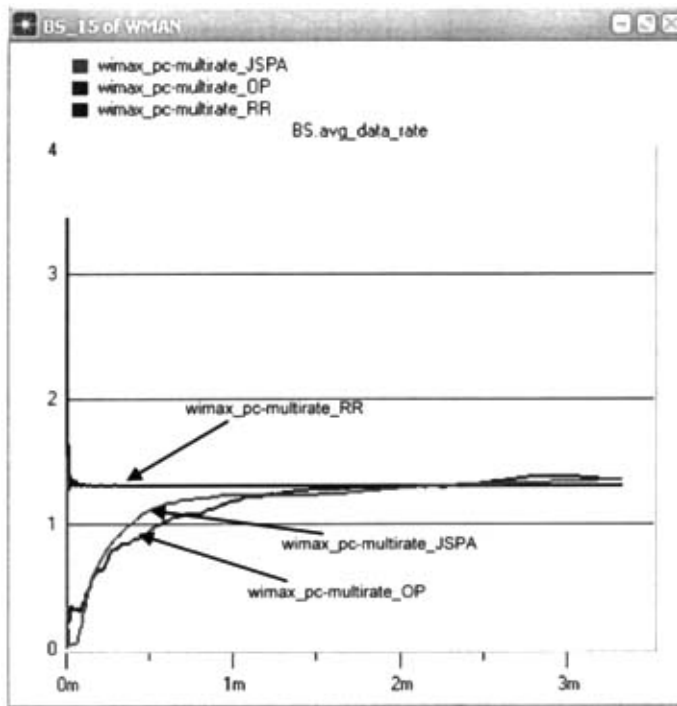


图 4-4 三种算法的 SS 在 BS 中的平均数据速率估计值 (Mbps)

图 4-4 所示的是三种算法的 SS 在 BS 中的平均数据速率估计值，容易看出，三种算法的平均数据速率估计值均收敛到 1.3Mbps。由于 BS 无法事先预知当前信道状态所能支持的准确数据速率值，因此 BS 将根据平均数据速率估计值调度用户，确定其 MCS 方式及分配相应的功率（如 4.2 节所述）。该估计值通过计算下式获得：

$$\begin{cases} \bar{R}_k^i = (1-1/i)\bar{R}_k^{i-1} + (1/i) \cdot C_{MCS_k}^a & \text{for } k \\ \bar{R}_j^i = (1-1/i)\bar{R}_j^{i-1} & \text{for } j \neq k \end{cases} \quad (4.31)$$

图 4-5~图 4-7 所示的是三中算法的 SS 实际接收平均数据速率，可以看出，SS 实际数据速率值要比估计数据速率值小，主要原因是由于受到重传，MAC 层负载，业务源数据包到达率等方面因素的影响。但从图中可以看出，所有 SS 的实际接收平均数据速率都接近 1.3Mbps。

