

申请上海交通大学硕士学位论文

无线网络的机会多播调度算法研究

学 校：上海交通大学

院 系：电子信息与电气工程学院

班 级：B0903494

学 号：1090349087

硕士生：刘伟

专 业：通信与信息系统

导 师：王新兵(副教授)

上海交通大学电子信息与电气工程学院

2011 年 12 月



上海交通大学  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

**A Thesis Submitted to Shanghai Jiao Tong University for the Degree  
of Master of Science**

**Opportunistic Multicast Scheduling With Resource  
Fairness Constraints in Cellular Networks**

**Author:** Wei Liu

**Specialty:** Communication and Information System

**Advisor:** Prof. Xinbing Wang

School of Electronic, Information and Electrical Engineering

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R.China

December, 2011



## 摘要

随着人类对无线通信需求的日益增加，以无线通信方式提供多媒体服务越来越受到关注，手机电视以及可视电话会议等应用将在未来几年得到普及。对于高速率和高服务质量的多媒体传输，单播已经不能满足要求。多播模式因其可将相同的数据内容发送给小区中的多个用户，避免了重复传输大量相同数据而造成的空中接口拥塞，极大地提高整个网络的资源利用率。因此，多播传输方式正日益成为多点无线通信中采用的传输方式。

为了满足高速增长的多媒体业务对网络带宽和服务质量提出的更高要求，通信系统开始广泛采用了机会通信理论，其下行（前向）链路均主要基于时分复用方式，通过自适应调制和编码技术使得数据传输速率与信道质量相匹配，并且使用调度机制将下行链路的时隙在各个用户之间进行分配，从共享同一无线信道的多个用户中选择一个当前信道质量最好的用户发送数据，使得每个时隙都可以达到最高的用户数据速率和系统吞吐量。这种调度方式由于在为用户分配时隙时利用了机会通信的思想，因而被称为“机会调度”。本文主要研究基于比例公平原则的机会多播调度算法。

本文介绍了机会多播调度理论和相关研究，提出了一种基于比例公平原则的机会多播调度算法，并且证明了该算法的最优性质和机会性质，最后给出了该机会多播调度算法的仿真结果。该算法提出的机会多播调度原则选择比多播组中用户要求的最低速率略高一些的速率作为传输速率，每个多播组的最优传输速率是基于比例公平原则，根据多播用户当前的信道数据速率和吞吐量来选择的，从而实现多播用户吞吐量和公平

性的平衡。该算法在保证多播用户间的公平性的同时充分利用时变信道条件来更有效地使用整个系统的频谱资源，最大化多播系统的吞吐量。最后讨论了机会多播调度应用设计和实现问题，提供一种基于比例公平原则的基站多播业务调度装置及其调度方法，基于比例公平原则选择多播组中归一化速率较高的部分用户作为考虑对象来确定传输速率，然后选择累计速率最大的多播组进行传输。

**关键词：**机会多播调度，比例公平，多播调度算法

## ABSTRACT

Multicast is emerging as an important means of transmitting the same content to multiple receivers so as to efficiently utilize the overall network resources. Being motivated by recent advances in erasure codes and fountain codes, opportunistic multicast scheduling algorithms have been proposed recently to better balance the tradeoff between multi-user diversity and the multicast gain. The data-rate that each user can support varies during different time slots, the opportunistic multicast scheduling algorithms select a different multicast group for transmission in each time slot at a rate supported by the worst user in the selected group. While opportunistic multicast scheduling imposes some new challenges in terms of fairness, not only among different multicast groups, but also among users that belong to the same multicast group.

Designing multi-user scheduling algorithms is a very challenging problem in wireless networks. Due to the time-varying and user-dependent nature of channel conditions, scheduling algorithms need to dynamically allocate resources based on both the channel states and the user demands to achieve higher utilization of wireless resources. Opportunistic scheduling has recently emerged as a promising technique for providing highrate data services in cellular data networks. Opportunistic scheduling can effectively increase network throughput by exploiting multi-user diversity inherent in wireless networks. However, the potential to exploit higher data throughput in an opportunistic way also introduces an important issue between resource efficiency and fairness tradeoff among different users.

In this paper, we propose an opportunistic multicast scheduling algorithm that maximizes the overall network throughput by exploiting time-varying channel conditions while taking into account the resource

fairness constraints among all groups. The optimum transmission rate for each group is selected based on the current channel data rate and average received throughput of each user to achieve the best tradeoff between throughput and fairness. We then prove the optimality of the multicast scheduling algorithm and show that our algorithm does not deteriorate any group's performance to improve the overall network throughput compared with the non-opportunistic scheduling algorithm. Through extensive simulations we demonstrate that the proposed opportunistic multicast scheduling algorithm improves network resource efficiency under fairness constraints.

**Keywords:** Opportunistic Multicast Scheduling, Proportional Fairness, Multicast Scheduling Algorithm

## 目 录

无线网络的机会多播调度算法研究 .....	1
摘 要.....	I
ABSTRACT .....	III
缩略语表.....	VII
<b>第一章 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究意义 .....	2
1.3 本文研究内容 .....	3
1.4 本文结构安排 .....	3
<b>第二章 机会调度理论研究 .....</b>	<b>5</b>
2.1 引言 .....	5
2.2 机会调度理论模型及性能指标 .....	6
2.3 机会调度算法分类 .....	7
2.4 比例公平调度算法 .....	8
2.4.1 分组级模型.....	8
2.4.2 无限积压业务模型下的公平性分析.....	10
2.4.3 流级模型下服务性能分析.....	11
2.5 本章小结 .....	13
<b>第三章 基于公平原则的机会多播调度算法研究.....</b>	<b>14</b>
3.1 引言 .....	14
3.2 多播调度系统模型 .....	15
3.2.1 系统概述.....	16
3.2.2 自适应技术.....	17
3.2.3 喷泉码.....	18
3.3 现有机会多播调度算法分析 .....	19
3.3.1 固定速率轮询调度算法.....	19

3.3.2 IPF 算法.....	20
3.3.3 MPF 算法.....	22
3.3.4 纠错编码的多播调度.....	23
3.4 机会多播调度 (OMS) 算法.....	24
3.4.1 优化问题.....	25
3.4.2 机会多播调度的最优性质.....	28
3.4.3 机会调度算法的机会性质.....	30
3.5 仿真实验.....	32
3.6 本章小结.....	36
<b>第四章 机会多播调度应用设计.....</b>	<b>37</b>
4.1 引言.....	37
4.2 应用设计.....	38
4.3 机会多播调度.....	41
4.6 本章小结.....	45
<b>第五章 总结与展望.....</b>	<b>47</b>
<b>参 考 文 献.....</b>	<b>48</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>50</b>
<b>攻读硕士学位期间已发表或录用的论文.....</b>	<b>51</b>

## 缩略语表

AMC	Adaptive Modulate and Coding	自适应调制编码
BCMCS	Broadcast Multicast Service	广播多播业务
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
CQI	Channel Quality Indicator	信道质量指示
DRC	Data Rate Control	数据速率控制
EV-DO	Evolution-Data Only	演化全数据
FR	Fixed Rate	固定速率
HDR	High Data Rate	高数据速率
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access	高速数据分组接入
IPF	Inter-group Proportional Fair	组间比例公平
LT	Luby Transform	路比变换
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service	多媒体广播多播业务
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制编码方案
MPF	Multicast Proportional Fair	多播比例公平
OMS	Opportunistic Multicast Scheduling	机会多播调度
PF	Proportional Fairness	比例公平
PTP	Point to Point	点对点
QoS	Quality of Service	服务质量
RR	Round Robin	轮询
TDM	Time Division Multiple	时分复用
UE	User Equipment	用户设备
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	通用移动通信服务
3G	3 <sup>rd</sup> Generation	第三代
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partner Project	第三代合作伙伴计划

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

随着信息社会的快速发展,人们不再满足于简单的无线通信服务,而是希望在任何时候任何地点都能借助各种各样的终端设备接入丰富多彩的移动互联网,为自己的生活、工作和娱乐带来巨大的价值和便利。这个需求极大的推动了无线通信技术的发展和 innovation。经过无数无线通信领域研究者的努力,无线通信系统从最初的模拟系统发展到了数字系统,从窄带通信发展到了宽带通信,从单纯的语音业务发展到了数以万计的数据业务,尤其是多媒体无线通信业务的发展非常迅速。

随着移动用户对多媒体业务,比如视频剪辑、新闻资讯、天气预报等应用需求的增长,无线通信系统正逐渐向提供高速分组数据业务的方向发展。多媒体广播多播业务(Multimedia Broadcast Multicast Service, MBMS)的出现,使得向大量用户提供多媒体业务成为现实。MBMS 可以同时向大量用户传送相同的业务,其最大优点在于取代了原有多路单播及点对点(Point to Point, PTP)的连接模式而采用多播的传输模式。多播模式因其可将相同的数据内容发送给小区中的多个用户,避免了重复传输大量相同数据而造成的空中接口拥塞,极大地提高整个网络的资源利用率。因此,多播传输方式正日益成为多点无线通信中采用的传输方式。3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partner Project) 组织提出了支持多播方式的多媒体业务 MBMS (多媒体广播多播业务), 3GPP2 组织也提出了对应的广播多播业务 BCMCS (Broadcast Multicast Service) [1][2]。

传统的多播调度方法将传输速率固定在系统的默认速率值并且在所有多播组中进行轮询调度。系统的默认传输速率一般设置为最低的传输速率,即处于小区最边缘的用户能够处理的传输速率。现行的 CDMA2000 1xEV-DO (Evolution-Data Only) [4][5] 系统就是采用这种方式。这种策略在一定程度上保证了不同用户的公平性,但是这种策略无法充分利用不同用户的信道条件,尤其是那些靠近基站信道条件较好的用户。

为了满足高速增长的多媒体业务对网络带宽和服务质量（Quality of Service, QoS）提出了的更高要求，3GPP 和 3GPP2 两大阵营分别推出了 UMTS（Universal Mobile Telecommunication System）HSDPA（High-Speed Downlink Packet Access）<sup>[3]</sup> 和 CDMA2000（Code Division Multiple Access2000）1xEV-DO<sup>[4]</sup>两种空中接口标准，使得移动互联网用户可以在蜂窝系统中得到较高的数据速率。这两种系统都采用了机会通信理论，其下行（前向）链路均主要基于时分复用方式，通过自适应调制和编码技术使得数据传输速率与信道质量相匹配，并且使用调度机制将下行链路的时隙在各个用户之间进行分配，从共享同一无线信道的多个用户中选择一个当前信道质量最好的用户发送数据，使得每个时隙都可以达到最高的用户数据速率和系统吞吐量。这种调度方式由于在为用户分配时隙时利用了机会通信的思想，因而被称为“机会调度”。

机会调度通过基站端的控制参数更新模块和调度器协作完成。假设反馈信道理想，所有用户的信道信息都反馈给基站端的机会调度器，调度器在每个时隙根据反馈的信道信息和公平性控制参数决定该时隙每个用户使用哪些子载波。某时隙的调度结果影响到公平性控制参数的更新，从而对下个时隙的调度产生影响。公平性是无线通信系统中调度算法的核心问题，好的调度算法应该能够在保证用户之间公平性的同时，充分利用信道时变特性，最大化系统的吞吐量。基于时分系统的效用公平性是要求每个用户的平均效用占系统总效用的一定比例，是一种常见的公平性原则。

## 1.2 研究意义

合理的机会调度算法不仅需要考虑最大化系统的吞吐量，还要在保证无线通信系统稳定性和用户服务质量要求的同时兼顾公平性。为应用机会调度算法，无线数据网络系统需要满足一定的条件：终端用户需要测量无线信道的状态并反馈给调度器；调度器需要及时进行调度，以适应无线信道状态的不断变化。第三代和下一代无线蜂窝网络系统已经能够满足这些条件，第三代移动通信系统的 3GPP 组织和 3GPP2 组织分别推出了 UMTS HSDPA<sup>[3]</sup>标准和 CDMA2000 1xEV-DO<sup>[4]</sup>标准，在这两种标准中都采用了机会调度算法。文中提到的比例公平调度算法是比较典型的机会调度算法。该算法能够较好地提高系统吞吐量，但在公平性，满足用户服务质量要求等方面还存在一些不足。为此，本文提出了一种基于比例公平原则的机会调度算法，在兼顾用户的服务质量要求同时，能够保证用户间的公平性，最大化系统的的吞吐量。

如果基站的数据传输速率高于用户设备当前时刻能够支持的最大传输速率，则用

户设备将无法接收到任何传输数据。由于同一多播组中的所有用户受限于基站选择的同一速率，因此基站对速率的选择与基站对多播组选择同等重要。如果基站选择较高的传输速率，则多播组中许多用户将无法接收到传输数据；如果基站选择较低的传输速率，则不能充分利用支持高传输速率的用户的信道条件。因此，对于多播传输方式而言，基站调度必须在系统的吞吐量和用户的公平性两个方面取得折中，因此基站多播调度的核心在于选择合适的多播组以及选择合适的传输速率。为此，本文将提出具体的选择多播组和多播组最优传输速率的算法。本文提出的基于比例公平原则的多播调度算法，选择比多播组中用户要求的最低速率略高一些的速率作为传输速率，在考虑比例公平原则基础上，在保证信道条件差的用户接收到基本的服务水平的前提下，使信道条件较好的用户接收到质量更高的数据服务。

### 1.3 本文研究内容

本文针对基于公平原则的无线网络多播调度算法进行了深入的研究，主要研究内容如下：

- (1) 阅读了大量国外无线网络调度领域的科技文献，重点学习了其中多播调度和基于比例公平原则的机会调度方面的内容，总结概括了当前多播机会调度算法、基于比例公平原则的机会调度算法的思想，并对这些算法的性能进行了分析和讨论。
- (2) 为保证多播用户间的公平性，最大化多播系统的吞吐率，本文分析了多播调度中用户间公平性问题，然后针对多播调度场景进行了算法的改进，提出了一种基于比例公平原则的多播机会调度算法。
- (3) 基于比例公平原则，根据多播用户当前的信道数据速率和吞吐率来选择每组的最优传输速率，从而实现多播用户吞吐率和公平性的平衡。本文证明了提出的基于比例公平原则的多播机会调度算法是对应优化目标函数的最优解并且给出了该调度算法的性质。

### 1.4 本文结构安排

本文共分五章，具体章节内容的安排如下：

第一章为绪论，介绍了本文研究的背景和意义，并说明了研究内容和全文安排。

第二章概述了机会调度理论模型及性能指标、机会调度算法分类以及比例公平调度算法，主要介绍机会多播调度的背景理论。

第三章介绍了基于公平原则的无线网络机会多播调度算法研究。首先介绍了多播调度系统模型，讨论了多播系统、自适应和喷泉码关键技术。然后列举了现有的几种典型的机会多播调度算法，分析了它们的优缺点。接着提出了一种基于比例公平原则的机会多播调度算法，并且证明了该算法的最优性质和机会性质。最后给出了该机会多播调度算法的仿真结果。

第四章讨论了机会多播调度应用设计和实现问题，首先介绍了机会多播调度的要求和现有典型系统方案。然后主要阐述了提出的基站多播业务调度装置的设计和实现细节，包括用户信息收集处理模块、多播组速率计算模块、多播组调度传输模块和吞吐量更新模块，着重讨论了基于上述系统的调度方法的实现过程。

第五章，对本文做了一个总结，并对课题的前景进行了展望。

## 第二章 机会调度理论研究

### 2.1 引言

无线通信的基本特征之一是无线衰落信道的质量随时间发生随机变化。对无线衰落信道中通信理论的研究可以追溯到上世纪 60 年代。一直以来，信道衰落都被视为一种导致不可靠传输的消极因素，需要通过分集和功率控制等技术进行补偿。然而，自从上世纪 90 年代以来，在利用信息论对衰落信道容量进行研究的过程中，无线通信学术界对无线信道衰落这一客观物理现象产生了一种全新的认识：衰落所引起的信道质量的随机变化可以作为一种机会被加以利用，即只有在信道质量变化到最佳状态时才发送信息，从而使衰落信道的容量得到大幅度的提高，甚至会超过无衰落信道的容量<sup>[10][11]</sup>。这种机会通信方式主要应用于多用户环境下，由于各个用户信道质量的随机变化相互独立，不同用户在同一时刻的信道质量不同，因而用户数目越多则任一时刻存在某用户信道质量处于最佳状态的概率越大，这种现象被称为多用户分集效应<sup>[12]</sup>。

