

# 目录

<b>1</b>	<b>绪论</b>	<b>3</b>
1.1	研究背景与意义 . . . . .	3
1.2	无线资源管理与网络MAC层控制的研究进展 . . . . .	8
1.2.1	呼叫接纳控制的研究现状 . . . . .	9
1.2.2	切换控制的研究现状 . . . . .	10
1.2.3	存在的问题 . . . . .	12
1.3	论文主要研究的内容与组织结构 . . . . .	12
1.3.1	本文的主要研究内容 . . . . .	12
<b>2</b>	<b>基于视频特性的呼叫接纳控制方案研究</b>	<b>15</b>
2.1	引言 . . . . .	15
2.2	CAC的调度模型 . . . . .	16
2.3	QoS的测量与带宽分配 . . . . .	16
2.4	数据链路层上视频流的QoS水平的度量 . . . . .	17
2.4.1	优化的资源分配方案 . . . . .	18
2.5	提出的CAC方案 . . . . .	21
2.6	仿真实验与结果 . . . . .	22
<b>3</b>	<b>高速移动用户的无线网络基站切换算法</b>	<b>29</b>
3.1	引言 . . . . .	29
3.2	基站切换与移动台的移动性分析 . . . . .	31
3.2.1	切换的流程 . . . . .	31
3.2.2	切换成功概率与误比特率的关系分析 . . . . .	31
3.2.3	切换成功概率与移动台速度的关系 . . . . .	33
3.3	高速移动下的切换方案 . . . . .	35
3.4	仿真实验与结果 . . . . .	37
3.5	小结 . . . . .	38
<b>4</b>	<b>结论与展望</b>	<b>39</b>
4.1	论文总结 . . . . .	39
4.2	研究展望 . . . . .	39
	<b>其他</b>	<b>40</b>
	<b>致 谢</b>	<b>40</b>
	<b>参考文献</b>	<b>43</b>



# 1 绪论

## 1.1 研究背景与意义

二十一世纪以来，电子通信技术领域发生了许多重大的变化。其中包括传统的固定电话网络，包交换网络，高速局域网，以及无线移动通信网络。从无线通信网络使用的技术来看，早期的模拟蜂窝网络已经完全被数字通信网络所代替。同时，无线数据终端的类型也日趋多样，包括移动电话、普通台式计算机、笔记本电脑或平板电脑。而且，它们所使用的数字通信技术也多种多样，包括GPRS，CDMA，WCDMA，OFDM等等。与此同时，互联网（Internet）所承载的内容也发生了重大变化，从单一的文字或低分辨率的图片发展为集交互性与实时性并重的多媒体内容。由于互联网的发展，使得人们对于通过无线数字通信技术来连接互联网的要求成为了现实中迫在眉睫的问题。从而，使得无线通信技术所承载的业务也从单一的话音数据走向多媒体数据。并且，这一趋势使得无线通信网络的发展趋势与互联网的发展密不可分。

从技术的角度讲，如何研发并成功布署一个无线宽带网络对技术而言，面临着很多旧的和新的问题。

为了能够满足用户的对多媒体数据业务的需求，无线宽带系统必须能够承载每秒数兆比特流的数据到每一个终端用户。同时还可以支持用户的不同的服务质量（Quality of Service, QoS）的要求，能够区分不同的业务，例如，话音、数据、视频和多媒体等等。目前，有线宽带技术在室内已经比较好地支持多媒体业务运营。所以，人们希望无线移动宽带技术也能够空中将有线宽带所能支持的业务承担起来，把各种业务的数据通过空中接口发送到用户的移动电话、笔记本电脑、平板电脑或是其它的移动终端上。用户对无线宽带技术与有线宽带技术一样，在服务质量、可靠性与安全性上都希望能得到保证。为了能满足这些严格的要求，无线宽带技术的发展面临着一些技术上的关键点：

- 在一个不确定性的无线空间环境中，可靠的数据发送及接收方案。
- 在有限的无线频谱资源与多样且大量宽带业务之间作出平衡。
- 同时支持不同服务质量要求的多个业务流。
- 支持无缝的小区或基站切换和漫游技术。
- 针对电池供电的设备的低功耗技术。
- 可靠的数据安全技术。
- 兼容基于IP协议的应用，保证可快速且低成本的布署。

在处理这些技术难点时，往往是会出现这种情况：改善了一个技术指标的同时，又把另一个技术指标中问题恶化了。比如，系统容量与覆盖范围就是这样一对矛盾。所以，设计无线宽带系统时，要综合考虑各种相互矛盾的因素，而后做出适当的平

衡。通常可归纳为以下四个大的方面的挑战：无线信道、频谱稀缺、服务质量和移动性。

### 1) 无线信道

对于宽带无线技术，最基本的技术挑战是传输介质本身。在有线通信信道中，一个物理实体的连接，例如同轴线缆或是光纤，将信号从发送端传递到接收端。而在无线的传输环境中，信号的传递依赖于一个比有线环境复杂得多的空间电波传播机制。对于大多数的无线应用需要在不可视距（Non Line of Sight, NLOS）环境下传递信号。在传播的过程中，大大小小的物体，距离上的远近，发送端与接收端之间的相互运动，以及空间中电波噪声干扰等等都会影响信号的传递过程。因此在设计一个在此条件下工作良好的数字通信系统，同时要满足数据传输的高速率以及发送端与接收端相互运动的高速度，对研究者而言，是一个艰难的挑战。对于宽带无线信道，有着以下的技术难点：

- (1) 不可视距下的路径传播损耗（Path loss）：在不可视距下，接收端的信号功率随距离衰减的速度比可视距下会更快。接收信号的功率会受到天线的高度、地形等因素的影响。这种影响，一般也称作损耗，指的是无线电磁波在传输过程中由于传输介质的因素而造成的损耗。在固定电话通信等有线通信的过程中也有路径损耗，它们的路损是由于传输过程中，传输介质所引起的衰耗。
- (2) 阴影效应（Shadow Effect）：在无线通信系统中，移动台在运动的情况下，由于大型建筑物和其他物体对电波的传输路径的阻挡，会在传播接收区域上形成半盲区，从而形成电磁场阴影。这种随移动台位置的不断变化而引起的接收点电磁场强度起伏变化的现象叫做阴影效应。阴影效应是产生慢衰落的主要原因。慢衰落使信号严重衰减，这也是在通信技术发展中要克服的重要问题之一。
- (3) 多径衰落（multipath fading）：由于通信地面站天线波束较宽，受地物、地貌和海况等诸多因素的影响，使接收机收到经折射、反射和直射等几条路径到达的多个电磁波信号，这种现象就是多径效应。这些不同路径到达的电磁波射线相位不一致且具有时变性，导致接收信号呈衰落状态；这些电磁波射线到达的时延不同，又会导致码间干扰。若此多条射线强度较大，且时延差不能忽略，则会产生误码。这种误码靠增加发射功率是不能消除的，因而我们把多径效应产生的衰落叫多径衰落。它也是产生码间干扰的根源。对于数字通信质量产生十分严重的影响。
- (4) 码间干扰（intersymbol interference, ISI）：在多径的环境下，无线信号延不同的路径到达接收端。如果此时的时间延迟较大或者说这个时间延迟已经占了传输信号符号周期的一部分，那么这个传输信号也许会在下一个符号周期内被接收端收到。这就影响了下一符号的接收。在高数据率通信中，每个传输码的时间短，一个小的时间延迟也会造成码间干扰。对于宽带无线通信而言，它技术难度很大。均衡化是解决这个问题的传统方法，但需要消耗更多功率。OFDM技术近十年来的发展，在这个问题解决起来很大的作用。但是，另一方面，在发送机与接收机之间的相对运动会造成频率扩散（多普勒扩散）。