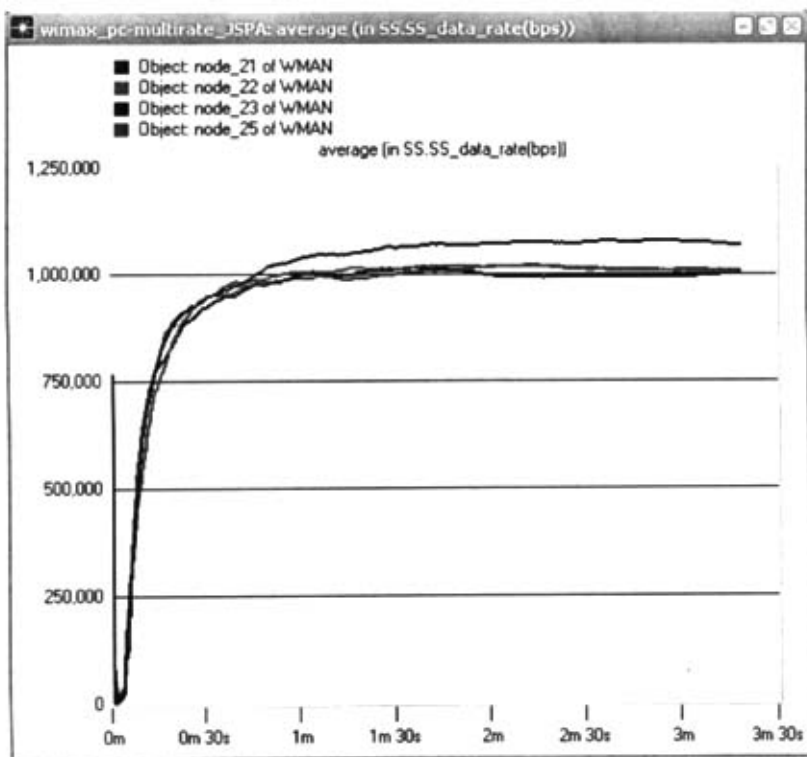


图 4-5 JSPA 算法 SS 实际接收平均数据速率

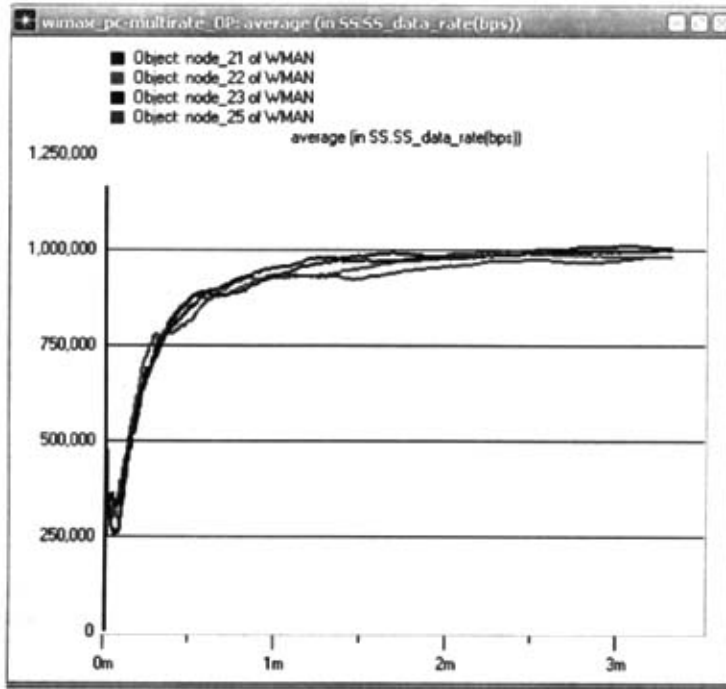


图 4-6 OP 算法 SS 实际接收平均数据速率

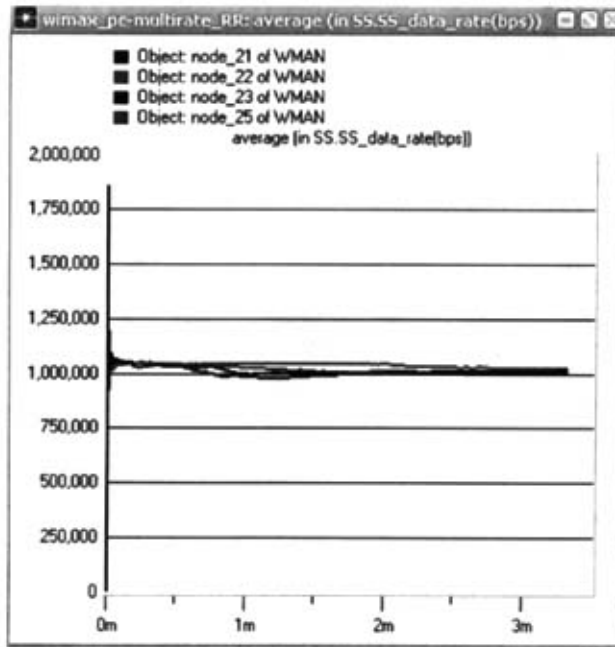


图 4-7 RR 算法 SS 实际接收平均数据速率

图 4-8 所示的是三种算法平均发送功率,可以看出,OP 算法和 JSPA 算法平均发送功率在 7.5W 左右,比 RR 算法节省 5W。由于 JSPA 算法是在 OP 算法基础上考虑用户的 short-term performance 要求,也就是结合考虑用户等待队列首数据包的延时因素,以此改变调度用户的优先级,因此,有可能使得 BS 平均发送功率不再最小。如图 4-8 所示,JSPA 算法和 OP 算法的平均发送功率相差甚微,所以 JSPA 算法对 OP 算法在 BS 的平均发送功率性能方面恶化程度很小。