为了满足高速增长的数据业务和多媒体应用对网络带宽和服务质量(Quality of Service: QoS)提出的更高要求，第三代移动通信系统(3rd Generation: 3G)的 3GPP 和 3GPP2 两大阵营分别推出了 UMTS HSDPA<sup>[3]</sup>和 CDMA2000 1xEV-DO<sup>[4]</sup>两种空中接口标准，使得移动互联网用户可以在蜂窝系统中得到较高的数据速率。这两种系统都采用了机会通信理论，其下行(前向)链路均主要基于时分复用方式，通过自适应调制和编码技术使得数据传输速率与信道质量相匹配，并且使用调度机制将下行链路的时隙在各个用户之间进行分配，从共享同一无线信道的多个用户中选择一个当前信道质量最好的用户发送数据，使得每个时隙都可以达到最高的用户数据速率和系统吞吐量。这种调度方式由于在为用户分配时隙时利用了机会通信的思想，因而被称为“机会调度”。合理的机会调度算法不仅需要考虑最大化系统的吞吐量，还要兼顾公平性，稳定性和用户服务质量要求等。

与有线环境下的分组调度相比，无线信道的时变特性加大了机会调度算法设计和评价的难度。近年来对机会调度算法的研究很多，然后不同的研究往往关注不同的性

能指标,并且采用不同的模型进行性能评价,使得不同算法之间很难直接进行性能比较。因此,本章将现有各种用于机会调度算法研究的理论模型归纳分类,介绍和比较几种典型的机会调度算法在各类理论模型下的性能评价方法和结果,通过以上归纳、分析和比较,对该领域有进一步研究,并且提出本文的主要研究方向和可以采用的理论工具。

## 2.2 机会调度理论模型及性能指标

目前研究机会调度算法的理论模型大体可以分为以 Andrew 等为代表进行研究的分组级模型(packet-level model)<sup>[13]</sup>和以 Borst 和 Bonald 等为代表进行研究的流级模型(flow-level model)。本小节对这两种模型进行概述和比较,在下面章节中将进行详细讨论。

分组级模型的时间规模为调度算法工作的频率,其业务模型通常假设用户数目静态固定,即不会有新用户加入,也不会有用户由于业务完成而离开。分组级业务模型可以分为无限积压业务和分组级动态到达两种。在无限积压业务模型中,每个用户总是具有可发送的数据;在分组级动态到达模型中,调度器在每个时隙接收到各个用户到达的数据量是有限的。就服务器模型而言,各个用户的分组级服务速率等于各自信道的瞬时传输速率,它们由于信道质量的波动而随时间发生相互独立的随机变化,根据对信道衰落过程的不同假设,分组级模型中常用的服务器模型可以分为两类:一类信道传输速率根据平稳随机过程产生,另一类信道传输速率通过敌人模型产生。

流级模型的时间规模为业务到达和离开的频率。流级业务模型假设每个用户具有一定量的业务,用户数据会随着业务的开始和完成而发生动态变化。各个用户的流级服务速率根据流体模型(fluid model)对信道速率进行时间平均后不随时间变化。在流级模型中,一般只能对平稳信道模型进行研究,而且有时还根据所有用户的信道速率统计变化幅度是否独立同分布,将平稳信道模型进一步细分为对称和不对称两种。

利用分组级和流级模型对机会调度算法进行性能分析各有利弊。分组级业务模型对于分组级的时间规范而言是合理的,但却无法描述流级动态,因而流级业务模型能够更准确的反映实际业务状况。另一方面,分组级服务器模型能够描述更复杂的无线信道特性(通过敌人模型等),而且流级模型的服务速率等于信道速率的时间平均值,这只有在信道速率的变化频率远大于业务到达和离开频率时才足够准确,而此条件在用户移动速度较慢时很可能无法满足。机会调度算法在流级模型中可以等效为速率分配。考虑到实际信道的时变特性,本文主要采用分组级调度算法进行性能分析。

评价机会调度算法的好坏除了需要考虑有线环境下分组调度算法的常用性能指标,如公平性和 QoS 保障等,还包括有效性和稳定性两个重要方面。在有线环境下,任何工作保持调度算法都具有相同的有效性,即吞吐量。然后,无线衰落信道的时变特性导致不同调度算法所能达到的系统吞吐量可能有很大差别。公平性和有效性是机会调度算法设计中非常重要的性能指标。

对于机会调度算法而言,实现公平性和有效性的合理折中是一个非常重要的问题。调度算法应该能够充分利用信道变化过程中的峰值速率,在一个用户的当前信道质量优于其平均值的时隙选择为该用户服务。另一方面,调度算法还需要考虑公平性从而不会“饿死”信道质量较差的用户。在无线网络中,信道的时变特性导致对“公平性”可以有两种不同的解释:时间公平性和吞吐量公平性。前者是指令所有用户得到相同的服务时间;后者是指令所有用户发送的数据量相同。

关于公平性和有效性的合理折中在有线网络拥塞控制问题中得到了广泛的研究,提出了包括最大最小公平(max-min fairness)和比例公平(proportional fairness)等多种公平性准则。最大最小公平是指是对某一用户服务速率分配量的增加不会引起其它用户(这些用户的分配量已经同该用户一样,或者更小)服务速率分配量下降的情况下最大化该用户的服务速率分配量。在如蜂窝系统这样的单瓶颈网络中,最大最小公平会导致所有用户分配到的服务速率相目,因而它是一种优先考虑公平性的准则。Mazumdar 等指出从博弈理论的角度而言,最大最小公平性准则不如利用纳什交易解(Nash bargaining solution)更能准确描述公平的含义<sup>[8]</sup>。以比例公平准则为代表的一类效用公平准则就是根据上述思想试图找到一个效用函数,并通过优化各个用户服务速率的效用函数之和得到公平性和有效性之间的合理折中。例如,比例公平准则的效用函数为对数最大最小公平是效用公平的一种极限情况。由于无线信道的时变性,对机会调度算法效用公平的分析一般采用随机近似方法等。

最大最小公平是有线环境下调度算法最常用的公平性准则,而在无线机会调度算法的研究中,最大最小公平准则一般用于衡量时间公平性,而以比例公平为代表的效用公平准则一般用于衡量吞吐量公平性。目前已有研究成果表明,时间的最大最小公平与吞吐量的比例公平之间具有一定的等效关系<sup>[9]</sup>。

## 2.3 机会调度算法分类

由于无线网络机会调度在本质上与有线环境下的分组调度相同,因此对分组调度算法的各种分类标准对机会调度算法都适用。然而,根据机会调度的特点和目标,本

文将各种机会调度算法分为贪婪算法、效用公平算法、时间公平算法和队列感知算法等。

贪婪算法是最简单和基本的机会调度算法，它在每个时隙都选择瞬时信道质量最好的用户发送数据，因而能够达到最大的系统吞吐量，但却忽略了算法的公平性、稳定性和 QoS 保障。效用公平和时间公平算法是以效用公平性和时间公平性作为目标的机会调度算法。轮询算法是最简单的时间公平调度算法，但它完全不考虑用户信道状态，与贪婪算法分别代表最大化公平性和有效性的两种极端情况。在第 2.4 小节中详细介绍的比例公平调度算法能够在公平性和有效性之间实现较为合理的折中，是一种效用公平算法，目前在实际系统中被广泛采用。在对称平稳信道模型下比例公平调度算法也具有长期时间公平性。以上机会调度算法在决策时只考虑了信道状态，因而又称为信道感知调度算法。与此相对应，一类同时考虑信道状态和队列状态的机会调度算法被称为队列感知调度算法。

## 2.4 比例公平调度算法

比例公平调度算法能够在公平性和有效性之间实现较为合理的折中，是一种效用公平算法，目前在实际系统中被广泛采用。不同理论模型对业务和信道过程的假设以及所关注的性能指标往往不同，本小节对比例公平调度算法在不同模型下的性能进行分析和评价。

### 2.4.1 分组级模型

假设在一个无线小区内  $n$  个移动数据用户需要由同一个基站进行服务。由于网页浏览等业务的主要数据流都只占用下行链路，因此这里只考虑下行(基站到移动台)方向。基站为每个移动用户的数据维护一个单独的队列。时间被划分为时隙，并且基站在每个时隙只能为一个用户传送数据。为了确定在某一时隙内被服务的用户，基站在所有时隙维护一个向量  $(r_0(t), \dots, r_{n-1}(t))$ ，其中  $r_i(t)$  代表在时隙  $t$  可以为用户  $i$  传送的数据量。在 CDMA 1x EV-DO 系统中，移动用户  $i$  在每个时隙测量由基站发送的导频信号强度，并根据信号的强度计算基站和自身之间的信道质量并确定基站为实现低误码率应发送的速率大小。最后，用户通过一个控制消息将此速率值告知基站，从而使位于基站端的调度器获得  $r_i(t)$  的值。

机会调度问题的正式描述如下：调度器在每个时隙接收到信道速率向量  $(r_0(t), \dots, r_{n-1}(t))$ ，并据此确定在该时隙接受服务的用户。如果用户  $i$  被选择，则从用户  $i$  的队列中发送  $r_i(t)$  比特数据。

不同的模型对业务到达过程以及基站和用户之间的信道过程的假设不同。通常考虑的业务模型可以分为两类：无限积压业务（infinite backlog）模型和分组级动态到达模型。

(1) 无限积压业务模型：每个用户总是具有可发送的数据。由于实际中并不存在这样的到达过程，考虑队列长度和时延等指标小具有太大的意义。这种模型中的优化目标一般为最大化某个关于用户可达吞吐量的函数。例如，设  $T_i$  代表用户  $i$  的长期吞吐量，则一个常见的目标为优化比例公平指标  $\sum_i \log T_i$ 。

(2) 分组级动态到达模型：调度器在每个时隙接收到一个向量  $(a_0(t), \dots, a_{n-1}(t))$ ，其中  $a_i(t)$  代表用户  $i$  在时隙  $t$  到达的数据量。在此情况下，除了吞吐量之外，队列大小与时延也具有意义。任何调度算法的一个基本目标为稳定性。

信道过程模型也可以分为两类：一类信道速率根据平稳随机过程产生，另一类信道速率通过敌人模型产生。

(1) 平稳信道过程：信道速率根据平稳随机过程产生，假设信道状态为一个有限集合  $M = \{1, \dots, M\}$ 。每个状态  $m \in M$  对应一组信道速率  $(\mu_1^m, \dots, \mu_n^m)$ ，每个信道速率  $\mu_i^m$  代表如果在时隙  $t$  内信道状态为  $m$ ，将此时隙全部分配给用户  $i$  可以发送的比特数目。信道在  $t$  时刻所处状态是一个随机过程，具体而言是一个具有  $M$  个有限状态的遍历马尔可夫链。当  $m(t) = m$  时，信道速率向量为  $r_i(t) = \mu_i^m$ 。在此模型中，目标一般为得到某种指标的“最优化”调度规则。

(2) 敌人信道过程：假设信道过程不满足平稳性。在每个时隙  $t$  内，信道速率向量  $(r_0(t), \dots, r_{n-1}(t))$  可以是由敌人定义的任何向量，而敌人试图为调度算法设计设置最多的麻烦。在敌人模型下，由于在某一速率向量下的最优化调度算法可能随着时间发生变化，因此通常假设在每个时隙敌人具有自己的调度算法，可以与信道速率向量相结合产生最好的性能。因此，在此类模型下，优化的目标是与敌人的调度算法尽可能

的接近。

#### 2.4.2 无限积压业务模型下的公平性分析

无限积压业务模型假设所有用户总是具有待发送的数据，并且信道速率由一个平稳随机过程产生。由此模型产生了最为广泛使用的机会调度算法，即由 David Tse 提出的比例公平调度算法<sup>[14]</sup>。在每个时隙，比例公平调度算法为满足下面条件的用户  $j$  服务：

$$j = \arg \max_i \frac{r_i(t)}{R_i(t)} \quad (2-1)$$

其中  $R_i(t)$  为时刻  $t$  的指数过滤平均服务速率值 (exponentially filtered average service rate)，它根据下面的公式进行更新：

$$R_i(t+1) = \begin{cases} (1-\tau)R_i(t) + \tau r_i(t), & \text{if } i = j \\ (1-\tau)R_i(t), & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (2-2)$$

其中  $\tau$  为时间常数 (实际中  $\tau$  通常取 1000 倍时隙的数量值)。比例公平算法给予具有较高瞬时信道速率值 ( $r_i(t)$ ) 和较低当前平均服务速率值  $R_i(t)$  的用户较高的优先级。

比例公平调度算法具有一个很好的理论特点：对于所有可能的调度规则，它最大化比例公平指标  $\sum_i \log R_i$  的值，其中  $R_i = \lim_{t \rightarrow \infty} R_i(t)$  为用户  $i$  的长期平均服务速率。之所以将  $\sum_i \log R_i$  称为比例公平指标，是由于如果  $(R_0^*, \dots, R_{n-1}^*)$  是最大化  $\sum_i \log R_i$  的可行速率向量，

则对于任意其他的速率向量  $((R_0^*, \dots, R_{n-1}^*))$ ，公式  $\sum_{i=0}^{n-1} (R_i - R_i^*)/R_i^* < 0$  总是成立，

即所有用户的相对服务速率改变值之和为负。其中用户  $i$  的相对服务速率改变值等于用户  $i$  的服务速率改变值  $(R_i - R_i^*)$  除以用户  $i$  的原有服务速率值  $R_i^*$ 。另一种对比例公平指标的解释是，将某一用户的速率乘以一个因子  $c$  与将另一用户的速率乘以一个因子  $c$  对优化目标的影响相同。最后，注意到使用  $\sum_i \log R_i$  作为指标可以保证不会完全“饿死”任何用户，这是由于  $\log 0 = -\infty$ 。

由式 (2-1) 和式 (2-2) 的调度算法可以实现对比例公平指标  $\sum_i \log R_i$  的优化, 下面给出不严格的证明。

令  $S(t) = \sum_i \log R_i(t)$ , 则  $(\nabla S)(t) = (\frac{1}{R_0(t)}, \dots, \frac{1}{R_{n-1}(t)})$ 。假设在时隙  $t$  选择用户  $j$  接收

服务, 则根据式 ( ) 可以得到:

$$\begin{aligned} & \sum_i \log R_i(t+1) - \sum_i \log R_i(t) \\ & \approx (\nabla S)(t) \bullet (R_0(t+1) - R_0(t), \dots, R_{n-1}(t+1) - R_{n-1}(t)) \\ & = \left( \frac{1}{R_0(t)}, \dots, \frac{1}{R_{n-1}(t)} \right) \bullet (R_0(t+1) - R_0(t), \dots, R_{n-1}(t+1) - R_{n-1}(t)) \quad (2-3) \\ & = \left( \frac{1}{R_0(t)}, \dots, \frac{1}{R_{n-1}(t)} \right) \bullet (-\tau R_0(t), \dots, -\tau r_j(t) - \tau R_j(t), \dots, -\tau R_{n-1}(t)) \\ & = \frac{\tau r_j(t)}{R_j(t)} - \tau n \end{aligned}$$

因此, 为了最大化  $\sum_i \log R_i(t)$  的变化值, 应该选择能够使得  $r_j(t) / R_j(t)$  最大化的用户。而这正是式 (2-1) 定义的调度算法。关于比例公平调度算法优化性的严格证明在参考文献<sup>[15]-[17]</sup>中已经给出。

### 2.4.3 流级模型下服务性能分析

Robert 和 Massoulié<sup>[18]</sup>引入并研究了互联网拥塞控制的流级模型, 用网络中的一个流代表连续传输的单个文件, 流的数量随机变化并且流之间动态共享网络带宽。此模型假设“区分时间规模”, 即流级动态的时间规模 (即, 文件的到达和离开) 比分组级动态的时间规模要大得多。此后, Veciana<sup>[19]</sup>和 Bonald<sup>[20]</sup>分别研究了在不同带宽共享策略下流级模型的稳定性问题, 每种带宽共享策略对应于一种广义的处理器共享 (Processor Sharing) 规则。在对无线机会调度算法的研究中, Borsl 和 Bonald 等人运用上述流级模型的建模分析方法对以比例公平算法为代表的比例公平调度算法和效用公平调度算法的服务性能和流级稳定性进行分析。

在分组级模型中将信道过程分为平稳随机模型和敌人模型, 在流级模型中所有的分析都基于平稳随机过程信道模型假设。令随机向量  $(r_0, \dots, r_{n-1})$  代表不同用户的瞬时