多普勒扩散的产生又与运动的速度与载波频率相关。所以，对于宽带系统，它又使得信噪比的下降 (Signal-to-noise ratio, SNR)，进而增大载波恢复和同步的困难。这所让此问题成为了一个重要的技术难点。

- (5) 噪声：加性高斯白噪声 (Additive white Gaussian noise, AWGN) 在所有的通信信道中都存在。在接收端的热噪声的大小与带宽是成正比的。所以，宽带通信的噪声基底比传统的窄带通信的噪声基底高很多。较高的噪声基底并伴随着较大的路径损失会使宽带系统的覆盖范围减小。
- (6) 其它干扰：由于可用的频谱资源有限，用户需要共享。不同用户之间的使用也会造成相互的干扰。在一个以系统容量为驱动的网络中，这种干扰有时会比噪声造成的影响更大。

## 2) 频谱的稀缺

宽带无线通信所遇到的第二个大的问题是无线频谱资源的稀缺。因为世界各国的无线电管理部门对无线电的频谱的管理十分严格，且只分配给一段有限的频谱资源用来商用或民用。所以，无线的宽带系统设计与研究就必须面临这一问题：高效地使用有限的无线电频谱资源来容纳数量日益增长的用户和各式各样的宽带应用。

高效利用频谱的最基本的方法是在地理上构建蜂窝结构，与在技术上采用频率复用技术。通过降低发射机发射功率来限制基站的覆盖范围。再通过布署多个低功率的基站来达到较大范围的地理覆盖。每一个基站覆盖一个小区 (cell)。每一个小区可再通过定向天线技术划分为多个扇区。通常，一组小区或扇区构成一个簇。可利用的频谱被分配到簇内的小区或扇区中。从而，可以减少相互之间的干扰。各个簇之间可以复用相同的频率，也称为频率复用技术。为了达到较大容量和高效的频谱利用率，频率复用必须最大化。然而，前面所说到的矛盾，增加了复用率会导致严重的电波干扰。所以，设计一个可靠的传输和接收方案，支持低信噪比的传输环境，并能够抗干扰的方法是当前的研究重点。其中，多天线技术，是目前抗干扰技术中的研究热点。

除了使用蜂窝结构和最大化频率复用，另外的一些技术也可用来提高频谱的利用率和系统的容量。

- (1) 自适应调制编码 (Adaptive modulation and coding, AMC)：因为不同的用户或每个数据包当前的传输环境都可能不同，所以可以相应地改变其数据的调制与编码方式。通过选择那些高阶的调制方法或编码方法，来提高用户的传输效率提高或增大系统容量。
- (2) 空间复用：这个思想是通过多个天线将多个不相关的数据流同时发送出去，接收机也相应地使用多个接收天线和相应的信号处理方法来还原数据。只要不同的天线对应的信道的相关性很小，在整个传输过程中，数据完整性和可靠性就可得到保证。
- (3) 有效的多路访问技术：除了尽可能让每一个用户尽可能充分利用频谱资源，设计有效的方法来让多个用户共享资源也是十分重要的。这部分的工作目前主要集中在MAC层。通过交叉层的用户信息与数据信息的交换，也可以使得资源的

表 1.1: 典型宽带应用的各项QoS参数比较

参数	交互式游戏	语音	流媒体	普通数据	视频
速率要求	50Kbps-85Kbps	4Kbps - 64Kbps	5Kbps-384Kbps	10Kbps-100Mbps	> 1Mbps
现实应用	交互式游戏	VoIP	在线音乐， 在线视频， 语音聊天	网页访问， 电子邮件， 即时通信， 文件下载	IPTV，P2P的 视频共享
传输特点	实时	实时连续	连续有突发	非实时，有 突发流	连续
丢包要求	不允许	< 1%	声音< 1%， 视 频< 2 – 5%	不允许	< 0.1%
延时抖动	< 20毫秒	< 20毫秒	< 2秒	N/A	< 2秒
延时要求	< 50–150毫 秒	< 100毫秒	< 250毫秒	< 1 – 10秒	< 100毫秒

利用率提高。本论文的工作会主要集中在这一方面。如果只是从技术角度寻求频谱的利用率与系统容量的简单方法而言，减小基站覆盖半径和增加基站数目就可以满足这一要求。但是实际应用中，对于一个商业通信系统，这种简单的方法成本过于昂贵。因此，通过充分挖掘系统本身的能力，以及对各个系统参数（如系统容量或覆盖范围）的折衷方案的使用，才能在一个可行的成本下，提供给用户满意的通信服务。

3) 服务质量

服务质量（QoS）从概念上泛指为多个用户提供通信服务的效果。如果从通信技术的系统指标上讲是指吞吐量（throughput），数据包的差错率（packet error rate），时间延迟（delay），时间抖动（jitter）。这些系统指标是与用户的业务是相关的，不同的业务会拥有不同的系统指标值。对于宽带无线网络而言，它会同时支持不同种类的业务类型，如话音，数据、视频、和其它的多媒体数据。每一种都有可能有不同的数据特征和相应的QoS要求。表1.1描述了一些常见的业务类型及相应的指标要求。

另外，除了应用级的QoS要求以后，网络运营本身也会做一些策略性的QoS的控制。例如，针对承载业务的不同，对不同的用户采取相对应的服务。或是根据用户的订购服务的不同，对用户的数据的区分对待。从QoS的角度来看，业务、服务等级以及用户类型都会对用户所体验到QoS产生影响。如何在网络中采取有效的措施来容纳不同层次的QoS要求，对于资源稀缺的无线网络来说是一个很重要的研究课题。

对于宽带无线传输系统，如何有效地分配与管理无线资源是提供用户满意的QoS的最重要的问题之一。首先，设计高效的调度算法用来平衡业务要求与资源的稀缺。



也就是说，要在合适的时间点上给用户或其承载的业务分配合适的传输资源，同时又要满足不同特点的业务数据流的传输要求。在相互矛盾的性能指标下，平衡各方面的要求，成为网络MAC层的协议设计者的首要任务。其次，设计相应高效的控制信令流程来一方面让用户或是业务提出自己所需的QoS，另一方面又可使系统来进行无线资源的调度来满足不同的用户以及业务需求。在无线传输过程中，信道会出现时变性及不可预测性。所以，在宽带无线通信中提供令人满意的QoS比在有线传输中所遇到的困难要更多更大。同时，对于用户的管理，也会更加复杂。用户在移动的过程中出现小区切换，数据的会话过程不能发生中断。同时小区切换还会引入额外的丢包与时延。尽可能提高切换的效率也是提高QoS的重要的研究课题。同时，从用户的角度看，可以让用户感知的服务质量通常是端到端的性能来衡量。因此，QoS也要考虑在整个传输路径上的除了起点与终点外的其它不同种类结点，如路由或其它的交换结点。除此之外，由于IP网络的优势，未来的网络一定是以IP为核心的网络。结合IP层的特点来改善QoS也是一个研究的热点。