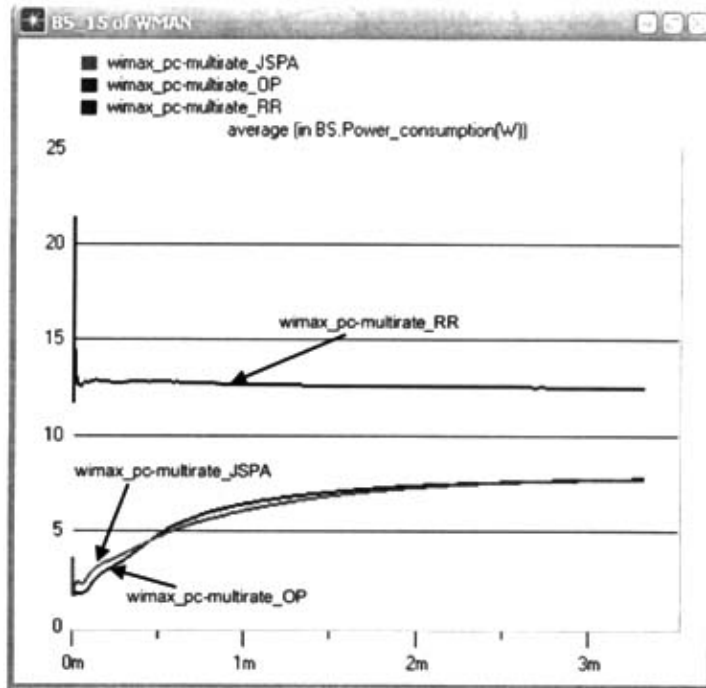


图 4-8 三种算法平均发送功率

图 4-9 所示的是仿真场景中 SS (即 node_22) 的数据包延时累积分布函数图,可以看出 node_22 数据包延时集中在 0~100ms 之间,而 OP 算法和 RR 算法的数据包时延跨度 0~200ms。相比于 OP 算法和 RR 算法,JSPA 算法产生的时延抖动相对小很多。因此,JSPA 算法在时延性能方面比 OP 算法和 RR 算法要优越,进而导致相对较小的数据包丢包率。

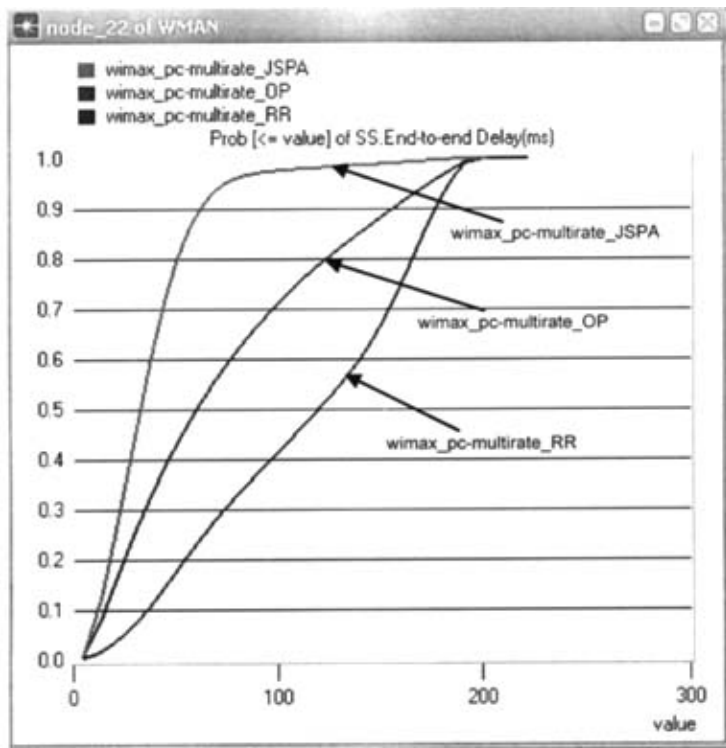


图 4-9 node_22 数据包延时累积分布函数图

图 4-10 所示的是三种算法的小区吞吐量，三种算法在小区吞吐量性能方面比较接近。小区吞吐量与用户的数据速率有相当大的关系，从图 4-5~图 4-7 可以看出，三种算法用户的数据速率相差不多，因此小区吞吐量也相应的比较接近。

通过以上分析可知，JSPA 算法能够满足所有 SS 的数据速率要求，SS 之间的长期公平性得到了较好的保证，此外，JSPA 算法所需系统平均发送功率比 RR 算法有很大程度的降低。采用 JSPA 算法和 OP 算法时系统所需的平均发送功率相差甚微（如图 4-8 所示），但是 OP 算法没有考虑 SS 数据包的等待时间因素，很容易导致信道条件较差的 SS 在一段相当长的时间内得不到服务，因此从图 4-9 可以看出，采用 OP 算法时用户的时延性能相对较差，而采用 JSPA 算法时用户数据包的等待时间最短，由此表明，JSPA 算法在保证 SS 的短期公平性性能方面效果最好，而 OP 算法较差。总之，OP 算法在保证每个业务流的平均数据传输速率的前提下，最小化系统平均发送功率；而 JSPA 算法在保证每个业务流的平均数据传输速率及时延性能的前提下，最小化系统平均发送功率，较好的实现了用户长期公平性和短期公平性的折衷。