速率，它们的概率分布与信道速率过程  $(r_0(t), \dots, r_{n-1}(t))$  的联合平稳分布相同。令  $r_i = a_i \times b_i$ ， $i = 0, \dots, n-1$ ，其中时间平均速率  $a_i = E(r_i)$  为一常量，一般与用户距离基站的远近有关，随机变量  $b_0, \dots, b_{n-1}$  代表不同用户信道速率围绕时间平均速率的瞬时波动。为了利用流级模型对服务性能进行分析，需要将平稳信道模型进一步细分：

(1) 对称信道模型：用户具有不同的时间平均速率  $a_i$ ，但信道过程是对称的，即不同用户围绕时间平均速率的相对速率变化幅度  $b_i$  是统计相同的。这一假设在用户具有瑞利衰落信道并且速率与 SNR 近似呈线性关系时是粗略正确的。

(2) 不对称信道模型：对称信道模型在 SNR 不太高时是合理的。实际中，当不同用户的时间平均速率由于时间平均信噪比 (SNR) 的不同而不同时，他们的相对速率波动通常不会具有完全相同的概率分布。一般来说，由于传输速率在高 SNR 条件下为凹函数，且 SNR 增加到一定程度后传输速率具有非递增性，因此相对速率波动将随着 SNR 的增加而减少，而增益因子将不再独立于用户的时间平均速率，即  $b_i$  随着  $a_i$  的增加而减少。

文献<sup>[21]</sup>证明，比例公平算法在对称信道模型下具有长期时间公平性，即在一个较长的时间段内它分配给每个用户的服务时间相同。基于比例公平算法的这一性质，文献<sup>[22][23]</sup>对 CDMA 1x EV-DO 系统的服务性能进行了分析。假设一个小区中有  $n$  个移动数据用户，在对称信道模型下比例公平调度算法为用户分配的时隙数为总时隙数的  $1/n$ 。由于  $1.67\text{ms}$  的时隙长度与用户可感知的时间规模相比很小，因而可以假设每个用户被连续服务，其服务速率为总体传输速率的  $1/n$ 。这一假设类似于在有线网络中利用经典的处理器共享模型对轮询调度进行抽象。不同的是，总体传输速率不是一个固定值，而是由具有多用户分集效应的比例公平算法确定，因而与用户数  $n$  有关。比例公平算法在每个时隙选择有最大相对速率的用户，即经过指数过滤平均服务速率值  $R_i(t)$  归一化后的最大瞬时速率。不失一般性的假设所有用户的衰落过程统计相同

(不一定独立)，因此不同用户的  $R_i(t)$  应该也具有相同的分布。另外，当指数过滤的时间常数  $\tau$  足够大时，指数过滤平均服务速率值随时间的波动不大。将上述两点结合，可以得出所有用户的指数过滤平均服务速率值应该在同一个常数附近进行极小的波

动。因此，比例公平算法在每个时隙选择具有具有最大瞬时速率的用户， $n$  个用户的总体传输速率为  $H(n) = E\{\max\{r_1, \dots, r_n\}\}$ 。由于假设所有用户的信道过程统计相同，可以令  $r_i = a \times b_i, i = 0, \dots, n-1$ ，因此  $H(n) = H(1)G(n)$ ，其中  $H(1) = a$  为时间平均速率。例如，如果用户具有独立瑞利衰减信道，且瞬时速率与瞬时信噪比成线性关系，则  $b_0, \dots, b_{n-1}$  为具有单位均值的独立指数分布随机变量。在此情况下， $G(n) = \sum_{m=1}^n 1/m$ 。当  $n$  趋于无穷大时， $G(n)$  趋于  $\log(n)$ 。在实际的 CDMA 1x EV-DO 系统中，瞬时速率从一组有限的离散值中选择。将  $G(n)$  称作增益因子，它代表比例公平算法通过机会调度所得到的相对于时间平均速率  $a$  的吞吐量增益。

假设用户的数目随业务的到达和完成而动态变化，当有  $n$  个用户时每个用户都以  $H(n)/n$  的速率被连续服务，此速率为时间平均速率的  $G(n)/n$  倍。此时，根据服务器共享模型就可以得到比例公平调度算法的用户数目、业务时延等参数的概率分布函数，从而对 CDMA 1xEV-DO 系统的性能进行分析。文献<sup>[24]</sup>利用相似的方法对 HSDPA 系统的性能进行分析。

上述分析假设对称信道模型，在不对称信道模型下，比例公平算法由于不满足时间公平性，只能使用区分服务器共享（Discriminatory ProceMT Sharing: DPS）模型进行分析，无法得出各种参数的概率分布函数。因此，只有具有时间公平性的机会调度算法才能利用上述方法进行性能分析。

## 2.5 本章小结

本章对机会调度理论进行了详细的介绍。首先介绍了机会调度理论的定义，包括多用户分集效应等各个方面对于机会调度的定义，从各个角度说明了机会调度的重要性。随后介绍了机会调度理论模型和性能分析，提出了公平性这个重要的性能指标。然后介绍了机会调度理论的算法分类，本文主要考虑时间公平和效用公平。比例公平调度算法能够在公平性和有效性之间实现较为合理的折中，是一种效用公平算法，目前在实际系统中被广泛采用，本文提出的机会多播调度算法采用了比例公平原则。最后本章对比例公平调度算法在不同模型下的性能进行分析和评价。

## 第三章 基于公平原则的机会多播调度算法研究

### 3.1 引言

在多播方式的每个传输时隙, 基站发射机只能以同一个速率向小区中的一个多播组发送数据。在多播业务传输过程中, 小区中存在多个多播组并且每个多播组中包含不同数目的用户。一般而言, 属于同一多播组的不同用户随机分布在小区中不同位置, 因此同一多播组中的不同用户经历不同的信道条件, 从而支持的最大传输速率不同。当多播系统采用自适应调制和编码 (Adaptive Modulate and Coding, AMC), 用户设备能支持不同的传输数据速率。AMC 技术主要通过用户设备反馈测量的信道质量指示 (Channel Quality Indicator, CQI) 信息选择合适的传输速率。基站接收用户设备反馈的 CQI 等信息, 然后通过 UE 反馈的 CQI 和各用户的数据传送需求, 得到用户能够支持的最大传输速率  $R_k^i(t)$ ,  $R_k^i(t)$  为多播组  $k$  用户  $i$  能够支持的传输速率。

如果基站的数据传输速率高于用户设备当前时刻能够支持的最大传输速率  $R_k^i(t)$ , 则用户设备将无法接收到任何传输数据。由于同一多播组中的所有用户受限于基站选择的同一速率, 因此基站对速率的选择与基站对多播组选择同等重要。如果基站选择较高的传输速率, 则多播组中许多用户将无法接收到传输数据; 如果基站选择较低的传输速率, 则不能充分利用支持高传输速率的用户的信道条件。因此, 对于多播传输方式而言, 基站调度必须在系统的吞吐量和用户的公平性两个方面取得平衡, 基站多播调度的核心在于选择合适的多播组以及选择合适的传输速率。为此, 本文将提出具体的选择多播组和多播组最优传输速率的算法。本文提出的基于比例公平原则的多播调度算法, 选择比多播组中用户要求的最低速率略高一些的速率作为传输速率, 在考虑比例公平原则基础上, 在保证信道条件差的用户接收到基本的服务水平的前提下, 使信道条件较好的用户接收到质量更高的数据服务。

本章主要研究基于公平原则的多播调度算法。首先会介绍认识蜂窝网络多播调度的系统模型，然后在分析多播调度优化问题基础上，研究基于比例公平原则的机会多播调度算法问题，提出了一种最优的机会多播调度算法，最后证明了提出的基于比例公平原则的多播机会调度算法是对应优化目标函数的最优解并且给出了该调度算法的性质。

### 3.2 多播调度系统模型

本文研究的多播调度是下行链路调度，考虑的是单个无线蜂窝网络小区的调度，由一个处于小区中央的基站和  $G$  组多播组用户组成。多播用户分布在以基站为中心的圆形区域内。在多播业务传输过程中，小区中存在多个多播组并且每个多播组中包含不同数目的用户。一般而言，属于同一多播组的不同用户随机分布在小区中不同位置，因此同一多播组中的不同用户经历不同的信道条件，从而支持的最大传输速率不同。下行链路，即基站向用户发送数据的情形，采用时分复用（TDM）技术。每个时间帧被分成多个时隙，在每个时隙基站能且只能向一组多播用户发送数据。假设时隙的长度足够短，那么在每个时隙内用户的信道状态可以认为是不变的。用户当前时隙能够接受数据的最大速率只取决于用户当前信道的状态，比如信道当时的信噪比。

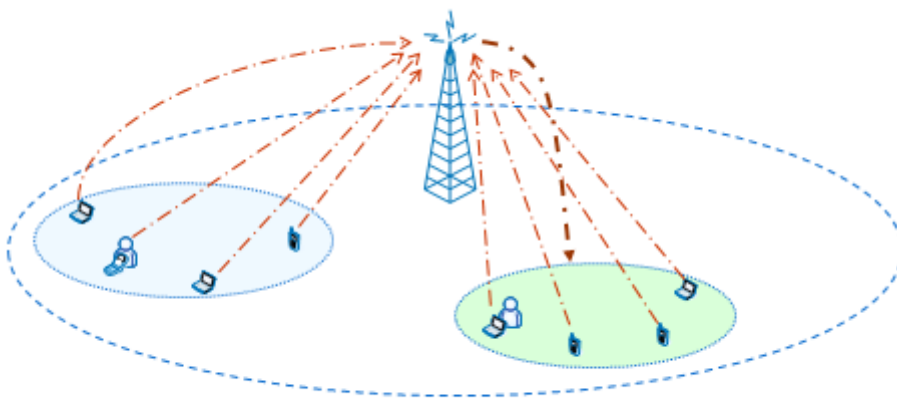


图 3-1 多播调度系统模型示意图

Figure 3-1 Multicast Scheduling System Model

### 3.2.1 系统概述

系统的运行方式如下，发送给每个用户的数据包先到达基站，然后由基站发送给对应的多播用户。假定用户的数据包都是无限的，即不考虑信源模型，同时假定每个用户都能准确地测量出它的瞬时信道状态并反馈给基站。基站根据每个用户的信道状态和之前每个用户已经获得的吞吐量信息，通过一定的调度算法，来决定下一个时隙向哪一组多播用户传输。多播调度器需要在每个时隙及时进行调度，以适应无线信道状态的不断变化。

对于信道模型，本文综合考虑慢衰落和快衰落两方面的影响，这也是其他一些机会调度算法普遍采用的模型。用户的信道状态，即能获得的最大传输速率，是时间上的连续随机变量。用  $s$  ( $s=1,2,\dots$ ) 表示时隙的编号， $k$  ( $k=1,2,\dots,G$ ) 表示多播组的编号， $i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) 表示用户的编号，则用户  $i$  在时隙  $s$  的信道状态，即能获得的最大传输速率  $R_k^i(t)$  可以表示为

$$R_k^i(t) = a_i(t) \cdot b_i(t) = a_i(t) \cdot b(t) \quad (3-1)$$

其中： $a_i(t)$  是代表慢衰落即阴影衰落的随机变量，其分布符合对数正态分布，也就是说  $\ln a_i(t)$  符合正态分布。把  $\ln a_i(t)$  的期望与方差分别记为  $\mu_i$  与  $\sigma_i^2$ ，对不同的用户  $i$ ， $\ln a_i(t)$  相互独立，其期望  $\mu_i$  与用户和基站的距离相关，距离基站越近，该随机变量的期望值越大；而其方差  $\sigma_i^2$  都相同，因此去掉下标  $i$ ，统一用  $\sigma^2$  表示。 $b_i(t)$  是代表快衰落的随机变量，本文采用 Rayleigh 衰落来模拟，其分布符合 Rayleigh 分布。对不同的用户来说， $b_i(t)$  相互独立同分布，因此去掉下标  $i$ ，统一用  $b(t)$  表示。

多播调度的每个传输时隙，基站发射机只能以同一个速率向小区中的一个多播组发送数据。如果基站的数据传输速率高于用户设备当前时刻能够支持的最大传输速率  $R_k^i(t)$ ，则用户设备将无法接收到任何传输数据。由于同一多播组中的所有用户受限于基站选择的同一速率，因此基站对速率的选择与基站对多播组选择同等重要。如果基站选择较高的传输速率，则多播组中许多用户将无法接收到传输数据；如果基站选

择较低的传输速率，则不能充分利用支持高传输速率的用户的信道条件。传统的多播调度方法将传输速率固定在系统的默认速率值并且在所有多播组中进行轮询调度。系统的默认传输速率一般设置为最低的传输速率，即处于小区最边缘的用户能够处理的传输速率。

### 3.2.2 自适应技术

为应用机会调度算法，无线数据网络系统需要满足一定的条件：终端用户需要测量无线信道的状态并反馈给调度器；调度器需要及时调度，以适应无线信道状态的不断变化。多播系统采用自适应调制和编码 (Adaptive Modulate and Coding, AMC)，用户设备能支持不同的传输数据速率。自适应调制和编码技术主要通过用户设备反馈测量的信道质量指示 (Channel Quality Indicator, CQI) 信息选择合适的传输速率。基站接收用户设备反馈的信道质量指示等信息，然后通过用户终端反馈的信道质量指示和各用户的数据传送需求，得到用户能够支持的最大传输速率  $R_k^i(t)$ ， $R_k^i(t)$  为多播组  $k$  用户  $i$  能够支持的传输速率。

第三代和下一代无线蜂窝网络系统已经能够满足这些条件，第三代移动通信系统的 3GPP 组织和 3GPP2 组织分别推出了 UMTS HSDPA 标准和 CDMA2000 1xEV-DO 标准，在这两种标准中都采用了自适应技术来实现机会调度算法。自适应技术主要是针对时域而言的，也就是说，动态调整的参数主要是调制方式、编码方式等时域参数，因此在这种情况下自适应技术通常被称为自适应调制编码 (AMC)。HSDPA 将不同的编码和调制方式组合成若干种调制编码方案 (Modulation and Coding Scheme, MCS)，供系统根据信道情况进行选择。靠近基站的用户，拥有高质量的信道条件，将被分配级别较高的调制编码方案 (例如 16QAM, 3/4 码率的 Turbo 码)，这种调制编码方案的抗干扰性能和纠错能力较差，对信道质量的要求较高，但是能够赢得较高的数据速率，提高下行链路的平均数据吞吐量。相反，处于小区边界的用户，信道衰落严重或存在严重干扰和噪声，将被分配的级别较低，具有较强纠错能力，抗噪声干扰性能较好的调制编码方案 (例如 QPSK, 1/2 码率的 Turbo 码)，以保证数据的可靠

传输。使用 HSDPA 将使下行数据传输峰速率达到 10.8Mbit/s。

自适应技术在提高系统吞吐量的同时，要求用户设备（User Equipment, UE）增加相应的功能来支持这项技术。自适应调制编码要求用户设备增加的基本功能有如下几项：获取基站所配置的传输参数信息的能力，低速/高速 Turbo 码译码能力，测量/报告下行信道质量的能力和高阶解调能力。HSDPA 引入的 16QAM 调制方式要求用户设备不仅能够估计相位参考信息还要能估计幅度参考信息。高阶调制方法对由于接收机结构不理想而引入的干扰更加敏感，因此要求用户设备要有更精确的同步跟踪机制和信道估计方法，以获得足够好的性能。

CDMA 2000 1xEV-DO（Data Only）数据业务和话音业务采用不同的信道进行传输，高通、朗讯、爱立信等公司提出的高速数据速率（High Data Rate, HDR）技术，已成为该阶段的惟一技术标准，可以支持峰值速率为 2.4Mbit/s 的高速数据业务。HDR 最突出的特点就是将数据和话音相分离，采用专用信道传输数据。因此 HDR 主要是对下行链路做了较大修改，链路自适应技术在其中得到成功运用。HDR 将全部的系统资源（包括带宽和码资源）进行动态分配以提高系统能力；动态控制数据速率，使处于有利位置的用户得到尽可能高的速率。下行业务信道采用多种编码方案，包括 QPSK、8PSK 和 16QAM，得到不同数据速率；信道编码方案采用 Turbo 码，码率为 1/5 或 1/3。在通信中，移动台不断测量导频强度，并在 HDR 特有的数据速率控制（Data Rate Control, DRC）信道的每一个时隙内要求一个与当前信道条件相符合的数据速率。网络按当时移动台所能支持的最大速率进行编码。当用户需求改变或者信道条件改变时，动态地调整数据速率。