#### 4) 移动性

对于终端用户来说，移动性是无线通信技术中最具有价值的服务之一。但它也同时对无线通信技术提出许多关键的技术问题。其中，有两个最为重要。一是漫游技术（roaming），提供一种手段可以使得网络可以定位在网的空闲用户（inactive users），并且可以让他随时被激活，并且完成一些数据收发的初始化的操作。二是切换技术（handoff 或handover），提供技术保证使得在线用户（ongoing users）在终端移动的情况下仍旧保持数据或话音的连续性。这两种技术都属于移动性管理的范畴。它们为更好的用户体验提供技术性保证。

- (1) 漫游技术：为了定位正在漫游的用户，通常采用的方法是使用中心数据库来存储用户的位置信息，并有随时进行更新。当用户从一个位置移动到另一个位置的时候，它会向网络中心数据库报告自己的移动情况。另一方面，为了找到一个用户。网络也会在初始化一个数据或话音服务会话的时候，主动地向相关的基站发送寻呼的消息（page message）。接收寻呼消息的基站的数目依赖于用户的移动情况和消息发送的频率。在无线资源管理中，如何对消息发送的频率与接收的范围进行合理地设置也是无线资源管理的一个重要的课题。
- (2) 切换技术：这个问题涉及到如何保证用户在移动的过程中正在进行的数据或话音通信不中断。首先遇到的问题是检测并决策进行切换的时机。其次是分配相应的资源来保证切换的成功。再次设计相应的信令流程来实际完成这个切换过程。因为切换的时机不容易预测且规律性不强，这也给切换过程带来了一定的困难。在设计切换算法时，要在掉话率（dropping probability）与切换率（handoff rate）之间做折衷的考虑。如果切换频率过高，会使得信令过多，影响通信的质量。如果切换决策不及时，会使得通信中断，也会影响用户的体验。在切换技术中，另一个重要的研究问题是，在切换过程中，设计一套机制保证切换所需的无线资源。否则，通信也会由于无线资源的不能及时到位降低用户的通信质量。例如，通信系统会预留一部分资源专门针对切换使用或是采取切换用户会优先使用无线资源。同时，由于无线IP（Internet protocol）互联

网的发展，在IP层移动性管理也日益显得重要起来。传统上，移动性管理主要是针对第二层（Mac layer）做设计的。而在无线IP的网络中，用户的IP在通信服务的会话过程中是有时要求是固定的。例如，网页缓冲服务或数据多播服务。这也给基于IP的无线移动管理带来了新的挑战。基于IP移动管理的技术就是用来解决这一问题的。用户接入方式可以有选择，例如可以通过WiFi接入，或是通过3G接入异构的网络接入。那么IP移动管理技术同样也要解决在异构网络的漫游与切换问题。

## 5) 其它

在移动无线网络中，另外两个问题也不容忽视。一个是功率控制与节电技术，另一个是数据加密与通信安全。因为绝大多数的用户无线终端设备是通过电池来提供能源的，所以功率控制与数据传输控制的结合就显得十分重要。在给定的电池消耗下，寻找高效的传输方案，或是设计简单的协议流程，以及计算量更小的信号处理算法都属于这一个范畴。同样，数据与通信的安全在任何通信系统中都是十分重要的。从普通用户的角度看，由于无线通信的信号是在空中传播的，任何人都可能侦听到其中的电波。如何确保任何人都不能非法侵入用户的正常会话中也是在通信安全中极其重要的。从运营商的角度看，安全也可指防止非受权的用户可以接入和使用网络的资源。这种安全措施目前在网络中的物理层、网络层以及服务层中被实现。

## 1.2 无线资源管理与网络MAC层控制的研究进展

上一节提到，因为无线频谱的资源是十分有限的，所以无线资源管理与分配一直是无线互联网及移动多媒体通信网络的研究热点之一。从定义来说，无线资源管理主要是针对无线通信网络中的空中接口资源进行有效管理以及分配。首先它的作用体现在可以给每个单独的用户提供满意的通信服务。譬如，当网络出现用户数量变化或是用户之间负载不均衡时，可以灵活地调整资源的分配策略来保证不同用户的通信质量。或是，在无线信道出现大的质量波动时，通过诸如调制方式的改变来满足用户的通信需求。其次是在满足用户的通信需求的前提下，能够充分利用系统所能提供的无线资源，不致其浪费。

因而，无线资源管理的评价也相应地分为两类具体的指标：一类是指从用户角度来看，称为用户级别。这类指标是在系统设计时优先考虑的，且它与用户的类型，承载的业务本身关系很大。另一类是从系统的角度来看，被称为系统级别。如系统的吞吐量，频谱的利用效率，系统发射功率效率等等。

传统上来讲，资源管理包括的内容非常广泛。目前研究的重点包含以下几个方面的内容：

- 功率控制:主要目的是在维持链路通信质量的前提下，尽可能减小功率消耗，从而延长终端电池使用时间;并通过抑止无线通信系统中的“远近效应”，降低网络空中接口部分的相互干扰，提高信道容量。
- 切换控制:当移动终端从一个基站覆盖域移动至另一个基站的覆盖域时，或者当



网络负载控制及维护等原因使得用户被迫切换到其他小区时，保证该用户业务不中断。

- 接纳控制:在保证已有用户Qos要求的同时，尽可能接纳更多用户，降低新呼叫的阻塞率和切换呼叫的掉线率，使网络的综合性能指标最大化。
- 调度机制:使各分组用户合理地使用系统的可用资源，为各个用户分配数据速率和分组长度。
- 负载控制:当网络出现过载或临近过载的情况时，即时进行调整，使系统迅速地恢复到正常状态，以保证网络的稳态运行。

### 1.2.1 呼叫接纳控制的研究现状

因为无线资源有限，所以为了降低网络拥塞和呼叫中断概率，我们把限制进入通信网络中的呼叫连接数的机制，称作呼叫接纳控制。对于一个呼叫连接请求，系统不但要考虑这个连接的服务质量要求、也要考虑现有连接的业务服务质量要求。同时，还要对整个网络资源运行状况进行评估，最终来决定是否接纳该连接<sup>[7][1]</sup>。由于呼叫接纳控制可以有效地减小网络的业务负载，保证现有连接业务的通信质量，所以该模块对于无线通信而言十分重要。

一般而言，移动通信系统中，衡量系统性能的呼叫接纳控制指标主要有以下三种：

- (1) 呼叫阻塞率(Call Blocking Probability, CBP)，指当有新用户的连接请求时，网络拒绝其请求概率。
- (2) 呼叫掉线率(Call Dropping Probability, CDP)，指当现有用户正在通信时，系统由于没有足够的资源来维持通信过程，而不得不中断其通信的概率。
- (3) 带宽利用率(Bandwidth Utilization, BU)，指接纳进入网络后，所有被分配出去的带宽资源之和与系统的总带宽资源之间的比值。