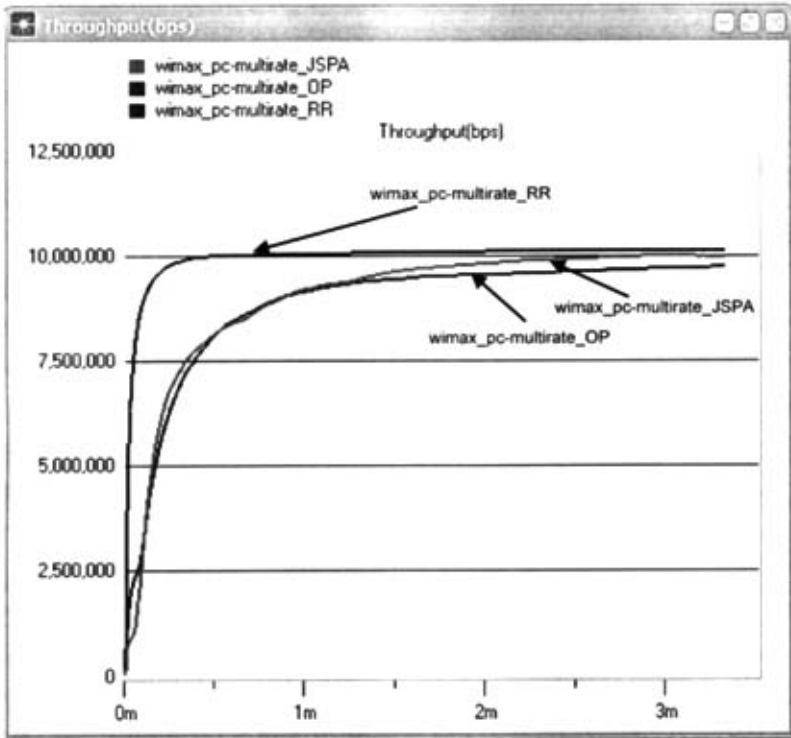


图 4-10 小区吞吐量曲线图

4.4 本章小结

本章提出了一种适用于 WIMAX 系统的联合调度与功率分配算法，在保证每个业务流的平均数据传输速率的前提下，将分组调度与功率分配相结合，使得 BS 在统计平均意义下的发射功率达到最小，以减小对其他用户和小区的干扰；此外，结合考虑由于用户等待而带来的系统运行成本，提高用户的时延性能。该算法的实现包括两个方面：首先，在保证用户平均数据传输速率要求的前提下使系统平均发送功率最小，BS 根据 SS 反馈回来的信道增益计算分配不同功率时，SS 预计能够达到的数据速率，综合考虑功率与数据速率因素为每个 SS 分配一个优先级。其次，利用代价函数，确定数据包等待时间与调度优先级之间的关系，等待时间越长的数据包的调度优先级越高。在下一个运行周期，BS 调度优先级最高的用户并分配相应的功率，确定其 MCS 方式，进而向其传输数据，完成一次调度与功率分配周期。仿真结果表明，在数据包传输时延受限的条件下，算法较好的实现了长期公平性和短期公平性的折衷。

第5章 总结

本章对论文的主要工作进行简要的总结，同时根据 WiMAX 系统当前的研究状况，对 WiMAX 技术可供进一步研究的问题进行探讨。

5.1 论文总结

随着无线通信与因特网的快速发展，通信市场正在呈现出语音业务移动化，数据业务宽带化的发展趋势。目前以光纤为主体的核心网已基本能满足带宽需求，而主要瓶颈在于“最后一公里”问题，即从客户网到核心网的接入瓶颈。宽带无线接入系统是解决此问题的有效途径，为此，IEEE 颁布了 IEEE 802.16 协议标准，定制了新的无线城域网空中接口规范 WirelessMAN™。基于 IEEE 802.16 标准的 WiMAX 技术，以其传输速率高、传输距离远的特点越来越受到业界人士的重视。由于无线系统的可用频谱资源非常稀缺，如何高效地管理和利用有限的频谱资源显得比较重要，无线资源管理中的调度与功率分配技术是提高系统资源利用率，提高系统传输效率的有效方法。本论文研究的主要工作是分析并建立 WiMAX 系统中单小区范围内针对多用户的无线资源调度和功率分配算法的仿真平台；针对 IEEE 802.16d 标准，对无线资源调度和功率分配技术以及两者的联合进行研究，探讨能够优化系统性能的合理的资源调配方案。论文所作的主要工作如下：