### 3.2.3 喷泉码

为了提高无线网络的吞吐量，本文提出的机会多播调度算法选择比多播组中用户要求的最低速率略高一些的速率作为传输速率，也就意味着该多播组中的部分信道质量较差的用户在该时隙将无法接收到任何传输数据。但是，多播调度的目标是将相同的内容传输给多播组的每一个用户。一种可行的解决方案是采用纠错（删）编码技术

(Erasure coding) 和喷泉码 (Fountain coding) [25][26]。纠错 (删) 编码技术利用冗余信息恢复丢失数据。喷泉码的编码方法可以由原始数据包生成任意数量的编码包, 而接收方只要接收到其中任意  $m$  个编码包, 即可通过解码以高概率成功恢复全部原始数据包。一般情况下, 这里的  $m$  略大于  $k$ ,  $k$  是原始数据的长度。喷泉码是一种新颖的信道编码技术, 比其他传输技术更可靠, 省时, 丢包率更小。从发送方的角度看, 不需要区分各个接收者; 从接收者的角度看, 只要接收的数据包的数目够了, 就能拿到想要的的数据, 而不关心接包的顺序。

J. Byeers, M. Luby [27] 等人于 1998 年首次提出了喷泉码的概念, 但当时并没有给出现实可行的喷泉码设计方案。M. Luby、A. Shokrollahi 等人联合创立了 Digital Fountain 公司, 以推广数字喷泉概念的实际应用。2002 年, M. Luby 提出了第一种现实可行的喷泉码——LT (Luby transform) 码 [28]。在学术理论日渐完善的同时, 喷泉码也日益受到产业界的关注, 获得了越来越多的实际应用。目前, 一种由 Digital Fountain 公司设计的系统 Raptor 码 [29] 已经被 DVB-H 标准和 3GPP 组织的 MBMS 标准采用, 并且正在参与其他多项国际标准的制定。

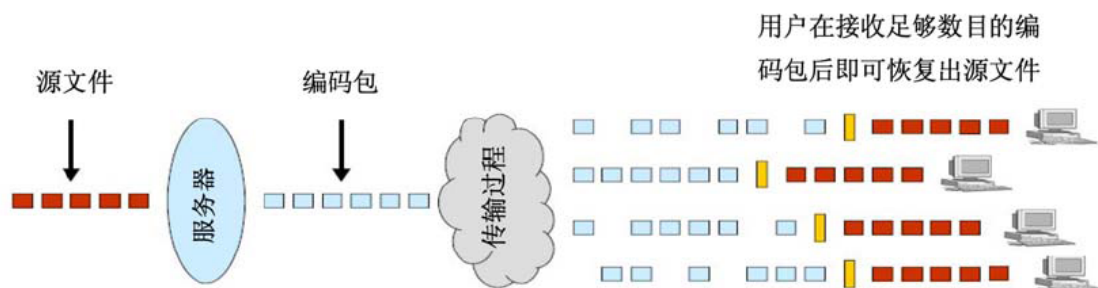


图 3-2 喷泉码编解码传输示意图

Figure 3-2 Encoding and Decoding of Fountain Coding Transmission

### 3.3 现有机会多播调度算法分析

#### 3.3.1 固定速率轮询调度算法

固定速率轮询调度 (Fixed Rate Round-Robin, FR-RR) 算法是将多播系统的传输

速率固定在一个系统默认值然后在系统中的多播组之间进行轮询调度。系统默认值一般设置为处于小区最边缘的用户的传输速率，这个传输速率是系统的最低传输速率，因为系统总是假设小区边缘存在一个用户来设置这个最低传输速率，而不管这样的小区边缘用户是否真实存在。现行的 CDMA2000 1xEV-DO 就是采用这种调度方式，将系统传输速率固定在 204.8 kbps<sup>[6]</sup>。

轮询调度算法 (Round-Robin, RR) 保证蜂窝系统中所有多播组按照某种确定的顺序循环占用等量的时隙来进行传输通信。从被调度的概率而言, 对  $G$  个多播组来说, 每个多播组被调度的概率都是  $1/G$ , 也就是说每个用户以相同的概率占有可分配的时隙和频谱资源, 从占用这两种资源的角度来说, 轮询调度算法是最公平的, 每次调度时不考虑以前被调度的情况, 因此这种调度算法是无记忆的, 当然在讨论公平性的时候, 不仅要考虑资源分配的方式, 还要考虑资源的效用, 同样的资源分配给不同的用户获得的效用是不一样的, 比如, 在这里选择不同的用户, 由于请求的传输速率不同, 因此传输分组占有的时隙数也不一样。轮询调度算法不仅可以保证用户的长期公平性, 还可以保证用户的短期公平性。因此基站不需要任何反馈信息来完成调度过程, 这种算法被认为是最容易实现的算法。

当然这种算法也存在缺点, 由于没有考虑到无线信道的时变特点, 也没有利用无线信道所提供的相关信息, 因此难以充分利用系统资源以达到较高的频谱资源利用率和系统吞吐量。

此外, 轮询调度算法没有考虑用户之间存在不同 QoS 要求的情况, 如果数据包延时要求严格的用户和延时要求较松的用户一视同仁, 很多情况下不能满足部分通信系统的要求。

### 3.3.2 IPF 算法

Hyungsuk Won 等在<sup>[30]</sup>中提出了两种时分复用蜂窝数据网络中能够动态适应信道条件的比例公平多播调度算法: 组间比例公平 IPF 算法和多播比例公平 MPF 算法。这两种比例公平多播调度算法考虑了: 用户向基站报告的动态改变使用户链接状态与基站匹配的数据速率和小区内每个用户在一段时间内接收的平均吞吐量。基站利用这些信息选择对每一个多播组都合适的数据速率进行传输。

Hyungsuk Won 等在该文中考虑了两种不同情况的多播应用场景, 并且提出了两种多播调度算法来最大化两种不同场景的效用函数。第一种应用于能够延时容忍度较高的合作数据下载场景, 第二种应用于典型 3G 多播数据网络的多媒体内容分发。第

一种场景，调度器的目标是使得所有多播组的  $\log T_k^g$  之和最大。对于任意多播组  $k$ ，该多播组的效用函数为  $\log T_k^g$ ，其中， $T_k^g$  是多播组  $k$  的组吞吐量，而组吞吐量定义为每个多播组中所有用户的吞吐量之和，这种调度算法称为组间比例公平 (Inter-group Proportional Fair, IPF) 调度算法。在第二种应用场景中，小区中的多个多播组中的用户从基站接收相同或者不同的多媒体内容。文中考虑了一种效用函数的形式， $\log T_i$ ，其中  $T_i$  是用户  $i$  接收到的吞吐量。如果用户  $i$  接收到越多的数据包，那么用户  $i$  的效用函数越大。这个调度器的目标是使得小区中所有用户  $i$  的效用函数  $\log T_i$  的和最大，这种调度算法称为多播比例公平 (Multicast Proportional Fair, MPF) 调度算法，因为这种调度器需要在多播情况下实现比例公平。

$$T_k^g(t) := \sum_{i=1}^{S_k} T_{ik}(t).$$

$$\phi_{k,t}(y) = \sum_{n=1}^{S_k} y 1_{\{y \leq r_{nk}(t)\}}.$$

图 3-3 IPF 多播组累积吞吐量和累积速率定义<sup>[30]</sup>

Figure 3-3 IPF Multicast aggregate group throughput and aggregate rate<sup>[30]</sup>

*IPF scheduler  $\mathcal{S}^*$ : The feasible rate assigned to group  $k$  at time  $t$  is*

$$r_k^g(t) = \arg \max_y \phi_{k,t}(y). \quad (8)$$

*The BS chooses group  $k(t)$  to transmit at rate  $r_k^g(t)$ ,*

$$\text{where } k(t) = \arg \max_{1 \leq k \leq G} \frac{\phi_{k,t}(r_k^g(t))}{T_k^g(t)}. \quad (9)$$

图 3-4 IPF 调度算法<sup>[30]</sup>

Figure 3-4 IPF Scheduling Algorithm<sup>[30]</sup>

IPF 算法中提出的多播调度器能够实现多播组间比例公平。IPF 算法中每个多播组在任意时刻的累积吞吐量以及当基站的传输速率一定时该多播组中所有用户在任

意时刻的累积速率定义如图 3-3<sup>[30]</sup>所示。

图 3-4<sup>[30]</sup>是 IPF 调度算法的原理，其中注意到  $r_k^g(t)$  表示使多播组  $k$  累积速率最大的传输速率。我们观察发现  $r_k^g(t)$  总是与多播组中某些用户的 DRC 相同。这一点可以通过如下阐述：假设  $r_k^g(t)$  的值处于多播组某两个用户的 DRC 数值之间，通过图 3-3 定义的多播组累积速率表达式，我们总是可以增加  $r_k^g(t)$  的值使其达到较大的 DRC 值，从而是累积速率更大，而这与图 3-3 定义的最大多播组累积速率相矛盾，从而可以证明  $r_k^g(t)$  总是与多播组中某些用户的 DRC 相同。一旦每个多播组的 DRC 确定，基站将选择使图 3-3 达到最大值的多播组进行传输。

### 3.3.3 MPF 算法

MPF 算法中提出的多播调度器能够实现系统中所有多播用户之间的比例公平。图 3-5<sup>[30]</sup>是 MPF 调度算法的原理，其中注意到  $r_k^g(t)$  表示使多播组  $k$  “权值”累积速率最大的传输速率，其中每个用户的权值为  $1 / T_{nk}(t)$ ， $T_{nk}(t)$  为多播组  $k$  中用户  $n$  在时间  $t$  时刻的平均吞吐量。因此，如果用户接收到的吞吐量很小，也就是说  $T_{nk}(t)$  很小，那么那个用户的权值  $1 / T_{nk}(t)$  更大，因此有更大的权值决定整个多播组的可行传输速率  $r_k^g(t)$  和选择哪一个多播组进行传输。考虑一个特殊的情况，当每个多播组都有且只有一个用户时，也就是说，所有多播组的大小均为 1，注意到此时的 MPF 调度器变成了普通的单播 PF 调度器。从 MPF 调度算法，我们可以看出，MPF 调度器在某些时隙会选择较高的数据速率使得某些离基站较远的小区边缘用户无法接收到传输数据，因此带来的效果是，使得这些小区边缘用户出现掉包和随之而来的掉帧现象。也就是说，使得信道条件较差的接收到一个“基本”水平的服务，而信道条件好的用户接收到更高质量的数据服务。

*MPF scheduler*  $S^\circ$ : The feasible rate assigned to group  $k$  at time  $t$  is

$$r_k^g(t) = \arg \max_y \varphi_{k,t}(y), \quad (22)$$

where  $\varphi_{k,t}(y) = \sum_{n=1}^{S_k} \frac{y}{T_{nk}(t)} 1_{\{y \leq r_{nk}(t)\}}$ .  $(23)$

The BS chooses group  $k(t)$  to transmit at rate  $r_k^g(t)$

$$\text{where } k(t) = \arg \max_{1 \leq k \leq G} \varphi_{k,t}(r_k^g(t)). \quad (24)$$

图 3-5 MPF 调度算法<sup>[30]</sup>Figure 3-5 MPF Scheduling Algorithm<sup>[30]</sup>

### 3.3.4 纠错编码的多播调度

Ulas C. Kozat 在<sup>[31]</sup>中集中考虑机会多播调度的容量问题。该文中作者将机会多播调度问题归结为多播吞吐量优化问题，并且提出了一种联合采用固定速率和无固定速率的纠错编码技术，同时采用简单速率调整技术来实现每个用户最优多播吞吐量的解决方案。

Ulas C. Kozat 在文中指出机会多播传输的一个问题是多播信道的注册用户并不总是能够解码传输的信息，而多播传输的目标是使得多播组中的每个用户都接收到完整的内容。一种解决该问题的方案是将机会多播传输看做一个调度层上的可擦除信道，其中丢包概率的范围为 $[0.5, 0.9]$ 。基站不再讲原始的多播信息块发送出去，而是讲编码块输出通过可擦除信道发送传输。根据不同的系统架构，信道假设和时延考虑，可以采用不同的可擦除编码方案。该文首先研究了系统在独立同分布信道条件下的系统性能，通过该文的分析，我们可以看到在独立同分布瑞利衰落信道条件下多播容量随着系统用户数的增加线性增加，如图 3-6 所示。因为该系统模型下的结果需要对大量数据块进行编码，因此产生了较大的编码时延。该文扩展了针对小的数据块长度进行编码从而满足时延-容量平衡的简单设定的情况。该文进一步研究了非独立同分布信道条件下通过调整一个调度探索算法满足单播流的机会调度公平性原则使增益增加的情况。

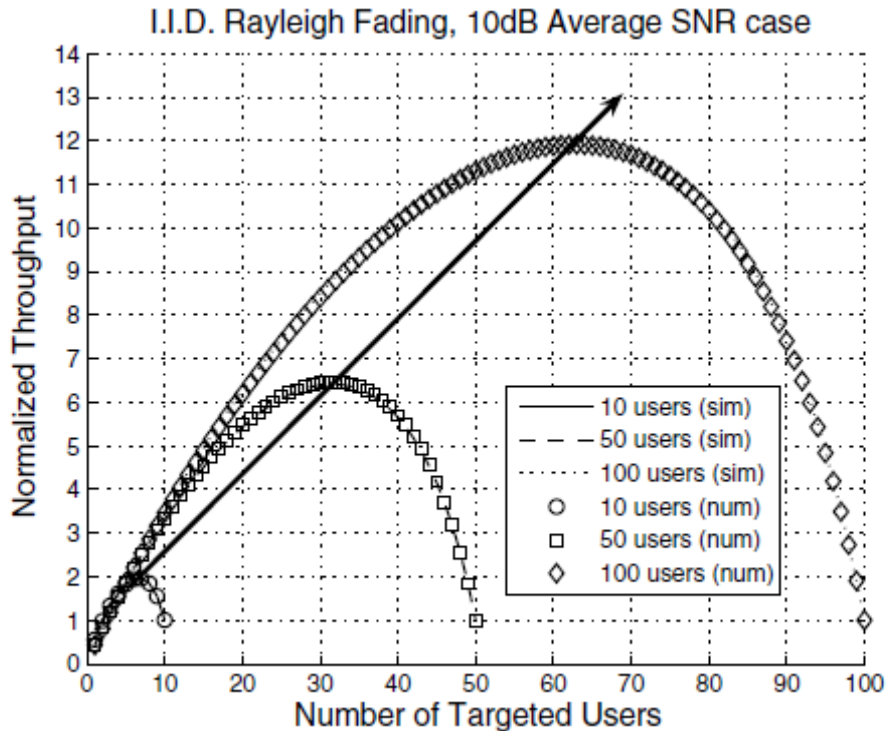


图 3-6 独立同分布瑞利衰落信道条件下多播容量随着系统用户数的增加线性增加<sup>[31]</sup>

Figure 3-6 Linear gain for the multicast capacity over i.i.d. Rayleigh fading channels with respect to the number of users.<sup>[31]</sup>

### 3.4 机会多播调度（OMS）算法

本章提出基于公平原则的机会多播调度问题以及本文提出的最优算法。本文考虑的机会多播调度系统中，每个多播组都有一个对应的权值  $\Phi_k$ ， $\Phi_k$  表示每个多播组的

时间公平性约束条件，以保证多播组之间的公平性，满足  $\sum_{k=1}^G \Phi_k = 1$  的条件，其中  $G$  表

示多播系统中多播组的数目。注意到，由于我们的蜂窝系统模型下行链路方向采用的是 TDM 方式。每个时间帧被分成多个时隙，在每个时隙基站能且只能向一组多播用户发送数据，所有的多播组共享每个时间帧接收传输的数据。因此，每个多播组权值  $\Phi_k$  也同时代表了多播组  $k$  在每个时隙被多播调度器选择来传输的概率。在一段足够长的时间(比如  $M$  个时隙)，多播组  $k$  平均起来应该能够分配到  $M\Phi_k$  个时隙进行传输。

在这样的时间公平性权值  $\Phi_k, k=1,2,\dots,G$  约束条件下, 时间帧能够公平地分配到各个多播组进行传输。在给定的时间公平性约束条件下, 多播调度问题转化成如何确定选择哪一个多播组在当前时隙进行传输和以怎样的速率向选定的多播组进行传输, 使得整个无线网络的吞吐量最大。