在早期呼叫接纳控制的研究中，研究工作主要可分为信道预留、动态带宽分配与呼叫请求的排队与调度等三个方面。

基于信道预留的方法的本质是对系统中不同的用户（如新用户，切换用户或是其它类别的用户）加以区分，在资源管理时对不同类别的用户分别预留一定数量的资源。这里所指的资源可以是带宽、信道数目或是传输的功率。它的优点是可以显著地提高切换用户的切换成功的概率。根据预留策略的不同又可细分为传统的信道预留（Conventional Guard Channel, CGC）<sup>[2][3][4]</sup>，比例信道预留（Fractional Guard Channel, FGC）<sup>[5][6][7][8]</sup>，受限比例信道预留（Limited Fractional Guard Channel, LFGC）<sup>[8]</sup>以及统一比例信道预留（Uniform Fractional Guard Channel, UFGC）<sup>[9]</sup> 这类方法的共同特点是要对不同用户（新用户或是切换用户）的信道占用时间做出较为准确的估计，并依据估值对信道进行静态或动态预留。最简单的方法是Hong和Rappaport提出的<sup>[2]</sup>。他们假定新的用户与切换的用户占用信道的平均时间是相等的，并基于这个假设为不同类别的用户预留资源。当然，这种方法的

缺点是用户占用信道的平均时间估计其实并不准确。所以，以后的学者采用了不同方法来对其进行改善。学者Zhang和Yavuz使用一维或二维马尔可夫链模型来进行估计<sup>[10][11]</sup>。同时，学者Fang和Zhang则采用使用新用户与切换用户的信道占用时间归一化来提高估计的精度<sup>[6]</sup>。学者Del Re提出可以对用户的类别信息增加权重来进一步改善精度<sup>[12]</sup>。还有学者提出一个更为复杂的两维状态空间和相位合并算法来估计信道占用的概率分布函数<sup>[13]</sup>。

随着通信技术的发展，其承载的业务种类也逐渐增多。因为传统的只针对语音业务的呼叫接纳算法已经不能满足实际应用的要求，所以，支持多媒体业务（语音、视频等）的接纳控制算法也引起了研究者的重视。人们从业务的优先级、资源共享的公平性等方面做了大量的工作。学者Tseng和Hgiao首先在ATM（Asynchronous Transfer mode）网络中将话音和普通数据流通过优先级区分开。它把话音数据用马尔可夫模型描述，而把普通数据流通过一个混合的泊松模型描述。给话音更高优先级来使用资源<sup>[14]</sup>。这种简单的方法被学者Peha进行了扩展，它引入了一个优先级令牌库（priority token bank），通过动态地调度令牌来更加公平地对待每一种业务<sup>[15]</sup>。学者Iera和Fernandez等人又从数据的流量特点来提出了突发型的优先级的概念<sup>[16][17]</sup>。

由于视频等宽带多媒体技术的发展，人们将应用层信源编码的技术引入到呼叫接纳控制算法中来。当无线信道的质量下降或是基站业务负载过大时，通信调整信源编码来降低码率。这样会保使得这些业务的速率可以动态调整，系统容量也不再是一个固定的。而是在一定范围内波动。传统的接纳算法也就要做相应地调整。例如，学者Sanjoy等提出一种基于实时和非实时业务QoS降级的算法。通过建立一套QoS参数的系统效用函数，确定最佳的方案。同时在接纳控制方案中采用这个效用函数，可以最大程度地改善无线资源的利用率。

对带宽资源的需求较大

### 1.2.2 切换控制的研究现状

众所周知，目前的无线通信网络的拓扑结构都几乎毫无例外地采用了蜂窝的结构。这就使得通信系统要支持一个移动台从一个基站向另一个基站的切换或是从一个通信的信道切换到另一个信道。例如，对于时分系统（Time Division Multiple Access, TDMA）切换的实质是时隙的切换。对于频分系统（Frequency Division Multiple Access, FDMA）切换的实质是频率的切换。而对码分系统（Code Division Multiple Access, CDMA），切换的实质是码字的切换。对于切换算法研究，大体可分为两个主要的方向：一个方向是对切换的信道参数进行研究，另一个方向是对切换的判断方法进行研究。对于切换参数的研究主要集中在基于信号强度的算法方面。

早在1988年，学者Kanai和Furuya提出了基站应该接纳与之接收信号强度最大的移动台<sup>[18]</sup>。这种算法的优点是简单。移动台总是与信号最好的基站进行通信，通信质量容易得到保证。但是其缺点也十分明显。首先，如果无线信号的质量在移动的过程中频繁的波动，这种简单的方案会使移动台不停地从一个基站切换到另一个基站。从而造成切换的次数过多，进而影响通信质量。其次移动台在小区边界时，在与相邻多个基站的信号强度相当的情况下，它应该尽量与当前的基站保持连接，而不是立即进行切换操作。而这种简单的切换方案，也会造成切换的次数过多。为了改善这种方

案，学者Senarath和Corazza引入了一个延时的机制（Hysteresis Scheme）<sup>[19]</sup>。这种切换方案的实质是在切换的次数与切换的延时之间做一个必要的折衷。学者Corazza对于信号强度的采样与延时之间的关系做了进一步的分析和扩展<sup>[20]</sup>。为了能更准确的估计移动台的信号强度的状态，学者Sampath采用在移动台上基于信号强度的方差的方法来估计阴影衰落，进而对信道质量做评估<sup>[21]</sup>。基于这个方法，Vijayan等人又对切换算法参数进行了优化<sup>[22]</sup>。除了通常阴影衰落以外，研究人员对于信号强度的瞬间变化也做了更为细致的分类工作。例如，在街道的拐角处或是突然进入一个大楼内，系统也应该对这种变化可做出及时的响应<sup>[23]</sup>。这其中，典型的工作是由学者Dassanayake完成的<sup>[24]</sup>。他总结了无线信道在上述情境中的变化特征，并提出相应的切换参数。学者Pollini和Grimlund等人将延时的概念更细化到一个宏小区或是一个微小区<sup>[25][26]</sup>。

除了延时机制外，研究者还对是否启动基站切换的信号强度阈值以及时机做了深入的工作。其核心的思想是在一段时间内对信号强度的测量采样多次，形成对移动台的信道状态做出更为准确的估计，为切换提供更多的信息。通常而言，如果当信号强度低于-95dBm时，就要进行切换；否则通信就会中断。研究者提出了两个较为复杂的模型：基于信号强度的路径损失斜坡模型和功率水平往复波动统计模型<sup>[27]</sup>。通过对斜坡函数的倾斜程度和往复次数的统计来判断移动台的移动速度，进而适时的启动切换过程。例如，当斜坡函数表现为较为陡峭的曲线，那么切换操作也要立即开始。如果相反，说明移动台移动速度较慢，切换也不用立即开始。这两种模型在一定程度下也能减少不必要的切换过程。但是同时也有缺陷。例如，如果基站接收到信号的强度大是由于干扰的原因，那么本该进行的切换会被误判。还有研究人员提出了双阈值的方法，把切换的判断过程分成两个部分。当信号强度降低到第一阈值时，切换的请求可以发出，同时评估过程也会随之进行。如果目标基站的信号质量好，那么就切换；如果不如当前基站，那么切换就暂停。当信号强度降低到第二个阈值时，此时不再比较当前基站的信号和目标基站的信号，切换必须立即进行。根据上述方法，学者Beck将其提出一个方法来寻找切换的最佳阈值，来降低不必要的切换次数<sup>[28]</sup>。