- ▶ 简要介绍了 WiMAX 系统各个版本的演进及采用的无线资源管理方法，详细介绍了 WiMAX 系统的技术特点和网络构架。而后阐述了分组调度与功率分配技术的基本原理，简单介绍了几种分组调度算法和功率分配方案，并总结分析了现有无线通信系统采用的调度与功率分配方法的优缺点。
- ▶ 详细介绍了利用 OPNET 搭建的 WiMAX 仿真系统的实现。详细描述了无线信道建模，包括传播路径损耗、阴影衰落及快衰落三部分及其在仿真平台中的实现；描述了仿真平台中物理层的等效建模；详细介绍了 BS 和 SS 的节点模型及进程模型的各个模块功能的实现流程。
- ▶ 提出了一种适用于 IEEE 802.16d 标准的联合调度与功率分配算法。首先，调度器根据信道质量及用户的速率要求为每个用户分配一个调度优先级，然后利用代价函数使得用户数据包等待时间与调度优先级关联，最后综合考虑以上两方面的因素，确定用户的优先级，调度具有优先级最高的用户并按一定准则确定其 MCS 方式，并为其分配功率。算法在保证每个业务流的平均数据传输速率及延时要求的前提下，将分组调度与功率分配相结合，使得基站在统计平均意义下的发射功率达到最小，以减小对其他用户和小区的干扰，以牺牲用户部分的长期性能为代价，提高用户的短期性能，较好的实现了用户长期公平性和短期公平性的折衷。

5.2 可以进一步研究的问题

作为一种新兴的无线宽带接入标准, IEEE 802.16 标准无疑具有很大的发展前景。目前, WiMAX 技术基本上还处于理论研究阶段, 还有诸多问题可供进一步研究:

(1)、IEEE 802.16d/e 都采用了自适应天线技术, 因此可以研究在 MIMO-OFDM 系统中的联合无线资源管理方法, 以进一步提高系统性能;

(2)、混合业务下分组调度与功率分配的联合研究;

(3)、睡眠模式下的节能技术研究;

(4)、WiMAX 系统组网技术、频率复用技术研究;

(5)、WiMAX 网络如何与 3G 网络的融合。

致 谢

值此论文完成之际，我深深感谢所有帮助过我和关心过我的人们！我对他们表示衷心的感谢和至诚的敬意！

在此特别感谢我的导师赵新胜教授。在我入学以来，从科研工作和生活细节，在各方面我都得到了赵老师的悉心指导和帮助。赵老师孜孜不倦的敬业精神、严谨的治学作风和一丝不苟的工作态度，时时影响着我，感染着我，激励着我。赵老师在无线资源管理方面有着深厚的积累，我的每一点进步都得益于他的悉心指导。赵老师不仅在专业知识的学习中给予了我巨大的帮助，同时在我的整个研究生阶段，赵老师营造宽松的科研环境，对于如何选择正确的学习态度和方法，以及怎样培养认真扎实的工作态度都给予了我悉心的指导，使我终生受益。

衷心地感谢移动通信国家重点实验室的全体老师，感谢高西奇教授、陈明教授、黄清教授、赵春明教授、潘志文教授、王向阳副教授、杨琳老师、张源老师、房芳老师，王南老师、郭玉珍老师等在科研，工作和学习生活中给我的帮助。

感谢我的同窗祁建、张迎新、何荣寿、高燕、龚希陶、张燕舞、曹晔、彭张节、甘璐、李文俊、商秋、王欣、毛银伟、袁斌、周磊、谢宜昊、彭星晔等同学，与他们一起工作生活，带给我很多的快乐，与他们一起讨论，使我受益非浅，感谢吴志彪、朱定乾、顾桢杰、梁浩、李朝明、杨致远、吴广等同门师兄弟在科研工作中的愉快合作，感谢和我一起生活，生活的所有同学，他们的关心和帮助使我感受到集体的温暖。

永远感谢父母的养育之恩！在我将近二十年的寒窗生涯中，父母和亲戚们孜孜不倦的教诲和鼓励是促使我不断进取并完成学业的重要精神动力。无论什么时候，他们都是我最坚强的后盾。最后，感谢我的女友一直以来默默的支持和鼓励，感谢她伴我度过最美好的研究生生活。