跟单播调度不同, 多播调度器需要考虑组内公平性问题: 一般而言, 属于同一多播组的不同用户随机分布在小区中不同位置, 因此同一多播组中的不同用户经历不同的信道条件, 从而支持的最大传输速率不同。因此, 基站选择的传输速率不可能对于多播组中的每个用户来说都是最优传输速率。为了提高无线网络的吞吐量, 本文提出的机会多播调度算法选择比多播组中用户要求的最低速率略高一些的速率作为传输速率, 这就意味着该多播组中某些信道质量较差的用户将无法在当前时隙内接收到任何传输的数据。每个多播组的最优传输速率是基于比例公平原则, 根据多播用户当前的信道数据速率和吞吐量来选择的, 从而实现多播用户吞吐量和公平性的平衡。本文的目标在于提出一种机会多播调度算法, 保证多播用户间的公平性的同时充分利用时变信道条件来更有效地使用整个系统的频谱资源, 最大化多播系统的吞吐量。

### 3.4.1 优化问题

我们考虑的场景中不同用户的信道条件变化是相互独立但不是同分布的, 因此我们需要考虑不同用户之间的公平性问题。我们采用的比例公平分享机制来决定任一给定多播组在每个时隙的传输速率。对于多播组中每个用户, 我们定义多播组  $k$  中用户  $i$  的归一化的传输数据速率  $r_k^i(t) = R_k^i(t) / T_k^i(t)$ 。将多播组  $k$  中每个用户的归一化速率  $r_k^i(t)$  进行排列, 如下所示

$$r_k^{(1)}(t) \geq \dots \geq r_k^{(N_k)}(t) \geq \dots \geq r_k^{(S_k)}(t) \quad (3-2)$$

对于每个多播组而言, 机会多播调度选择其中  $\lceil \alpha S_k = N_k \rceil$  个归一化速率最高的用户形成接收集  $L_k^{N_k}(t) = \{l_k^1, \dots, l_k^{N_k}\}$ , 其中  $\alpha$  是多播组用户选择比例, 并且满足  $0 < \alpha \leq 1$ ,  $\lceil \bullet \rceil$  表示向上取整。多播组  $k$  在  $t$  时隙的多播传输速率如下所得

$$r_k(t) = \min_{l \in L_k^{N_k}(t)} R_k^l(t) \quad (3-3)$$

注意到，一般情况下总是满足  $r_k(t) \leq R_k^{(N_k)}(t)$ ，并且比较典型的情况下还满足  $r_k(t) < R_k^{(N_k)}(t)$ 。也就是说，对于给定的多播组在每个时隙，我们一般会选择大于  $N_k$  个数目的用户进行调度。从上面我们可以看到，对于给定的多播组，从一个时隙到下一个时隙，多播组速率选择过程同时取决于每个多播用户当前信道条件和已经获得的平均吞吐量。因此多播调度算法才能充分利用机会调度的特点来最大化系统的吞吐量。

我们用大写字母  $I$  表示多播调度事件标志函数，用字母  $S$  表示以下讨论的多播调度器。因此，

$$I_k^S(t) := \begin{cases} 1, & \text{多播组 } k \text{ 在 } t \text{ 时隙被选择传输;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3-4)$$

同样的，我们定义

$$1_i^S(t) := \begin{cases} 1, & \text{用户 } i \text{ 在 } t \text{ 时隙能够成功接收;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3-5)$$

在  $t$  时隙，如果多播组  $k^*$  中的用户  $i$  能够从基站接收到传输数据，则平均吞吐量  $T_k^i(t)$  能够采用一个指数权重的低通滤波器进行更新，如下所示，

$$T_k^i(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k^i(t) + \frac{1}{t_c} R_k^*(t), & k=k^* \\ \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k^i(t), & k \neq k^* \end{cases} \quad (3-6)$$

其中， $t_c$  表示一个包含特定时隙数的时间窗。注意到上式可以写成如下所示，

$$T_k^i(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k^i(t) + \frac{1}{t_c} r_k(t) I_k^S(t) 1_i^S(t) \quad (3-7)$$

在下面的部分，对于任一给定的多播组  $S_k$ ，我们得到最优用户选择比例  $\alpha^*$ ， $\alpha^*$  满足使得无线网络吞吐量最大的同时保持多播组内用户之间的公平性的条件。多播组  $k$  中用户  $i$  在  $M$  个时隙之后的吞吐量如下所示，

$$T_k^i = \sum_{t=1}^M r_k(t) I_k^S(t) l_i^S(t) \quad (3-8)$$

对于每个多播组而言，多播组最优用户选择比例能够通过求解如下的优化问题而得到，

$$\alpha^* = \operatorname{argmax} \alpha \left\{ \min_{i \in \{1, \dots, S_k\}} E(r_k(t) l_i^S(t)) \right\} \quad (3-9)$$

其中  $r_k(t)$  由式 (3-8) 所得。

当每个多播组的最优用户选择比例确定之后，多播系统中的每个多播组都能得到一个相应的效用函数如果该多播组被多播调度器选择在最优速率下在当前时隙进行传输。如果  $t$  时隙多播调度器选择多播组  $k$  进行传输时，我们用  $U_k(t)$  表示多播组  $k$  的效用函数。给定最优传输速率  $r_k(t)$  时，我们定义多播组  $k$  在  $t$  时隙的效用函数如下所示，

$$U_k(t) = \sum_{i=1}^{S_k} r_k(t) l_i^S(t) \quad (3-10)$$

本文用  $\vec{U}(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_G(t))$  表示多播系统的效用函数向量。因此，多播调度的优化问题就转化为如下问题：给定  $\vec{U}(t)$ ，基站多播调度器必须决定当前时隙选择哪个多播组进行传输。

本文用  $\mathcal{S}$  表示下文讨论的所有可行多播调度器的集合。可行的多播调度器必须满足给定的资源公平性约束条件，即对于所有的  $k = 1, 2, \dots, G$ ，满足如下所示条件，

$$\begin{cases} P\{I_k^S(t) = 1\} = \Phi_k \\ \sum_{k=1}^G \Phi_k = 1 \end{cases} \quad (3-11)$$

机会多播调度问题的目标是最大化多播系统中所有多播组的总效用函数，因此，包含资源公平性约束条件的机会多播调度问题可以阐述为以下的优化问题：对于所有的  $k = 1, 2, \dots, G$ ，

$$\begin{aligned} & \max_{S \in \mathcal{S}} E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^S(t)\right) \\ & s.t. \begin{cases} P\{I_k^S(t) = 1\} = \Phi_k \\ \sum_{k=1}^G \Phi_k = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3-12)$$

注意到，我们可以写成：

$$E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^S(t)\right) = \sum_{k=1}^G E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t) I_k^S(t)\right) \quad (3-13)$$

也就是说，上述的优化目标函数就是所有多播组的平均效用函数的总和。

为了使每个多播组满足资源公平性约束条件，对于所有的多播组  $k$ ， $k=1, 2, \dots, G$ ，在  $t$  时隙，我们引入相应的公平性补偿因子  $\lambda_k(t)$ 。因此，我们的机会多播调度器  $S^*$  选择多播组  $k(t)$  在最优传输速率下进行传输，其中  $k(t)$  定义如下所示，

$$k(t) = \operatorname{argmax}_{1 \leq k \leq G} (U_k(t) + \lambda_k^*(t)) \quad (3-14)$$

其中  $\lambda_k^*(t)$  是满足  $P\{I_k^S(t) = 1\} = \Phi_k$  的公平性补偿因子。由上述可知， $\lambda_k^*(t)$  的引入是为了保证多播系统中所有多播组的资源公平性约束条件的。在特殊情况下，如果多播调度算法已经满足了资源公平性约束条件，对于所有的多播组  $k$ ，我们可以令  $\lambda_k^*(t) = 0$ 。一般情况下，我们可以采用标准的随机逼近算法来估计出  $\lambda_k^*(t)$  的值<sup>[32][33]</sup>。

### 3.4.2 机会多播调度的最优性质

在本章以下的部分中，本文将证明本文提出的基于比例公平原则的多播机会调度算法的多播组选择策略是对应的(3-12)式定义的优化目标函数的最优解并且将阐述该调度算法的性质。

**性质 1:** (3-14)式描述的机会多播调度器  $S^*$  是对应(3-12)式定义的优化目标函数的最优解。

**证明:** 首先我们必须证明，对于根据本文提出的多播调度选定的多播组  $k$ ，总是

存在一个  $\lambda_k^*(t)$ ，使得本文提出的多播调度器  $S^*$  能满足资源公平性约束条件  $P\{I_k^S(t)=1\}=\Phi_k$ 。

对于  $k=1,2,\dots,G$ ，我们定义

$$f_k(\vec{\lambda}(t)) = P\{U_k(t) + \lambda_k(t) \geq \max_{j \neq k} (U_j(t) + \lambda_j(t))\} \quad (3-15)$$

其中， $\vec{\lambda}(t) = (\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_G(t))$ 。注意到  $f_k(\vec{\lambda}(t))$  是一个关于  $\lambda_k(t)$  的右连续单调递增函数和关于  $\lambda_j(t)$  的左连续单调递减的函数， $j \neq k$ 。因此，我们总是可以找到一个  $\lambda_k^*(t)$  使其满足  $P\{I_k^S(t)=1\}=\Phi_k$  的条件。

在下面的部分，我们证明，(3-14)式描述的机会多播调度器  $S^*$  是对应(3-12)式定义的优化目标函数的最优解。

注意到机会多播调度器  $S^*$  的最优性可以阐述如下所示，

$$E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^{S^*}(t)\right) \geq E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^S(t)\right) \quad (3-16)$$

对于任意可行的多播调度器  $S$  满足  $P\{I_k^S(t)=1\}=\Phi_k$ 。

令  $S$  为对于所有的  $k$  满足  $P\{I_k^S(t)=1\}=\Phi_k$  约束条件的一个可行调度器，因此，

$$\begin{aligned} & E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^S(t)\right) \\ &= E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^S(t)\right) + \sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G \lambda_k^*(t) (P\{I_k^S(t)=1\} - \Phi_k) \quad (3-17) \\ &= E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G (U_k(t) + \lambda_k^*(t)) I_k^S(t)\right) - \sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G \lambda_k^*(t) \Phi_k \end{aligned}$$

根据  $S^*$  的定义，我们得到

$$E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G (U_k(t) + \lambda_k^*(t)) I_k^S(t)\right) \leq E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G (U_k(t) + \lambda_k^*(t)) I_k^{S^*}(t)\right) \quad (3-18)$$

因此，我们得到

$$\begin{aligned}
& E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^S(t)\right) \\
& \leq E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G (U_k(t) + \lambda_k^*(t)) I_k^{S^*}(t)\right) - \sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G \lambda_k^*(t) \Phi_k \\
& = E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^{S^*}(t)\right) + \sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G \lambda_k^*(t) (P\{I_k^S(t)=1\} - \Phi_k) = E\left(\sum_{t=1}^M \sum_{k=1}^G U_k(t) I_k^{S^*}(t)\right)
\end{aligned} \tag{3-19}$$

机会多播调度器  $S^*$  在满足多播系统资源公平性约束条件下，最大化多播系统所有多播组的总效用函数。上述证明表明了，提出的基于比例公平原则的多播机会调度算法是对应优化目标函数的最优解。以下阐述本文提出的机会多播调度策略的重要性质，本文提出的机会多播调度策略与相对应的非机会多播调度策略相比提高了每个多播组的效用函数。

### 3.4.3 机会调度算法的机会性质

**性质 2:** 对于  $k=1,2,\dots,G$ ，如果多播效用函数  $U_k(t)$  之间相互独立，则

$$E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t) I_k^{S^*}(t)\right) \geq \Phi_k E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t)\right) \tag{3-20}$$

其中， $E(I_k^{S^*}(t)=1) = \Phi_k$ 。

**证明:** 注意到我们可以将式(3-20)左边写成如下所示，

$$\begin{aligned}
& E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t) I_k^{S^*}(t)\right) \\
& = E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t) | I_k^{S^*}(t)=1\right) P\{I_k^{S^*}(t)=1\} \\
& = \Phi_k E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t) | I_k^{S^*}(t)=1\right)
\end{aligned} \tag{3-21}$$

因此，为了证明式(3-20)，等价地，我们只需要证明，

$$E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t) | I_k^{S^*}(t)=1\right) \geq E\left(\sum_{t=1}^M U_k(t)\right) \tag{3-22}$$

从上述机会多播调度策略，我们得到：如果  $I_k^{S^*}(t)=1$ ，也就是说机会多播调度器  $S^*$

选择多播组  $k$  在  $t$  时隙进行传输, 那么, 对于所有的  $j$

$$U_k(t) + \lambda_k^*(t) \geq U_j(t) + \lambda_j^*(t) \quad (3-23)$$

注意到, 我们可以将式(3-23)写成如下所示,

$$U_k(t) \geq \max_{j \neq k} (U_j(t) + \lambda_j^*(t)) - \lambda_k^*(t)$$

令  $U(t) = \max_{j \neq k} (U_j(t) + \lambda_j^*(t)) - \lambda_k^*(t)$ ,  $U = \sum_{t=1}^M U(t)$  和  $U_k = \sum_{t=1}^M U_k(t)$ , 我们得到,

$$\begin{aligned} & E(U_k | I_k^{S^*}(t) = 1) \\ & \stackrel{(1)}{\geq} E(U_k | U_k \geq U) \\ & = E(U_k | U_k \geq U) P\{U_k \geq U\} \\ & \quad + E(U_k | U_k < U) P\{U_k < U\} \\ & \stackrel{(2)}{\geq} E(U_k | U_k \geq U) P\{U_k \geq U\} \\ & \quad + E(U_k | U_k < U) P\{U_k < U\} \\ & = E(U_k) \end{aligned} \quad (3-24)$$

第一个不等式成立是根据机会多播调度器  $S^*$  的定义得到: 如果  $I_k^{S^*}(t) = 1$ , 则本文提出的多播调度器将保证在每一个时隙  $t$  满足  $U_k(t) \geq U(t)$  的条件。第二个不等式成立是根据假设  $U_k(t)$  与  $U(t)$  相互独立而得到。

因此, 我们对于所有的多播组  $k$ , 我们得到  $E(\sum_{t=1}^M U_k(t) I_k^{S^*}(t)) \geq \Phi_k E(\sum_{t=1}^M U_k(t))$ 。注

意到  $E(\sum_{t=1}^M U_k(t) I_k^{S^*}(t))$  是采用本文提出的机会多播调度策略下多播组  $k$  的效用函数的

期望, 而  $\Phi_k E(\sum_{t=1}^M U_k(t))$  是采用任意非机会多播调度策略下多播组  $k$  的效用函数的期

望。上述性质表明, 跟任意非机会多播调度策略相比, 本文提出的机会多播调度策略在不损害任一多播组吞吐量性能的情况下提高了整个多播系统的吞吐量, 更有效地利用了系统的频带资源。也就是说, 在保证多播系统中所有多播组间公平性的情况下,

本文提出的机会多播调度策略与相对应的非机会多播调度策略相比提高了每个多播组的效用函数。

### 3.5 仿真实验

这一部分我们通过仿真实验证明，本章提出的机会多播调度策略（OMS）在保证用户之间公平性的情况下，有效地提高了多播系统的吞吐量。同时我们也通过仿真实验的结果，验证本章中提到的机会多播调度策略的机会性性质，从而再次证明机会多播调度算法的优越性。

首先描述一下我们的仿真环境设定：本章的仿真实验考虑的是单个无线蜂窝网络小区的调度，由一个处于小区中央的基站和  $G$  组多播组用户组成。多播用户分布在以基站为中心的圆形区域内。在多播业务传输过程中，小区中存在多个多播组并且每个多播组中包含不同数目的用户。一般而言，属于同一多播组的不同用户随机分布在小区中不同位置，因此同一多播组中的不同用户经历不同的信道条件，从而支持的最大传输速率不同。由于本文考虑的无线网络的调度，因此每个用户的信道条件的最终效果表现为该用户在当前时隙能够支持的最大传输速率（单位为 kbps.）。我们采用的数据传输速率为 CDMA2000 1xEV-DO 标准提供的传输速率，即 {38.4; 76.8; 153.6; 204.8; 307.2; 409.6; 614.4; 921.6; 1228.8; 1843.2, 2457.6}。我们模拟的每种仿真场景的时间长度为 20000 个时隙，得到多播系统在不同调度算法，不同多播组组合方式下多播系统的性能。