除了对信号的强度测量外，还有利用信干比（Signal to interference ratio, SIR）来完成切换的算法。在GSM系统中，SIR通常是12dB，对于AMPS（Advanced Mobile Phone System）系统，这个值会达到18dB。信干比也可用做切换判断的参数。如果当前基站的信干比降低到某个阈值以下，而与此同时另外一基站的信干比又满足通信的要求。这时，切换就会发生。学者Reig在这方面做深入的研究<sup>[29][30][31]</sup>。他指出，SIR可以更好的描述信道的质量，为切换决策提供更为详细的信息。但是同时这种方法也是有缺陷的。例如，在小区边缘时，由于当前基站的信干比和目标基站的信干比都会比较差，可能会导致切换不会发生。为了避免发生这样的情况，一般会加大信号的发射功率来增大信干比。这样的做法又会对其它小区或其它用户的通信造成不利的影响。所以，学者Chuah提出一个既带有功率控制的，又基于信干比的切换算法来解决一矛盾<sup>[32]</sup>。

还有一类算法，是基于物理上的距离切换算法。移动台总是与离它最近的基站进行切换。最早，距离的测量是通过比较无线电波传播的延时来间接获得<sup>[33]</sup>。现在又有通过其它的手段如GPS等来得到距离参数<sup>[34][35]</sup>。这种方法的优势是如果测距准确，

切换也会更加合理。但是缺点也明显，无线传播环境复杂，通过无线电波来测量距离的精度很难得到保证。如果采用GPS的方案，要求移动台配备有GPS的装置才行。

对于切换的判断算法的研究目前有以下几个方面。

有的研究者提出了基于动态规划的方法。它的本质是先建立一个切换的模型，然后对某些切换相关的参数进行估计。最后通过优化的方法得到相关的解。例如，学者Manjari和Wayne把切换过程变换成一个投入与产出的优化问题。而把接收信号的强度变化被看成一个随机过程<sup>[36]</sup>。产出函数与信号强度、信道衰落、流量分布、功率控制等条件相关。通过建立基于资源分配的惩罚函数来对切换过程建立数学模型。利用动态规划来推导出切换的最佳策略。他们的仿真实验表明，这个方法比通常的仅仅基于信号强度的算法性能要好。学者Kelly则对切换的期望次数和服务中断失效进行研究，建立了一个切换模型，并利用动态规划的方法提出了一个折衷的优化方案<sup>[37]</sup>。学者还提出了一个马尔可夫过程（Markov decision process），并引入了延时的机制来对切换过程建模<sup>[38]</sup>。这类方法有个共同的特点，对切换的场景模型依赖性强，同时在求解过程前要求有一些先验的知识来限定模型。这样就显得不太灵活。还有的提出了基于模式识别的方法。这类方法利用模式识别算法定位切换场景中的有意义的规律。例如，Maturino就使用模式识别方法将同一类的变量定义成特征空间<sup>[39]</sup>。利用分类的算法来测度切换中可能采用的模式距离。他同时又采用相关的聚类算法更精确地选择切换的最佳基站。还有学者将模糊理论应用在异构的网络基站切换中<sup>[40][41]</sup>。

### 1.2.3 存在的问题

如上节所述，目前资源管理主要集中在网络层次中的最下层的两个层次，物理层和MAC层。物理层的研究是通过更为先进的数字信号处理技术，如OFDM，尽最大的可能挖掘频谱的利用率，使得无线信道能够承载更多数据。MAC层的研究更多是涉及到资源的管理与控制。移动性支持。对于用户数据的支持，数据与交叉层优化技术。

## 1.3 论文主要研究的内容与组织结构

### 1.3.1 本文的主要研究内容

本论文的工作是基于MAC层上的无线资源管理与控制为研究对象，针对基站切换方案和基于用户业务的资源分配策略这两个具体问题进行了认真细致的研究和探索。研究的具体内容包括以下几个方面。

(1.) 针对

(2.) 其中包括：基站切换、呼叫接入控制及多媒体用户的资源分配问题，进行细致深入的研究工作。

论文的研究目标是针对在MAC层中，提出适宜于MAC层中使用的协议和算法，提高资源的利用率，改善用户QoS,降低，，，为提供一个有效的分析方法。论文的研究内容主要包括以下几个方面：

论文的各章节安排如下：第一章对当前无线通信发展背景做了简单的介绍，并详细描述了在无线宽带系统中的所遇到的难点及热点。然后分析了资源管理和调度系统目前存在的问题，在此基础上，提出本论文选题、研究内容以及本论文的章节安排。

第二章介绍有关无线网络传输的基础结构和知识，探讨了MAC层的资源管理与控制的特点以及与应用层中多媒体内容相关的知识，为本论文工作的开展提供了必要的概念和知识准备。

第三章以WiMAX网络为例，描述了MAC层中无线终端在切换过程的协议以及在其中传递的信令。然后研究了对于高速移动的终端的误码率对于切换信令的影响，并建立了相应的数学模型高速移动用户基站切换算法问题。对于用户切换的流程进行分析，建立了一个WiMAX基站切换信令协议的交互概率模型。通过对此模型的分析，提出了一个用于在高速移动速度下保证切换成功的前向纠错方法。该方法在提供了一个方法通过增加额外的保护来保证切换过程的完成。通过仿真实验表明，所提出的方案可以通过计算在不同的移动速度下达到所需冗余比特数来达到认定的基站切换成功率。

第四章研究了多媒体业务用户的资源分配与数据调度问题。本章首先分析了多媒体业务的出现导致不同业务数据对服务质量的要求均有所不同。同时，对同一业务类型的不同数据流，用户对服务质量的要求也不同。由于用户对于服务质量的感受是更多是从应用层，所以我们首先提出了一个针对不同业务及不同数据流的服务质量的折算方法。通过这个方法将应用层QoS对资源的要求映射为一个归一化的数值。然后，利用凸规划算法，给出了目标问题的求解方法。并基于此方法提出一个新的呼叫接纳控制算法。最后，通过仿真对这一资源分配方法及呼叫接纳控制算法的QoS保障情况，系统的资源利用率等性能进行了分析。

第五章研究了在非完整信息下的资源分配博弈问题。

第六章研究了基于Nash议价的多用户资源分配方案。

第七章是本论文的结论部分。对全文的工作进行总结，并对与论文相关的进一步的研究工作进行了展望。





## 2 基于视频特性的呼叫接纳控制方案研究

在无线网络资源管理中, 呼叫接纳控制 (CAC, Call admission control) 对于服务质量 (QoS, Quality of service) 起着十分重要的作用。在本章中, 我们首先根据视频流的特性, 引入一个可以应用在呼入控制中的新的QoS测量方法。通过这个新的测量方法可以更加有效地利用无线网络的带宽资源。对于一个高负荷的网络, 可以理论证明, 如果使用了这个测量方法, 存在一个优化的带宽分配方案。这个方案在保持各个连接服务质量的同时, 可以最大化基站系统的QoS效用。最后, 我们通过模拟实验来验证和评估这个呼叫接纳控制的方法。实验的结果表明, 这个方案可在资源利用率与用户的QoS水平之间取得更好的平衡。