周雄弟

2007年1月于文正楼

参考文献

- [1]. IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 802.16™-2004 (Revision of IEEE Std 802.16-2001). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems [S]. 2004.
- [2]. IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 802.16e™-2005. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1 [S]. 2006.
- [3]. Ghosh A, Wolter D R, Andrews J G, et al. Broadband wireless access with WiMax/802.16: current performance benchmarks and future potential [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(2): 129-136.
- [4]. Eklund C, Marks R B, Stanwood K L, et al. IEEE standard 802.16: a technical overview of the WirelessMAN™ air interface for broadband wireless access [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(6): 98-107.
- [5]. Koffman I, Roman V. Broadband wireless access solutions based on OFDM access in IEEE 802.16 [J]. IEEE Communications Magazine, 2002 40(4): 96-103.
- [6]. Vaughan-Nichols S J. Achieving wireless broadband with WiMax [J]. Computer, 2004, 37(6): 10-13.
- [7]. Sari H. Trends and challenges in broadband wireless access [C]. SCVT-2000, 2000: 210-214.
- [8]. Cicconetti C, Lenzini L, Mingozzi E, et al. Quality of service support in IEEE 802.16 networks [J]. IEEE Network, 2006, 20(2): 50-55.
- [9]. Jens Zander. Trends in Resource Management Future Wireless Networks. IEEE WCNC, 2000, 1: 159-163.
- [10]. Peng Mugen, Wang Wenbo. A Framework for Investigating Radio Resource Management Algorithms in TD-SCDMA Systems. IEEE Communication Magazine, 2005, 43(6): S12 - S18.
- [11]. Bharghavan Vaduvur, Lu Songwu, Nandagopal Thyagarajan. Fair Queuing in Wireless Networks: Issues and Approaches [J]. IEEE Personal Communication Magazine, 1999, 6(1): 44-53.
- [12]. Jorgueski L, Fledderus E, Farserotu J, et al. Radio Resource Allocation in Third-Generation Communication Systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(2): 117-123.
- [13]. Liu X, Chong E, Shroff N. A Framework for Opportunistic Scheduling in Wireless Networks [J]. Computer Networks Journal (Elsevier), 2003, 41(4): 451-474.
- [14]. Jain R. The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling [M]. New York: Wiley, 1991.
- [15]. Yates R D. High Speed Round Robin Queueing Networks [D]. Ph.D thesis, MIT Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 1990.
- [16]. Shakkottai S, Rappaport T. S, Karlsson P. C. Cross-layer design for wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(10): 74 -80.
- [17]. Carroll J E, Kirkby P A. Proportionally fair pricing: dynamics, stability and pathology [J]. IEEE Proceedings Communications, 2000, 147(1): 23 -31.
- [18]. Parekh A K, Gallager R G. A generalized processor sharing approach to flow control in integrated service networks: the single-node case [J]. IEEE/ACM Trans. Networking, 1993, 1(3): 344-357.
- [19]. Stiliadis D, A Varma. Rate-proportional servers: A design methodology for fair queuing algorithms [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1998, 6(2):164-173.