为了评价本文提出的机会多播调度（OMS）算法的性能有效性，我们首先对本文提出的机会多播调度算法与非机会调度算法固定速率轮询（Fixed Rate Round-Robin, FR-RR）调度算法、机会调度算法最小速率（MIN）调度算法，多播比例公平（MPF）调度以及组间比例公平（IPF）调度进行比较。固定速率轮询调度算法是将多播系统的传输速率固定在一个系统默认值然后在系统中的多播组之间进行轮询调度。我们采用 CDMA2000 1xEV-DO 的方式，将系统传输速率固定在 204.8 kbps。最小速率调度总是选择给定多播组中的所有用户都能成功传输的最小数据速率进行传输。MPF 和 IPF 调度策略是在文中提出，以实现系统吞吐量和公平性之间的平衡。

为了方便仿真的环境的设置，我们假设系统实行公平共享时间资源的调度任务。也就是说，如果有  $G$  组多播组用户共享小区的信道，那么我们将设置为  $\Phi_k = 1/G$ 。基站系统采用时分复用（TDM）的方案，在每一个时隙下，多播调度系统进行如下

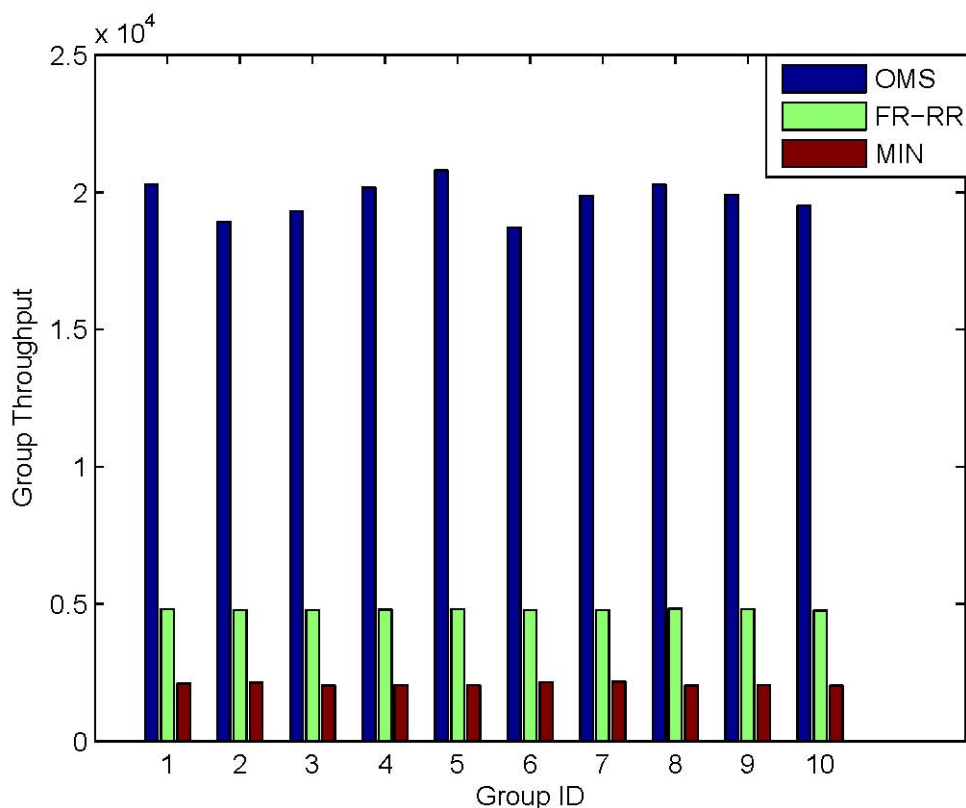


图 3-7 多播组吞吐量在 OMS、FR-RR 和 MIN 调度策略下的比较

Figure 3-7 Comparison of group throughput of the OMS algorithm with that of the FR-RR and MIN scheduling algorithm.

的步骤: 所有该小区中的多播用户向基站报告用户在当前时隙能够支持的最大传输速率; 机会多播调度器采用本文提出的机会多播调度策略决定当前时隙哪一个多播组以怎样的速率进行传输, 并且更新相应的参数。然后, 在当前时隙被多播调度器选中的多播组在调度算法确定的多播组最优传输速率下进行传输。

我们首先进行如下的仿真实验: 我们将基站服务的多播用户数目固定在 100 个用户, 然后将这 100 个用户平均分成 10 个多播组, 每组 10 个用户。然后, 我们对不同调度策略下每个多播组的累积用户吞吐量进行比较。

图 3-7 表示系统在本文提出的机会多播调度 (OMS) 策略和固定速率轮询调度 (FR-RR) 策略以及最小速率 (MIN) 不同调度策略下多播组的吞吐量仿真结果图。我们将所有 10 组多播组的结果均画出。在图中, x 轴表示系统多播组的标号 ID, y 轴表示每个多播组的在不同调度策略下的吞吐量。由仿真结果图可知, 对于每个多播组, 本文提出的 OMS 调度策略的获得的吞吐量要远远大于非机会调度策略 FR-RR 和

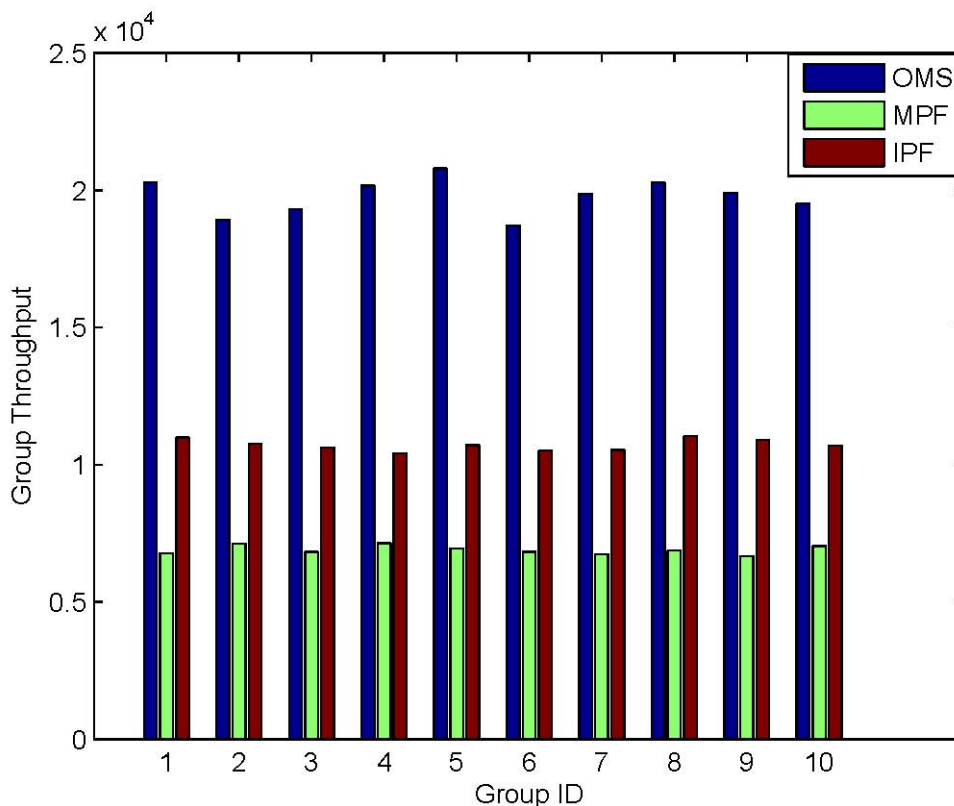


图 3-8 多播组吞吐量在 OMS、MPF 和 IPF 调度策略下的比较

Figure 3-8 Comparison of group throughput of the OMS algorithm with that of the MPF and IPF scheduling algorithm.

机会调度策略 MIN。FR-RR 调度策略因其绝对公平分享的特点使得不同多播组获得的吞吐量几乎一模一样。MIN 调度策略总是选择多播组中的最低速率进行，也就是对应的多播组中最差用户能够支持的速率进行传输来保证多播组内用户的公平性，因此 MIN 调度使得所有多播组的吞吐量都非常低。本文提出的机会多播调度策略，在保证用户之间公平性的情况下，充分利用信道条件的动态变化来最大化系统的吞吐量。

图 3-8 表示系统在本文提出的机会多播调度 (OMS) 策略和多播比例公平 (MPF) 调度策略以及组间比例公平 (IPF) 不同调度策略下多播组的吞吐量仿真结果图。由仿真结果图可知，对于每个多播组，本文提出的 OMS 调度策略获得的吞吐量要大于 MPF 调度策略和 IPF 调度策略。MPF 调度策略不考虑多播组吞吐量而在于平均用户之间的吞吐量。IPF 调度策略则主要考虑最大化多播组速率同时尽量使得多播组的最低速率保持相对较高。因此，MPF 调度策略不太可能获得跟 IPF 调度策略同样高的

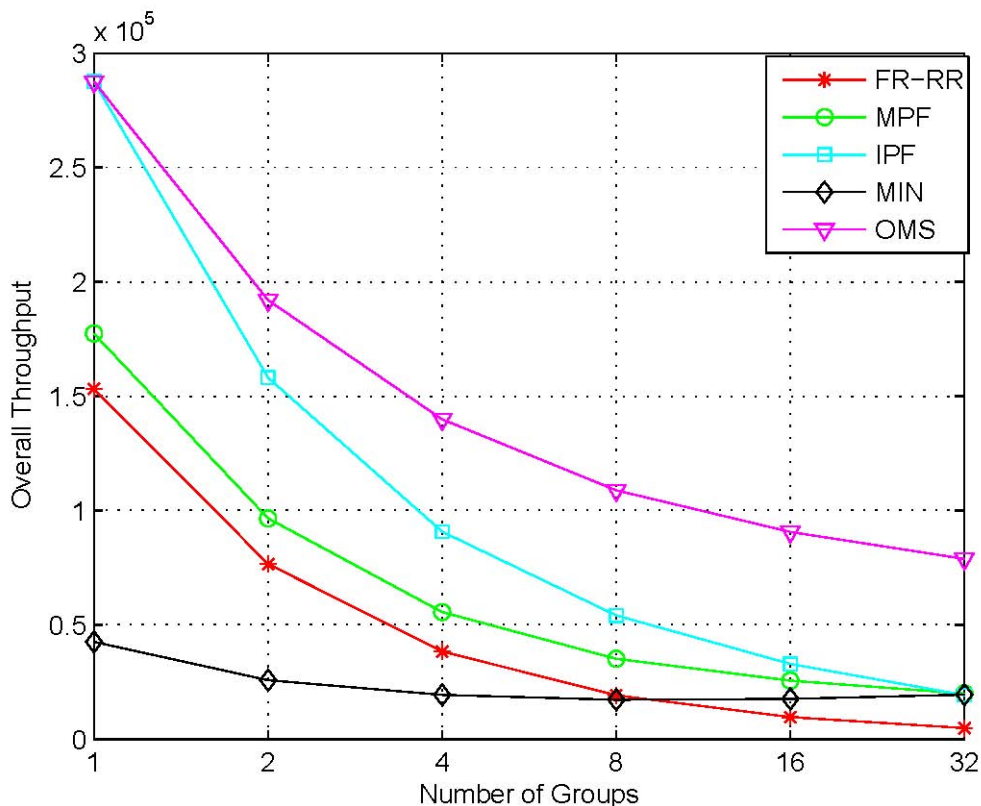


图 3-9 当多播组数从 1 增加到 32 同时保持总用户数为 32 不变时不同多播调度策略下多播组总吞吐量的对比

Figure 3-9 Comparison of overall throughput for various multicast scheduling algorithms as we increase the number of groups from 1 to 32 while fixing the total number of users to 32.

吞吐量。本文提出的机会多播调度策略在每个时隙动态地选择给定多播组中  $N_k$  个信道条件最好的用户，并且设定对应的最优传输速率。最优传输速率选择的是当前时隙下拥有最大累积速率的用户的多播组速率，因而，能够最大化系统的吞吐量。

在上述的仿真实验中，我们已经探究了每个多播组通过计算每个多播组累积用户吞吐量而得到的多播组吞吐量。在下面的部分中，我们将对多播系统在不同多播调度策略下系统总的吞吐量性能进行比较。在下面的仿真实验中，我们将基站服务的用户数固定在 32 个用户，然后将这些用户分成相同大小的多播组。每一个的场景设置可以用一个数组  $(n, g)$  表示，其中  $n$  表示多播组的个数， $g$  表示多播组的大小，即多播组用户个数。我们进行以下 6 组不同数组设置来进行仿真实验，分别是  $(n, g)$ :  $(1, 32)$ ,  $(2, 16)$ ,  $(4, 8)$ ,  $(8, 4)$ ,  $(16, 2)$ ,  $(32, 1)$ 。这样的设置得到的仿真实验结果能

够使我们观察到不同网络设置情景下的多播调度算法的吞吐量性能。

图 3-9 表示多播系统在不同多播调度策略下的总吞吐量仿真结果图。通过仿真结果图可知,明显地,本文提出的 OMS 调度策略在不同多播调度策略中实现了最高的系统总吞吐量。当系统中只有一个多播组时,本文提出的 OMS 调度策略和 IPF 调度策略表现一致,实现了相同总系统吞吐量。当系统中的多播组的个数为 32 时,也就是多播退化成单播的情形,在这种情形下,MPF、IPF 和 MIN 调度策略在单播情况下表现一致,获得相同的吞吐量。从图中明显可以看出,不论采用何种多播调度策略,当系统多播组的个数增加时,系统总的吞吐量下降。这是因为当系统总的用户数保持不变,而系统多播组个数增加时,系统逐渐退化成单播传输的情形。因此,多播传输的好处将逐渐减小,以至于系统总的吞吐量逐渐下降如图 3-10 所示。在单播情形下,我们看到 MPF, IPF 和 MIN 调度策略表现出相同的性能。整体而言,跟其他调度策略相比,我们观察可以得到 MPF 和 IPF 调度策略获得相对较好的吞吐量。同时,我们也观察到,当系统中多播组数目较小时,FR-RR 调度策略能够获得相对较好的总吞吐量,但是随着系统多播组数目的增加,FR-RR 调度策略的吞吐量性能急速下降。因为 FR-RR 调度策略以固定的速率服务系统中的所有用户,所以当系统中多播组数目增加时,FR-RR 使得多播组中所有的低速率用户都无法接收传输数据,因而系统的总吞吐量很小。因为 MIN 调度策略总是选择多播组中的最低速率进行,也就是对应的多播组中最差用户能够支持的速率进行传输来保证多播组内用户的公平性,因此 MIN 调度使得所有多播组的吞吐量都非常低。以上的仿真实验充分说明了本文提出的机会多播调度算法的良好性能。不论是多播系统的总吞吐量,还是系统中不同多播组的组吞吐量,本文提出的机会多播调度策略因为能动态选择多播组以及多播组传输速率,所以能在保证系统用户之间公平性的同时,更有效地利用用户信道条件的变化,最大化系统的吞吐量。

### 3.6 本章小结

本章对机会调度策略中比较重要的公平性问题进行梳理和详细的分析。首先对机会调度策略中的问题进行了介绍和分析,指出了公平性问题的重要性以及机会调度理论的性能和指标。随后介绍了现有的几种典型的机会调度算法,分析和总结了它们的优缺点和不同,比如是否考虑了组间公平和组内公平。然后针对现有算法在考虑组间公平和组内公平不足的基础上,提出了改进算法 OMS,详细介绍了 OMS 算法的系统模型、优化问题和 OMS 算法的性质。最后对 OMS 算法以及其他机会多播调度算法进行了仿真,给出了 OMS 算法和其他机会多播调度算法的仿真性能和分析。

## 第四章 机会多播调度应用设计

### 4.1 引言

随着人类对无线通信需求的日益增加,以无线通信方式提供多媒体服务越来越受到关注,手机电视以及可视电话会议等应用将在未来几年得到普及。对于高速率和高服务质量的多媒体传输,单播已经不能满足要求。在这种情况下,多播与广播被认为是提高频谱利用率的最有效的方式。为此,3GPP 与 3GPP2 均定义了多媒体广播多播服务,分别命名为 MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service, 多媒体广播多播业务) 和 BCMCS (Broadcast Multicast Service, 广播多播业务)。两者都在各自组织中得到了广泛讨论,并处于不断演进的过程中。广播多播服务的出现,使得向大量用户提供多媒体业务成为现实。其最大优点在于取代了原有多路单播及点对点 (PTP) 的连接模式而采用多播的传输模式。多播模式因其可将相同的数据内容发送给小区中的多个用户,避免了重复传输大量相同数据而造成的空中接口拥塞,极大地提高整个网络的资源利用率。因此,多播传输方式正日益成为多点无线通信中采用的传输方式。