### 2.1 引言

呼叫接纳控制的本质是通过管理或限制用户的接入请求数目进入网络来达到减轻网络拥塞的一种方法。这种方法通常会与资源分配与数据流量调整紧密相关。也可看做是一种在有限的网络资源与大量的用户资源要求之间的一种折衷方案<sup>[6] [42]</sup>。例如, 在传统的电话网络中, 呼叫接纳控制在网络拥塞的情况下会拒绝用户的接入请求, 而不是让过多用户直接参与无线网络的资源共享。因为与Internet的普通数据业务不同, 话音业务是一种实时的通信业务。它对数据的延时十分敏感。超过延时门限的数据包将会被丢弃。所以, 如果不采用适当的接入控制技术, 过多的网络流量与网络请求会对用户的服务质量造成损害, 进而引起用户的不满意度上升。另一个方面, 接入控制技术也要处理另一个资源管理的问题, 网络资源分配的公平性。如果某一个用户数据流过多的占用了网络的带宽, 那么同样会带来请求接入的用户被拒绝服务或是在线的用户掉线。同样会引起用户的满意度下降和网络资源利用率的效用下降。

为此, 许多学者在过去的许多年里, 对无线接入控制技术做了大量的研究, 并提出了一些新型的接入控制算法<sup>[43] [44]</sup>。他们中的大部分首先建立一个系统的效用模型, 然后基于这个模型建立一个服务阈值, 从而对接入的用户进行判断。例如, 学者Song和Zhang引入一个称为最短剩余处理时间的服务准则 (SRPT, the shortest remaining processing time), 然后再设置一个合适的阈值来判断用户是否可以被接入<sup>[45]</sup>。学者Yilmaz和Chen也提出了一个类似的方案。他们的工作首先分析了在多个数据流与单个数据流的接入控制的特点, 提出了一个通过竞价来确定阈值的接入控制方案。这个方案需要周期地更新价格来最大化系统的收益。如果在竞价中失败或是不能支付资源最终价格的用户或是连接会被拒绝服务<sup>[46]</sup>。在文献<sup>[47, 48]</sup>, 他们的工作是通过建立一个半马尔可夫决策过程 (SMDP, the semi-Markov decision process), 把接入控制问题转化成数学上的资源利用率的极大化问题。另外一些学者方法, 是通过采取折衷的方案来处理接入控制问题。这些方案允许接入的用户的资源请求数量被大部分的满足, 服务质量可以少量下降, 但不会引起用户的不满意度上升。例如, 学者El-Kadi等人提出了一个临时租借资源的方法来处理资源不足的问题。对于一个新到来用户, 它可以通过向已经在线的用户租借资源的方式来达到自己请求资源的要求。租借资源的量是与用户的服务质量的最低容忍度为极限的<sup>[49]</sup>。

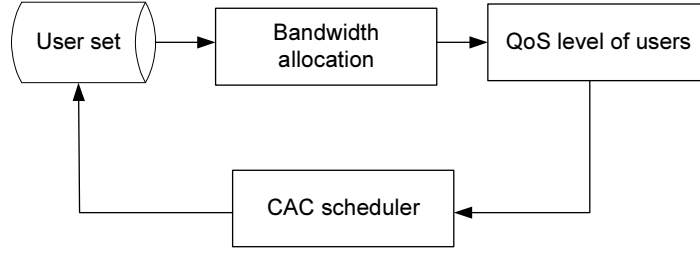


图 2.1: CAC的调度模型示意图

这些接入控制方案都没有考虑到数据流本身的特性。在本章中，我们首先引入了一个用来评价视频流数据服务质量的评测参数。依据这个参数，建立一个无线网络基站的效用模型；然后通过这个模型来处理接入控制问题。

## 2.2 CAC的调度模型

为了不失一般性，这里我们考虑一个通常的无线通信的接入模型，如图??。这个模型包括一个基站控制器和 $K$ 个数据流的用户连接。其中，有 $K - 1$ 个在线用户的连接和一个新的正在请求接入的用户连接。这些连接共享所有的带宽资源  $B_{total}$ 。当一个用户进入基站的信号覆盖范围时，发出自己的带宽请求。CAC控制器根据此时自身的带宽资源状态和用户状态，执行一个CAC的算法得到一个资源分配的向量  $\mathbf{b}$ ，其中， $b_i$ 是分配给第 $i$ 个用户连接的带宽资源。则有，

$$\mathbf{b} = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_K]$$

$$\sum_{i=1}^K b_i \leq B_{total}$$

根据资源分配向量  $\mathbf{b}$ ，我们在进一步考查每个连接的QoS水平来决定它是否被拒绝服务。

## 2.3 QoS的测量与带宽分配

一个CAC的算法的本质是决定在系统中的哪些用户的数据连接被继续保持服务状态或是被拒绝服务，进而可以避免网络拥塞状况的出现。大部分的CAC算法可以归纳成优化的问题。它们通过测量物理层（如信号的强度）或是数据链路层的参数（数据包的延迟），然后根据这些参数来优化系统的效用。与它们的优化参数不同，我们的方法侧重于视频用户的应用层的QoS参数。通过视频编码中的率失真优化策略（RDO, rate distortion optimization）来设计一个便于可以在数据链路层使用的QoS的测量方法。我们可以证明基于这种测量方法的CAC算法，可以将基站系统效用最优化。这种方法的优点在于，可以仅通过请求的带宽数据，不用获取上层的数据就可以达到较为精确的估计。从而与一般意义的交叉层优化需要直接从上层得到应用层的信息不同，这种方法可以适用于更一般的网络，因而适用性更广。

## 2.4 数据链路层上视频流的QoS水平的度量

在视频的实际应用和学术研究中，普遍采用的是一种名为峰值信噪比（PSNR, Peak signal-to-noise ratio）的参数。它是一种流行的视频质量客观评价的标准。它的本质是同一幅图像处理前后图像的差。PSNR的定义是通过均方误差（MSE）来定义的。对于尺寸为 $M \times N$  图像 $I$ 与图像 $K$ 来说，PSNR数学定义如下：

$$PSNR = \frac{10 \log(2^n - 1)^2}{MSE} \quad (2.1)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [I(x, y) - K(x, y)]^2 \quad (2.2)$$