-
- [20].Bennett J C R, Zhang H. WF²Q: Worst-case fair weighted fair queuing [C]. IEEE INFOCOM'96. Palo Alto, CA, 1996: 143-156.
- [21].Goyal P, Vin H M. Start-time fair queuing: A scheduling algorithm for integrated services packet switching networks [J]. IEEE/ ACM Trans on Networking, 1997, 5(5): 690-703.
- [22].Zhang H, Service disciplines for guaranteed performance service in packet switching networks [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(10):1374-1396.
- [23].Demers A. Analysis and Simulation of a Fair Queuing Algorithm [C]. In Proceedings of ACM SIGCOMM. Austin, Texas, USA, 1989:1-12.
- [24].J Bennett, H Zhang. Hierarchical Packet Fair Queuing Algorithms, In Proceedings of ACM SIGCOMM, Palo Alto, CA, 1996: 143-156.
- [25].Lu Songwu, Nandogopal Thyagarajan, Bharghavan Vaduvur. A Wireless Fairness Service Algorithm for Packet Cellular Network [C]. ACM MOBICOM'98, Dallas, TX, 1998.
- [26].Eugene Ng T S, Stoica Ion, Zhang Hui, Packet Fair Queueing Algorithms for Wireless Networks with Location-dependent Errors [C]. IEEE INFOCOM'98, San Francisco, CA, USA, 1998, 3: 1103 - 1111.
- [27].Ramanathan P, Agrawal P. Adapting Packet Fairness Queueing Algorithms to Wireless Networks, ACM MOBICOM'98, Dallas, TX, 1998.
- [28].Golestani S J. A self-clocked fair queueing scheme for broadband applications [C]. IEEE INFOCOM'94, 1994, 2: 636-646.
- [29].Stiliadis D, Varma A. A general methodology for designing efficient traffic scheduling and shaping algorithm [C]. IEEE INFOCOM'97, 1997, 1: 326-332.
- [30].Viswanath P, Tse D, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [31].Agarwal M, Puri A. Base station scheduling of requests with fixed deadlines [C]. Proceedings of IEEE INFOCOM'02, 2002, 2: 487-496.
- [32].Bender P, Black P, Grob M, et al. CDMA/HDR: a bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users [C]. IEEE Communications Magazine, 2000, 38(7): 70-77.
- [33].Zhang Z, He Y, Chong E K P. Opportunistic downlink scheduling for Multiuser OFDM systems [C], WCNC'05, New Orleans, LA, 2005: 13-17.
- [34].IEEE-SA Standards Board. IEEE 802.16-2001, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems [S]. 2001.
- [35].IEEE-SA Standards Board. IEEE P802.16a/D3-2001, Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16: Air Interface for Fixed Wireless Access Systems-Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layers Specifications for 2-11GHz [S]. 2002.
- [36].IEEE-SA Standards Board. IEEE 802.16c-2002, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems-Amendment 1: Detailed System Profiles for 10-66 GHz [S]. 2002.
- [37].Bhagwat P, Bhattacharya P, Krishna A, et al. Enhancing throughput over wireless LANs using channel state dependent packet scheduling [C]. INFOCOM'96, 1996, 3: 1133-1140.
- [38].Zhao Z H, Zhang L F, Han L P, et al. An efficient real-time traffic scheduling algorithm in wireless networks [C]. IEEE CCECE 2003, 2003, 3:1543-1546.
- [39].Fattah H, Leung C. An efficient scheduling algorithm for packet cellular networks [C]. IEEE 56th VTC 2002-Fall, 2002, 4: 2419- 2423.
- [40].Wang K C, Chin Y L. A fair scheduling algorithm with adaptive compensation in wireless networks [C]. IEEE GLOBECOM'01, 2001, 6: 3543- 3547.
- [41].Lee S, Kim K, Ahmad A. Channel error and handoff compensation scheme for fair queueing

- algorithms in wireless networks [C]. ICC'02, 2002, 5: 3128-3132.
- [42]. Cao Y X, Li V O K. Wireless packet scheduling for two-state link models [C]. IEEE GLOBECOM'02, 2002, 1: 819- 823.
- [43]. Liu X, Chong E K P, Shroff N B. Transmission scheduling for efficient wireless utilization [C]. IEEE INFOCOM'01, 2001, 2: 776-785.
- [44]. Liu X, Chong E K P, Shroff N B. Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(10): 2053-2064.
- [45]. Liu X, Chong E K P, Shroff N B. Transmission scheduling for efficient wireless resource utilization with minimum-performance guarantees [C]. IEEE 54th VTC 2001-Fall, 2001, 2: 824- 828.
- [46]. Liu Y H, Gruhl S, Knightly E W. WCFQ: an opportunistic wireless scheduler with statistical fairness bounds [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(5): 1017-1028.
- [47]. Liu P J, Berry R, M. Honig L. Delay-sensitive packet scheduling in wireless networks [C]. IEEE WCNC'03, 2003, 3: 1627-1632.
- [48]. ISO/IEC 14496-2, Coding of audiovisual objects, Part 2: Visual [S]. 2004.
- [49]. Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation [J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [50]. Rhee Wonjong, Cioffi M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation [C]. IEEE VTC'00, 2000, 2:1085-1089.
- [51]. Chee T K, Lim Cheng-Chew, Choi J. Sub-optimal power allocation for downlink OFDMA systems [C]. IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004, 3: 2015-2019.
- [52]. Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems [J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 1995, 13(7): 1341-1347.
- [53]. Sung C W, Leung K K. A Generalized Framework for Distributed Power [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2005, 51(7): 2625-2635.
- [54]. Leung K K, Sung C W, Wong W S. Convergence theorem for a general class of power-control algorithms [J]. IEEE Trans. Commun. 2004, 52(9):1566-1574.
- [55]. Boche H, Stanczak S. Convexity of some feasible QoS regions and asymptotic behavior of the minimum total power in CDMA systems [J]. IEEE Trans. Commun. 2004, 52(12): 2190-2197.
- [56]. Foschini G J, Miljanic Z. A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1993, 42(4): 641-646.
- [57]. Aldajani M A, Sayed A H. Adaptive predictive power control for the uplink channel in DS-CDMA cellular systems [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 2003, 52(6):1447-1462.
- [58]. Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 1992, 41(1):57-62.
- [59]. Zander J, Frodigh M. Comment on "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems" [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 1994, 43(3): 636.
- [60]. Wu Qiang. Performance of optimum transmitter power control in CDMA cellular mobile systems [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 1999, 48(2):571-575.
- [61]. Grandhi S A, Vijayan R, Goodman D J, et al. Centralized power control in cellular radio systems [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 1993, 42(4): 466-468.
- [62]. Zander J. Distributed Cochannel Interference Control in Cellular Radio Systems [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 1993, 41(3): 305-311.
- [63]. Jantti R, Kim S L. Second-order power control with asymptotically fast convergence [J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 2000, 18(3):447-457.