多播传输方式中,基站发射机将相同的数据发送给小区中属于同一多播组的多个用户。在多播方式的每个传输时隙,基站发射机只能以同一个速率向小区中的一个多播组发送数据。在多播业务传输过程中,小区中存在多个多播组并且每个多播组中包含不同数目的用户。一般而言,属于同一多播组的不同用户随机分布在小区中不同位置,因此同一多播组中的不同用户经历不同的信道条件,从而支持的最大传输速率不同。当多播系统采用自适应调制和编码 (Adaptive Modulate and Coding, AMC), 用户设备能支持不同的传输数据速率。AMC 技术主要通过用户设备反馈测量的信道质量指示 (Channel Quality Indicator, CQI) 信息选择合适的传输速率。基站接收用户设备反馈的 CQI 等信息,然后通过 UE 反馈的 CQI 和各用户的数据传送需求,得到用户能够支持的最大传输速率,  $R_k^i(t)$  为多播组  $k$  中用户  $i$  能够支持的传输速率。

如果基站的数据传输速率高于用户设备当前时刻能够支持的最大传输速率, 则用户设备将无法接收到任何传输数据。由于同一多播组中的所有用户受限于基站选择的同一速率,因此基站对速率的选择与基站对多播组选择同等重要。如果基站选择较

高的传输速率，则多播组中许多用户将无法接收到传输数据；如果基站选择较低的传输速率，则不能充分利用支持高传输速率的用户的信道条件。因此，对于多播传输方式而言，基站调度必须在系统的吞吐量和用户的公平性两个方面取得折中，因此基站多播调度的核心在于选择合适的多播组以及选择合适的传输速率。传统的多播调度方法将传输速率固定在系统的默认速率值并且在所有多播组中进行轮询调度。系统的默认传输速率一般设置为最低的传输速率，即处于小区最边缘的用户能够处理的传输速率。现行的 CDMA2000 1xEV-DO 系统就是采用这种方式。这种策略在一定程度上保证了不同用户的公平性，但是这种策略无法充分利用不同用户的信道条件，尤其是那些靠近基站的信道条件较好的用户。

## 4.2 应用设计

本章针对现有技术存在的上述不足，提供一种基于机会主义原则的基站多播业务调度装置及其调度方法，基于机会主义原则选择多播组中归一化速率较高的部分用户作为考虑对象来确定传输速率，然后选择累计速率最大的多播组进行传输。机会主义的选择策略可以使得信道条件较好的用户接收到质量更高的数据服务；引入考虑了公平性的归一化速率可以使得所有用户接收到的服务水平得到保证。

根据本章的一个方面，提供一种基于机会主义原则的基站多播业务调度装置如图 4-1，包括用户信息收集处理模块、多播组速率计算模块、多播组调度传输模块和吞吐量更新模块，其中，

所述用户信息收集处理模块与所述多播组速率计算模块相连接，并用于向所述多播组速率计算模块传输多播用户分组信息以及每个用户当前时刻数据速率信息；

所述多播组速率计算模块与所述多播组调度传输模块相连接，用于根据所述多播用户分组信息以及每个用户当前时刻数据速率信息计算各个多播组所能获取的最大累计速率以及对应最优传输速率，并向所述多播组调度传输模块传输各个多播组所能获取的最大累计速率信息以及对应最优传输速率信息；

所述多播组调度传输模块与所述吞吐量更新模块相连接，用于根据所述各个多播组所能获取的最大累计速率信息确定该时刻能够享受传输服务的多播组并对其进行数据传输服务，同时向所述吞吐量更新模块传输该时刻享受传输服务的多播组标识及该多播组的对应最优传输速率；

所述吞吐量更新模块与所述用户信息收集处理模块相连，并用于根据所述该时刻传输的多播组及该多播组的最优传输速率，向所述用户信息收集处理模块传输更新后

各个用户当前的吞吐量信息。

根据本设计的另一个方面,还提供一种基于机会主义原则的基站多播业务调度装置的调度方法,包括以下步骤:

第一步:所述用户信息收集处理模块接收用户终端反馈数据速率信息,决定每个用户当前时刻能够支持的最大可行传输速率;

第二步:所述用户信息收集处理模块对于每一个多播组,计算该组当中每一个用户在该时刻的归一化速率,并按大小进行排序,然后挑选出部分归一化速率较高的用户构成用户子集;

第三步:所述多播组速率计算模块计算每个多播组在取不同用户子集时的传输速率及对应多播组累计速率,确定每个多播组能获取的最大累计速率及对应传输速率;

第四步:所述多播组调度模块选择所有多播组中累计速率最大的一组多播组在其对应最优传输速率下对其进行传输服务;

第五步:所述吞吐量更新模块更新多播组中每个用户在当前时刻的吞吐量。

具体地,本设计是通过以下技术方案实现的:

本设计涉及一种基于机会主义原则的基站多播业务调度装置,包括:用户信息收集处理模块、多播组速率计算模块、多播组调度传输模块和吞吐量更新模块,其中:用户信息收集处理模块与多播组速率计算模块相连接并传输多播用户分组信息以及每个用户当前时刻数据速率信息,多播组速率计算模块与多播组调度传输模块相连接并传输每个多播组的最优传输速率信息以及所能获取的最大累计速率信息,吞吐量更新模块与用户信息收集处理模块相连并传输更新后各个用户当前的吞吐量信息。

所述的用户信息收集处理模块包括基站多播系统的一部分,用于接收用户设备发送的反馈信息,并且得到用户能够支持的最大传输速率;基站多播系统采用自适应调制编码技术(AMC),用户设备能支持不同的传输数据速率。自适应调制编码技术主要通过用户设备反馈测量的信道质量指示(CQI)信息选择合适的传输速率。基站接收用户设备反馈的信道质量指示等信息,然后通过用户设备反馈的信道质量指示和各用户的数据传送需求,得到用户能够支持的最大传输速率(下标表示多播组ID,上标为多播组内用户ID,表示该时刻,下同)。通过从吞吐量更新模块中获取的用户吞吐量来计算得出归一化速率,并进行排序。该模块中还包括存储器单元(比如RAM存储器)以进行多播业务多播组的信息管理,即将各个多播组的分组信息及用户的速率信息输入到多播组速率计算模块;

所述的多播组速率计算模块包括处理器单元(比如一个中央处理器CPU)以计算每个多播组在取不同用户子集时的传输速率及对应多播组累计速率,确定每个多播

组能获取的最大累计速率及对应传输速率；

所述的多播组调度模块包括调度器单元并根据多播组速率计算模块提供的各个多播组的最优传输速率及累计速率最大的多播组，决定该时刻传输的多播组及该多播组的最优传输速率。

所述的吞吐量更新模块包括存储器单元（比如 RAM 存储器）以更新每一时刻每个用户的吞吐量，并在更新后将每个用户的吞吐量信息反馈给用户数据收集处理模块。

本设计涉及上述系统的调度方法，包括以下步骤：

第一步：接收用户终端反馈数据速率信息，基站决定每个用户当前时刻能够支持的最大可行传输速率；

第二步：对于每一个多播组  $k$ ，计算该组当中每一个用户  $i$  在该时刻  $t$  的归一化速率  $r_k^i(t) = R_k^i(t) / T_k^i(t)$ ，并进行排序  $r_k^{(1)}(t) \geq \dots \geq r_k^{(N_k)}(t) \geq \dots \geq r_k^{(S_k)}(t)$ ， $S_k$  为多播组  $k$  中的用户数。然后挑选出  $\lfloor \alpha S_k \rfloor = N_k$  个归一化速率最高的用户构成用户子集  $L_k^{N_k}(t) = \{l_k^1, \dots, l_k^{N_k}\}$ ，其中  $\alpha$  为比例系数；

第三步：计算每个多播组在取不同用户子集时的传输速率  $r_k(t) = \min_{l \in L_k^{N_k}(t)} R_k^l(t)$  及对应多播组累计速率  $U_k(t) = \sum_{i=1}^{S_k} r_k(t) \mathbf{1}_{\{R_k^i(t) \geq r_k(t)\}}$ ，确定每个多播组能获取的最大累计速率及对应传输速率；

第四步：选择所有多播组中累计速率最大的一组多播组在对应最优传输速率下进行传输；

第五步：更新多播组中每个用户在当前时刻的吞吐量，具体为：第  $k$  组第  $i$  个用户在  $t+1$  时刻的平均吞吐量由下式进行更新

$$T_k^i(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k^i(t) + \frac{1}{t_c} r_k(t) I_k^S(t) l_i^S(t),$$

其中： $T_k^i(t+1)$  表示第  $k$  组第  $i$  个用户在  $t+1$  时刻的平均吞吐量， $t_c$  表示时延时间尺度为时隙数， $T_k^i(t)$  表示第  $k$  组第  $i$  个用户在  $t$  时刻的平均吞吐量。当第  $k$  组被选择进

行传输时,  $I_k^S(t)=1$ ; 否则  $I_k^S(t)=0$ 。当第  $i$  个用户接收到数据传输时,  $I_i^S(t)=1$ ; 否则  $I_i^S(t)=0$ 。

### 4.3 机会多播调度

本应用设计多播系统的基站分布在小区中央, 基站多播系统采用时分复用的工作方式, 在每一个时隙只有一组用户接收数据。基站多播系统采用自适应调制编码技术 (AMC), 用户设备能够支持不同的传输数据速率。自适应调制编码技术主要通过用户设备反馈测量的信道质量指示 (CQI) 信息选择合适的传输速率。基站接收用户设备反馈的信道质量指示等信息, 根据用户设备反馈信息进行信道预测, 然后根据信道预测结果在每个调度周期更新调制编码方式, 决定用户当前时隙能够支持的最大传输速率  $R_k^i(t)$ 。不同多播组中的所有用户必须监测自己的信道情况, 并在每个时隙将信道质量指示等信息反馈给基站, 基站通过用户设备反馈的信道质量指示信息, 得到用户能够支持的最大传输速率  $R_k^i(t)$ 。基站根据所有用户提供的最大速率信息  $R_k^i(t)$ , 计算每个多播组在取不同用户子集时的传输速率及对应多播组累计速率, 确定每个多播组能获取的最大累计速率及对应传输速率。根据每个多播组所能获取的最大累计速率来确定每个时隙选择传输的多播组以及该多播组用于传输的速率。基站多播系统可以在一个时隙或多个时隙进行调度。

采用上述的技术解决方案, 基站接收用户设备反馈的信道质量指示等信息, 然后通过用户终端反馈的信道质量指示和各用户的数据传送需求, 得到用户能够支持的最大传输速率, 多播调度器通过本发明提出的计算每个多播组在不同用户子集下的传输速率及多播组累计速率的方法, 确定每个时隙选择传输的多播组以及该多播组用于传输的速率, 在保证各个用户公平性的基础上, 让信道条件较好的用户接收到质量更高的数据服务来提高多播业务的吞吐量。

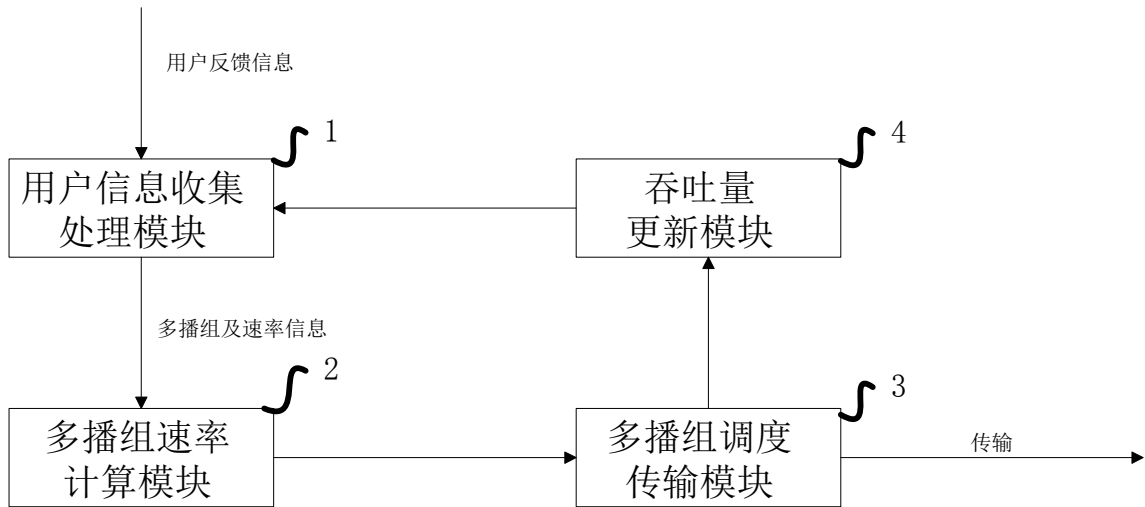


图 4-1 基于机会主义原则的基站多播业务调度装置的结构示意图

Figure 4-1 Opportunistic Multicast scheduler with fairness constraints

下面对本设计的实施例作详细说明，以下实施例在以本设计技术方案为前提下进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程，但本设计的保护范围不限于下述的实施例。

如图 4-1 所示，在本设计的一个实施例中，所述基于机会主义原则的基站多播业务调度装置包括用户信息收集处理模块 1、多播组速率计算模块 2、多播组调度传输模块 3 和吞吐量更新模块 4，其中，所述用户信息收集处理模块 1 与多播组速率计算模块 2 相连接，并用于向所述多播组速率计算模块 2 传输多播用户分组信息以及每个用户当前时刻数据速率信息；所述多播组速率计算模块 2 与多播组调度传输模块 3 相连接，用于根据所述多播用户分组信息以及每个用户当前时刻数据速率信息计算各个多播组所能获取的最大累计速率以及对应最优传输速率，并向所述多播组调度传输模块 3 传输各个多播组所能获取的最大累计速率信息以及对应最优传输速率信息；所述多播组调度传输模块 3 与吞吐量更新模块 4 相连接，用于根据所述各个多播组所能获取的最大累计速率信息确定该时刻能够享受传输服务的多播组并对其进行数据传输服务，同时向所述吞吐量更新模块 4 传输该时刻享受传输服务的多播组标识及该多播组的对应最优传输速率；所述吞吐量更新模块 4 与用户信息收集处理模块 1 相连，并用于根据所述该时刻享受传输服务的多播组及该多播组的最优传输速率，向所述用

户信息收集处理模块传输更新后各个用户当前的吞吐量信息。

所述用户信息收集处理模块 1 包括基站多播系统的用户信息收集处理单元,用于接收用户设备发送的反馈信息,并且得到用户能够支持的最大传输速率;基站多播系统采用自适应调制编码技术(AMC),用户设备能支持不同的传输数据速率。自适应调制编码技术主要通过用户设备反馈测量的信道质量指示(CQI)信息选择合适的传输速率。所述用户信息收集处理模块 1 接收用户设备反馈的信道质量指示等信息,然后通过用户设备反馈的信道质量指示和各用户的数据传送需求,得到用户能够支持的最大传输速率。通过从所述吞吐量更新模块 4 中获取的用户吞吐量来计算得出归一化速率,并按组进行排序。所述用户信息收集处理模块 1 中还包括存储器单元(比如 RAM 存储器)以进行多播业务多播组的信息管理,即将各个多播组的分组信息及用户的速率信息输入到所述多播组速率计算模块;

所述多播组速率计算模块 2 包括处理器单元(比如一个中央处理器 CPU)以计算每个多播组在取不同用户子集时的传输速率及对应多播组累计速率,确定每个多播组能获取的最大累计速率及对应传输速率;

所述多播组调度模块 3 包括调度器单元,用于根据所述多播组速率计算模块 2 提供的各个多播组所能获取的最大累计速率,决定该时刻能够享受传输服务的多播组并在其对应最优传输速率下对其进行传输服务。

所述吞吐量更新模块 4 包括存储器单元(比如 RAM 存储器)以更新每一时刻每个用户的吞吐量,并在更新后将每个用户的吞吐量信息反馈给用户数据收集处理模块。

如图 4-2 所示,在本发明的另一个实施例中,所述基于机会主义原则的基站多播业务调度装置本装置的调度方法包括如下步骤:

第一步:所述用户信息收集处理模块 1 接收用户终端反馈数据速率信息,决定每个用户当前时刻能够支持的最大可行传输速率;