其中， $n$ 是每一个像素点的采样比特数。通常对于视频的压缩，一般的视频应用的PSNR的值在30到50dB。对于无线网络的传输，这个指标有时也可放宽到20dB到25dB。然而，PSNR这个参数却不能够直接应用于呼叫控制中的用户或连接的QoS水平的度量。首先，这要求视频流需要被解码才能还原为原始的压缩前的图像，对于基站而言，这是不现实的。其次，PSNR的计算要求提前知道原始的参考图像才能计算，在实际的传输过程中，基站的CAC控制器无法得到这些视频数据，所以也不可能计算得到这些值。对于基站而言，它只能得到一些关于带宽的需求和用户的类型之类的信息。所以，通常的QoS测量的做法是度量网络的吞吐量，将一个用户已经得到带宽资源与要求的带宽资源的比值做为一个QoS的度量。例如，对于用户 $i$ ，基站分配给它的带宽信息是 $b_i$ ，它想要的带宽是 $B_i$ ，那么这个QoS的测量公式可定义为

$$QoS_i = \frac{b_i}{B_i} \quad (2.3)$$

这个方法对于普通的网络应用如HTTP或是FTP是适用的。因为它们对于数据带宽的可以认为是线性的。而对于视频应用而言，这种线性关系通常是不满足的。所以，本章我们引入一个新的方法来度量用户的QoS。它和PSNR类似但又适用于呼叫接纳控制。我们发现，率失真优化技术（RDO, Rate distortion optimization）可能利用并应用在我们的CAC控制中。RDO技术在视频编码过程中，通过建立起视频的码率与失真之间的近似关系来进行优化编码的技术。这种方法，也建立起了视频QoS测量与CAC带宽分配之间的关系。通常RDO的关系，失真与码率之间大多是一种e指数关系。<sup>[50] [51] [52]</sup> 根据这种关系，我们提出了一个公式（2.4）来定义视频质量与带宽分配之间的关系。

$$\alpha = \frac{1 - e^{-\rho \frac{b}{B}}}{1 - e^{-\rho}}, \quad (2.4)$$

这里，我们用 $\alpha$ 来表示一个视频流的质量， $1 - e^{-\rho \frac{b}{B}} \geq 1$ 表示视频的QoS水平，分母 $1 - e^{-\rho}$ 表示归一化系数。小写字母 $b$ 表示视频流可以分配到的带宽资源，这个值通常要求要大于最小带宽要求 $B_{min}$ ，大写字母 $B$ 表示这个视频流所想要申请到的资源。为了进一步校验这个式子，我们编码了一些标准视频测试序列与公式2.4相比较，如图2.2。正如所期望的那样，所提出的这个公式可以较好的做为视频流的QoS的一个估计。因此，我们也可用它来做为视频流的QoS水平与视频分配带宽之间的一个关系。

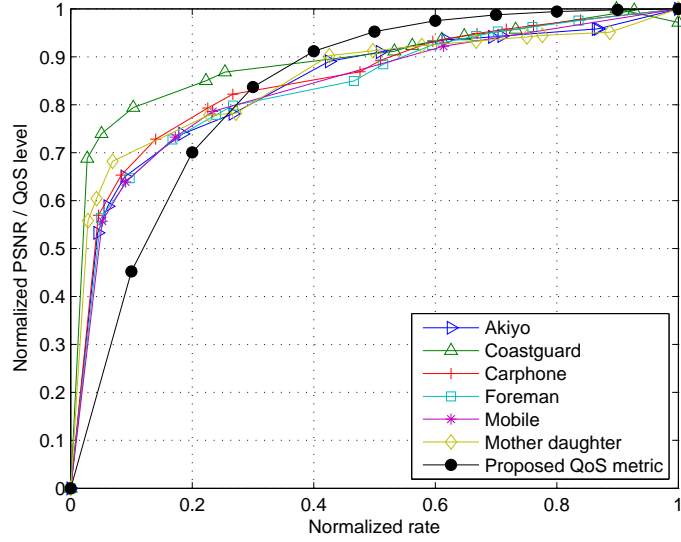


图 2.2: 所提出的视频流QoS的与归一化的PSNR之间的比较, 其中视频流为Akiyo, Coastguard, Carphone, Foreman, Mobile, 和Mother&daughter.

#### 2.4.1 优化的资源分配方案

因为呼入控制的目的是为了在系统带宽容量一定的情况下, 尽可能的满足用户的需要, 所以我们构造了一个优化问题。又因为QoS的计算每个用户都是独立的, 所以我们将所有连接的QoS水平加起来, 做为我们优化的目标, 如公式 (2.5) 所示。

$$\begin{aligned}
 U_{BS} &= \sum_{i=1}^K \alpha_i \\
 &= \sum_{i=1}^K \left( \frac{1 - e^{-\rho \frac{b_i}{B_i}}}{1 - e^{-\rho}} \right), \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

其中,  $U_{BS}$ 表示当BS要给 $K$ 个用户提供服务时, 整个BS的效用。为了最大化 $U_{BS}$ , 我们要为这些视频用户找到一个带宽分配的最优解 $\mathbf{b}$ 。然后, 根据这个解来进一步判断哪一个连接或用户会被拒绝服务。这个优化问题, 被定义为如下:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{b}^* &= \arg \max \{U_{BS}(\mathbf{b}) | \mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_K]\} \\
 &\text{subject to:} \\
 &\sum_{i=1}^K b_i + B_{ava} = B_{total}
 \end{aligned} \quad (2.6)$$

这里,  $\mathbf{b}$ 是一个带宽分配的优化的解,  $B_{total}$ 是BS所能提供的全部带宽资源。 $B_{ava}$ 是所有的可用的带宽资源。我们在此处做如下的假设, 在一个系统负荷较大的情况下,  $B_{ava}$ 为零。那么, CAC的方案就是为了解决系统资源不足的情况下, 如何更好分配资源。



**定理 2.1:** 如果带宽分配问题被定义为如公式 (2.6) 所示, 那么就一定存在一个资源分配方案  $\mathbf{b}^*$  使得系统的效用  $U_{BS}$  达到最大。

证明: 为了证明简单起见, 我们先引入一个临时的变量  $x_i$ , 并定义如下。

$$x_i = \frac{b_i}{B_i}.$$

然后, 我们根据拉格朗日乘数法, 引入拉格朗日乘子  $\lambda$ 。则拉格朗日方程可以写为如下公式。

$$F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_K, \lambda) = \sum_{i=1}^K \left( \frac{1 - e^{-\rho x_i}}{1 - e^{-\rho}} \right) + \lambda \left( B_{total} - \sum_{i=1}^K x_i B_i \right). \quad (2.7)$$

对方程求偏导数  $\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j}$ , 可得Hermitian 矩阵  $M$ 。

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_{K-1}} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_K} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_{K-1}} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_2 \partial x_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x_{K-1} \partial x_1} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_{K-1} \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_{K-1}^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_{K-1} \partial x_K} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x_K \partial x_1} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_K \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_K \partial x_{K-1}} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_K^2} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{-\rho^2 e^{-\rho x_1}}{(1-e^{-\rho})} & & & & \\ & \frac{-\rho^2 e^{-\rho x_2}}{(1-e^{-\rho})} & & 0 & \\ & & \ddots & & \\ & & & 0 & \frac{-\rho^2 e^{-\rho x_{K-1}}}{(1-e^{-\rho})} \\ & & & & \frac{-\rho^2 e^{-\rho x_K}}{(1-e^{-\rho})} \end{bmatrix}$$

因为  $\rho \geq 1, x_i \geq 0$ , 所以, 矩阵  $M$  是负定的矩阵。所以, 对于  $U_{BS}$  而言, 存在一个带宽分配的方案, 使得  $U_{BS}$  取到最大值。