- [64]. Hughes-Hartogs D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media [P]. U.S. Patents Nos. 4679227, July 1987; 4731816, Mar. 1988; and 4833796, May 1989.
- [65]. Czylik A. Adaptive OFDM for wideband radio channels [C]. IEEE GLOBECOM'96, London, 1996, 1: 713-718.
- [66]. Sonalkar R, Shively R. An efficient bit-loading algorithm for DMT applications [C]. IEEE GLOBECOM'98, 1998, 5: 2683-2688.
- [67]. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services [J]. IEEE Trans. Veh. Technol. 1980, 29(3):317-325.
- [68]. Erceg V, et al, An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments [J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 1999, 17(7): 1205-1211.
- [69]. IEEE 802.16-03/01. Channel Models for Fixed Wireless Applications [EB/OL]. <http://ieee802.org/16>, 2003-06-27.
- [70]. Yahong R, Xiao Chengshan. Improved Models for the Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms [J]. IEEE Communications Letters, 2002, 6(6):256-258.
- [71]. Wang I J, Chong E K P, Kulkarni S R. Weighted averaging and stochastic approximation [J]. Math. Contr. Signals Syst., 1997, 1(10): 41-60.
- [72]. Liu Xin. Opportunistic Scheduling in Wireless Communication Networks [D]. Ph.D. dissertation, Purdue University, 2002: 99-110.
- [73]. Peha J M, Tobagi F A. A Cost-Based Scheduling Algorithm to Support Integrated Services [C]. IEEE INFOCOM'91, 1991, 2:741-753.
- [74]. Lee Jang-Won, Mazumdar R R, Shroff N B. Downlink Power Allocation for Multi-Class Wireless Systems [J]. IEEE Trans. Networking, 2005, 4(13): 854-867.
- [75]. Xergias S A, Passas N, Merakos L. Flexible Resource Allocation in IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Networks [C]. LANMAN 2005-Sept, Island of Crete, 2005: 1-6.
- [76]. Cardei Mihaela, Cardei Lonut, Du Ding-zhu, Resource Management in Wireless Networking [M]. Boston: Springer Science + Business Media, 2005.
- [77]. Fong B, Ansari N, Fong A C M, Hong G Y. On the scalability of fixed broadband wireless access network deployment [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(9): S12 - S18.
- [78]. Lee Howon, Kwon Taesoo, Cho Dong-Ho. An enhanced uplink scheduling algorithm based on voice activity for VoIP services in IEEE 802.16d/e system [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(8): 691-693.
- [79]. Caire G, Taricco G, Biglieri E. Optimum power control over fading channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(5): 1468-1489.
- [80]. Ligdas P, Farvadin N. Optimizing the transmit power for slow fading channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 565-576.
- [81]. Krongold B S, Ramchandran K, Jones D L. Computationally efficient optimal power allocation algorithms for multicarrier communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(1): 23-27.
- [82]. Goldsmith A J, Chua Soon-Ghee. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [83]. Uysal-Biyikoglu E, Prabhakar B E, Gamal A. Energy-efficient packet transmission over a wireless link [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(4): 487-499.
- [84]. Wang Neng; Blostein S D. Comparison of CP-based single carrier and OFDM with power allocation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(3): 391-394.
- [85]. Chen Yung-Fang, Chen Jean-Wei, Li Chih-Peng. A real-time joint subcarrier, bit, and power

- allocation scheme for multiuser OFDM-based systems [C]. IEEE 59th VTC'04, 2004, 3: 1826-1830.
- [86]. Love D J, Heath R. OFDM power loading using limited feedback [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(5): 1773-1780.
- [87]. Yao Yingwei, Giannakis G B. Rate-maximizing power allocation in OFDM based on partial channel knowledge [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(3): 1073-1083.
- [88]. Olfat M, Farrokhi F R, Liu K J R. Power allocation for OFDM using adaptive beamforming over wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(3): 505-514.
- [89]. Song G, Li Y. Adaptive resource allocation based on utility optimization in OFDM [C]. IEEE GLOBECOM '03, 2003, 2:586-590.
- [90]. 王文博, 张金文. OPNET Modeler 与网络仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社. 2003.
- [91]. 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社. 2004.