第二步:所述用户信息收集处理模块 1 对于每一个多播组  $k$ , 计算该组当中每一个用户  $i$  在该时刻  $t$  的归一化速率  $r_k^i(t) = R_k^i(t) / T_k^i(t)$ , 并进行排序

$r_k^{(1)}(t) \geq \dots \geq r_k^{(N_k)}(t) \geq \dots \geq r_k^{(S_k)}(t)$ ,  $S_k$  为多播组  $k$  中的用户数。然后挑选出  $\lfloor \alpha S_k \rfloor = N_k$  个归一化速率最高的用户构成用户子集  $L_k^{N_k}(t) = \{l_k^1, \dots, l_k^{N_k}\}$ , 其中  $\alpha$  为比例系数;

第三步: 所述多播组速率计算模块 2 计算每个多播组在取不同用户子集时的传输速率  $r_k(t) = \min_{l \in L_k^{N_k}(t)} R_k^l(t)$  及对应多播组累计速率  $U_k(t) = \sum_{i=1}^{S_k} r_k(t) 1_{\{R_k^i(t) \geq r_k(t)\}}$ , 确定每个多播组能获取的最大累计速率及对应最优传输速率;

第四步: 所述多播组调度模块 3 选择所有多播组中累计速率最大的一组多播组在其对应最优传输速率下对其进行传输服务;

第五步: 所述吞吐量更新模块 4 更新多播组中每个用户在当前时刻的吞吐量, 具体为: 第  $k$  组第  $i$  个用户在  $t+1$  时刻的平均吞吐量由下式进行更新

$$T_k^i(t+1) = \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k^i(t) + \frac{1}{t_c} r_k(t) I_k^S(t) l_i^S(t),$$

其中:  $T_k^i(t+1)$  表示第  $k$  组第  $i$  个用户在  $t+1$  时刻的平均吞吐量,  $t_c$  表示时延时间尺度为时隙数,  $T_k^i(t)$  表示第  $k$  组第  $i$  个用户在  $t$  时刻的平均吞吐量。当第  $k$  组被选择进行传输时,  $I_k^S(t) = 1$ ; 否则  $I_k^S(t) = 0$ 。当第  $i$  个用户接收到数据传输时,  $l_i^S(t) = 1$ ; 否则  $l_i^S(t) = 0$ 。

第八步: 在每一个时隙重复上述步骤来选择多播组和相应的传输速率。

本实施例的用户归一化速率  $r_k^i(t) = R_k^i(t) / T_k^i(t)$  基于公平性原则, 如果用户的  $T_k^i(t)$  值较小, 也就意味着用户当前吞吐量较小, 那么  $1/T_k^i(t)$  的值将会较大, 从而意味着该用户能够对所属多播组的最优传输速率选择产生更大的影响。同时, 对于每一个多播组而言, 基于机会主义原则选择多播组中归一化速率较高的部分用户作为考虑对象来确定传输速率, 然后选择累计速率最大的多播组进行传输。机会主义的选择策略可以使得信道条件较好的用户接收到质量更高的数据服务。因此本实施例的多播调度方法能够在不损害任何一个多播组及其用户的性能的情况下, 使得每个多播组获得

比固定速率轮询调度方法更高的吞吐量，从而既保证了各个多播组中用户的公平性，又大大提高了整个多播系统的吞吐量。

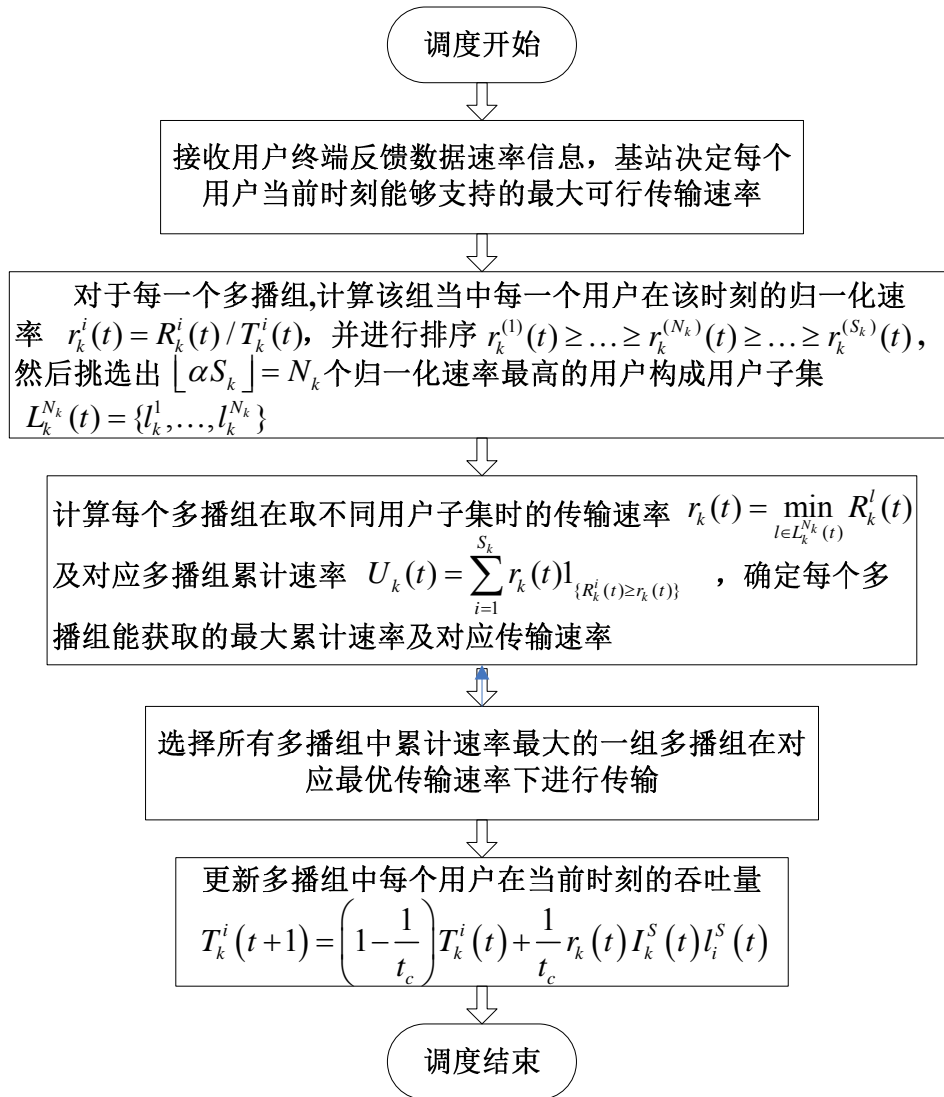


图 4-2 基于机会主义原则的基站多播业务调度装置的调度方法的流程图。

Figure 4-2 Opportunistic Multicast Scheduling flowcharts

## 4.6 本章小结

本章讨论了机会多播调度的应用设计。该应用设计提供一种基于机会主义原则的

基站多播业务调度装置本装置，包括用户信息收集处理模块、多播组速率计算模块、多播组调度传输模块和吞吐量更新模块。还提供一种相应的调度方法。本应用设计基于机会主义原则选择多播组中归一化速率较高的部分用户作为考虑对象来确定传输速率，然后选择累计速率最大的多播组进行传输。机会主义的选择策略可以使得信道条件较好的用户接收到质量更高的数据服务；引入考虑了公平性的归一化速率可以使得所有用户接收到的服务水平得到保证。

## 第五章 总结与展望

本文在总结和借鉴前人研究成果的基础上,对无线网络的机会多播调度算法和应用设计进行了梳理。本文重点研究了基于比例公平原则的机会多播调度问题,给出了机会多播调度优化问题,并且阐述了本文提出的基于比例公平原则的机会多播调度算法的最优性质和机会性质。本文的主要贡献有以下几个方面:

1. 提出了一种基于比例公平原则的机会多播调度算法,该算法提出的机会多播调度原则选择比多播组中用户要求的最低速率略高一些的速率作为传输速率,每个多播组的最优传输速率是基于比例公平原则,根据多播用户当前的信道数据速率和吞吐量来选择的,从而实现多播用户吞吐量和公平性的平衡。该算法在保证多播用户间的公平性的同时充分利用时变信道条件来更有效地使用整个系统的频谱资源,最大化多播系统的吞吐量。
2. 证明了机会多播调度算法的多播组选择策略的优化目标函数的最优解和该调度算法的机会性质,该机会多播调度器在满足多播系统资源公平性约束条件下,最大化多播系统所有多播组的总效用函数,并且证明了本文提出的机会多播调度策略与相对应的非机会多播调度策略相比提高了每个多播组的效用函数。
3. 从机会多播调度应用设计的层面考虑,提供一种基于机会主义原则的基站多播业务调度装置及其调度方法,基于机会主义原则选择多播组中归一化速率较高的部分用户作为考虑对象来确定传输速率,然后选择累计速率最大的多播组进行传输。

机会多播调度的实际应用仍面临着不少的挑战,大多数关于机会多播调度算法的研究仍然偏理论性,难与实际的应用结合;在硬件系统方面,适合实际应用的研究,可操作性强的平台方案也比较缺乏,本文在这个领域中做了一些小小的尝试。但是,本文提供的机会多播调度算法在多用户并且信道差异较大的情况上研究还不够,调度算法的复杂度也过高,如果能在这两方面有所提高,应该会使机会多播调度算法的网络资源利用更高效,多播系统吞吐量能获得更好的提升。相信不久的将来,随着调度和编码等相关技术不断发展,并在实际应用中有所突破,能够更有效地利用可用频谱资源,让人们有机会享受到更多的无线应用。

## 参 考 文 献

- [1] 3GPP TS 23.246, Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Architecture and functional description, Dec. 2009
- [2] 3GPP2 X.S0022-A, Broadcast and Multicast Service in cdma2000 Wireless IP Network, Feb. 2007.
- [3] 3GPP TS 25.848 v4.0.0. Physical Layer Aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access [S]. 3GPP, 2001.
- [4] 3GPP2 C. S0024 v4.0. CDMA 2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification [S]. 3GPP2, 2002.
- [5] P.Agashe, R. Rezaiifar, and P. Bender, "CDMA2000 high rate broadcast packet data air interface design", IEEE Commun. Mag., pp. 83-89, Feb. 2004.
- [6] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR: a bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users," IEEE Commun. Mag., vol. 38, no. 7, pp. 70-77, July 2000.
- [7] 3GPP, "High speed downlink packet access (HSDPA): overall description," Mar. 2003. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>
- [8] F. P. Kelly, A. K. Maulloo, D. K. H. Tan, "Rate control for communication networks:shadow prices,proportional,fairness and stability", Journal of the Operational Research Society, 1998, 49, 237-252.
- [9] S. C. Liew, Y. J. Zhang, "Proportional fairness in multi-channel multi-rate wireless networks",in Proc. of IEEE Globecom, San Francisco, CA, USA, 2006, 1-6.
- [10] D. Tse, S. Hanly, "Multi access fading channels: Part I: polymatroid structure, optimal resource allocation and throughput capacities", IEEE Trans. on Information Theory, 1998, 44(7), pp. 2796 - 2815.
- [11] S. Hanly, D. Tse, "Multi access fading channels: Part II: Dealy limited capacities", IEEE Trans. on Information Theory, 1998, 44(7), pp. 2816 - 2831.
- [12] R. Knopp, P. Humblet, "An information capacity and power control in single cell multi-user communications", in Proc. of IEEE ICC, Seattle, 1995, 331 – 335.
- [13] M Andrews A survey of scheduling theory in wireless data networks 2005

- [14] P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, 2002.
- [15] R. Agrawal, V. Subramanian, "Optimality of certain channel aware scheduling policies", 2002
- [16] H. Kushner, P. Whiting, "Asymptotic properties of proportional-fair sharing algorithms", 2002
- [17] A. Stoyar, "On the asymptotic optimality of the gradient scheduling algorithm for multiuser throughput allocation", 2005
- [18] J. Roberts, L. Massoulie, "Bandwidth sharing and admission control for elastic traffic", 2000(1-2)
- [19] G. De Veciana, T. J. Lee, T. Konstantopoulos, "Stability and performance analysis of networks supporting services with rate control-Could the Internet be unstable", 1999
- [20] T. Bonald, L. Massoulie, "Impact of fairness on Internet performance", 2001
- [21] J. Holtzman, "CDMA forward link waterfilling power control", 2000
- [22] S. C. Borst, "User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks" 2003
- [23] S. C. Borst, "User-level QoS and traffic engineering for 3G wireless 1xEV-DO systems", 2003
- [24] R. Litjens, "HSDPA flow level performance and the impact of terminal mobility", 2005
- [25] M. Luby, M. Watson, T. Gasiba, T. Stockhammer, and W. Xu, "Raptor codes for reliable download delivery in wireless broadcast systems," in *Proc. 3rd IEEE Consumer Commun. Netw. Conf.*, Las Vegas, NV, Jan. 2006, pp. 192-197.
- [26] D. J. C. MacKay, "Fountain codes," *IEE Proc.-Commun.*, vol. 152, pp. 1062-1068, Dec. 2005
- [27] J. W. Byers, M. Luby, M. Mitzenmacher, "A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data", in *Proc. of the ACM SIGCOMM'98 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, Canada, Vancouver 1998, 28 (4) :56 - 67. I.
- [28] M. Luby. "L. T. Codes", in *Proc. of the 43rd Annu. IEEE Symp. Foundations of Computer Science (FOCS) [C]*. Canada, Vancouver, Nov. 2002. 71 - 280.
- [29] A. Shokrollahi, "Raptor codes", *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52 (6) :2551 - 2567.
- [30] H. Won, H. Cai, D. Y. Eun, K. Guo, A. Netraveli, I. Rhee, and K. Sabnani, "Multicast scheduling in cellular data networks," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 8, no. 9, pp. 4540-4549, Sept. 2009.
- [31] U. C. Kozat, "On the throughput capacity of opportunistic multicasting with erasure codes," in *Proc. IEEE INFOCOM'08*, Phoenix, AZ, May 2008, pp. 520-528.
- [32] H. Kushner and G. Yin, *Stochastic Approximation Algorithms and Applications*. New York: Springer-Verlag, 1997.
- [33] I. J. Wang, E. K. P. Chong, and S. R. Kulkarni, "Weighted averaging and stochastic approximation," *Math. Contr. Signals. Syst.*, vol. 1, no. 10, pp.41-60, 1997.

## 致 谢

本文需要感谢我的导师王新兵教授对我的谆谆教诲和悉心培养。与王老师相处的这三年，被王老师对于科研工作的激情所深深感染，同时对于王老师执着于世界级顶尖研究的信念所深深折服。王老师丰富的科研经历和勤奋的科研态度深深地影响了我，使我能够坚持完成自己的毕业设计研究工作和相关的论文。

从成为老师的学生开始，王老师就一直给我极大的自由，鼓励着我做各种自己热爱的事情。研二开始，更是全力支持我去追求自己的梦想，从来没有阻拦我走自己的路，而且还在一些关键时候给了我极大的支持和帮助。真的，不管以后有没有出息，第一个要感谢的就是王老师。

一直以来非常佩服老师，被他的激情和努力深深鼓舞和感动。王老师就是一个典型的“中国梦”的故事，用自己多年从早到晚的努力做出了成绩，走到了今天。现在，依然一如既往地努力工作着。我相信，能够像老师这样执着努力追求梦想，就一定有机会成功。

能够成为王老师的学生，真是我的幸运。如果不是老师一直的理解和支持，今天我不可能有机会追求自己的梦想。感谢老师一路的理解支持，祝福老师！在此，再一次向王老师表达最诚挚的谢意！

同时我还要感谢俞晖老师在科研和项目上对我的细心帮助，俞晖老师在科研项目和个人选择上给了我极大的支持和理解，感谢俞老师！

感谢和我一起走过这三年的同学和朋友们，感谢他们一直以来对我的支持和鼓励。还要感谢我的父母，谢谢你们对我无微不至的照顾以及对我学习的支持，我将以优秀的学业和今后出色的工作回报你们。

最后，衷心感谢所有参加论文评审和对本文提供宝贵意见的各位专家、教授以及老师们。

## 攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] Wei Liu, Lingchen Zhu, Xinbing Wang, Hui Yu, Mohsen Guizani, “Opportunistic Multicast Scheduling With Resource Fairness Constraints in Cellular Networks”, Proceeding of IEEE ICC 2011, Kyoto, Japan, April 2011

# 上海交通大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

刘伟

日期：2011年12月30日

# 上海交通大学 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密口，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

刘伟

指导教师签名：

王新良

日期：2011年12月30日

日期：2011年12月30日