接下来, 我们来求解这个带宽分配的优化方案。首先, 我们对公式 ( ) 求偏导数, 可得下面一系列的式子。

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = \frac{\rho e^{-\rho x_1}}{(1 - e^{-\rho})} - \lambda B_1 = 0 \quad (2.8-1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_2} = \frac{\rho e^{-\rho x_2}}{(1 - e^{-\rho})} - \lambda B_2 = 0 \quad (2.8-2)$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\frac{\partial F}{\partial x_K} = \frac{\rho e^{-\rho x_K}}{(1 - e^{-\rho})} - \lambda B_K = 0 \quad (2.8-K)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = B_{total} - \sum_{i=1}^K x_i B_i = 0 \quad (2.8-K+1)$$

根据公式(2.8-1), 我们可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x_1} &= \frac{\rho e^{-\rho x_1}}{(1 - e^{-\rho})} - \lambda B_1 = 0 \\ \implies \rho e^{-\rho x_1} &= \lambda B_1 (1 - e^{-\rho}) \\ \implies -\rho x_1 &= \ln [\lambda B_1 (1 - e^{-\rho})] - \ln \rho \\ \implies x_1 &= -\frac{1}{\rho} \ln [\lambda B_1 (1 - e^{-\rho})] + \frac{1}{\rho} \ln \rho \\ \implies x_1 &= -\frac{1}{\rho} \ln \lambda - \frac{1}{\rho} \ln(B_1) - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{1}{\rho} \ln \rho \end{aligned}$$

根据上面类似的推导过程, 我们可以得到下面的结果。

$$\begin{aligned} x_2 &= -\frac{1}{\rho} \ln \lambda - \frac{1}{\rho} \ln(B_2) - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{1}{\rho} \ln \rho \\ x_3 &= -\frac{1}{\rho} \ln \lambda - \frac{1}{\rho} \ln(B_3) - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{1}{\rho} \ln \rho \\ &\vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ x_K &= -\frac{1}{\rho} \ln \lambda - \frac{1}{\rho} \ln(B_K) - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{1}{\rho} \ln \rho \end{aligned}$$

然后, 我们将 $x_i$ 代入 (2.8-K+1), 可得

$$\begin{aligned} B_{total} &= \sum_{i=1}^K x_i B_i \\ &= \sum_{i=1}^K \left[ -\frac{1}{\rho} \ln \lambda - \frac{1}{\rho} \ln(B_i) - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{1}{\rho} \ln \rho \right] B_i \\ &= \sum_{i=1}^K \left[ -\frac{B_i}{\rho} \ln \lambda - \frac{B_i}{\rho} \ln(B_i) - \frac{B_i}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{B_i}{\rho} \ln \rho \right] \\ &= -\frac{\ln \lambda}{\rho} \sum_{i=1}^K B_i - \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^K B_i \ln(B_i) - \frac{\ln(1 - e^{-\rho})}{\rho} \sum_{i=1}^K B_i \\ &\quad + \frac{\ln \rho}{\rho} \sum_{i=1}^K B_i \end{aligned} \quad (2.9)$$

基于公式 (2.9)，我们可以求得 $\lambda$

$$\begin{aligned}\lambda &= \exp \left( \frac{-\rho B_{total} - \sum_{i=1}^K B_i \ln(B_i)}{\sum_{i=1}^K B_i} \right. \\ &\quad \left. + \frac{-\ln(1 - e^{-\rho}) \sum_{i=1}^K B_i + \ln \rho \sum_{i=1}^K B_i}{\sum_{i=1}^K B_i} \right) \\ &= \exp \left( \frac{-\rho B_{total} - \sum_{i=1}^K B_i \ln(B_i)}{\sum_{i=1}^K B_i} - \ln(1 - e^{-\rho}) + \ln \rho \right)\end{aligned}$$

然后，又可得

$$\begin{aligned}x_i &= -\frac{1}{\rho} \ln \lambda - \frac{1}{\rho} \ln(B_i) - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{1}{\rho} \ln \rho \\ &= \frac{\rho B_{total} + \sum_{k=1}^K B_k \ln(B_k) + \ln(1 - e^{-\rho}) \sum_{k=1}^K B_k - \ln \rho \sum_{k=1}^K B_k}{\rho \sum_{k=1}^K B_k} \\ &\quad - \frac{1}{\rho} \ln B_i - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{\ln \rho}{\rho} \\ &= \frac{B_{total}}{\sum_{k=1}^K B_k} + \frac{\sum_{k=1}^K B_k \ln(B_k)}{\rho \sum_{k=1}^K B_k} + \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) - \frac{\ln \rho}{\rho} \\ &\quad - \frac{1}{\rho} \ln B_i - \frac{1}{\rho} \ln(1 - e^{-\rho}) + \frac{\ln \rho}{\rho} \\ &= \frac{B_{total}}{\sum_{k=1}^K B_k} + \frac{\sum_{k=1}^K B_k \ln(B_k)}{\rho \sum_{k=1}^K B_k} - \frac{1}{\rho} \ln B_i\end{aligned} \tag{2.10}$$

最后，资源分配方案的解为：

$$\begin{aligned}b_i^* &= x_i B_i \\ &= \frac{B_i B_{total}}{\sum_{k=1}^K B_k} + \frac{B_i \sum_{k=1}^K B_k \ln(B_k)}{\rho \sum_{k=1}^K B_k} \\ &\quad - \frac{B_i \ln B_i}{\rho}, \quad i = 1, 2, \dots, K\end{aligned} \tag{2.11}$$

所以，我们可以下结论说，根据上述的推导过程，我们有唯一的解对应于资源的分配方案  $\mathbf{b}$ 。

## 2.5 提出的CAC方案

这里我们提出一种简单的CAC方案。这个方案是基于上一节中的带宽资源的分配方案。这个方案的流程显示如流程图1。当一个新的用户进入基站的覆盖范围，它发出请求接入请求。随后，接入控制过程开始。如果此时，基站的资源比较宽松，可用的资源大于这个用户（标记为用户K）的请求，那么毫无疑问它会立刻被允许接入。如果基站的可用资源十分紧张，则CAC控制器会计算这个用户的最优带宽的分配值 $b_K^*$ 。如果这个值大于这个用户所能容忍的最小资源需求，那么这个用户的接入申请

---

**Algorithm 1:** 所提出的新CAC方案

---

```
1 等待一个新的用户请求;
2 第  $K$  个用户发出进入基站服务的请求, 所需的带宽资源为  $B_K$ , 假设此时在基站
   系统中正在接收服务的用户有  $K - 1$ ;
3 if  $B_K \leq B_{ava}$  then
4   | 接受这个新用户进入请求, 根据它的带宽请求, 并分配资源  $B_K$  给它;
5 else
6   | 根据公式 (2.11) 计算其可以得到的带宽资源的优化值  $b_K^*$ ;
7   | if  $b_K < B_K^{min}$  then
8   |   | 拒绝这个用户的进入请求;
9   |   | go to 1;
10  | else
11  |   | 接受这个用户的请求, ;
12  |   | for  $i = 1$  to  $K - 1$  do
13  |   |   | 根据公式 (2.11) 计算求得第  $i$  个用户的带宽资源的分配值;
14  |   |   | Allocate  $b_i^*$  to the  $i$ th connection;
15  |   |   | 并分配给新用户  $b_K^*$  的带宽资源;
16 转到第1步;
```

---

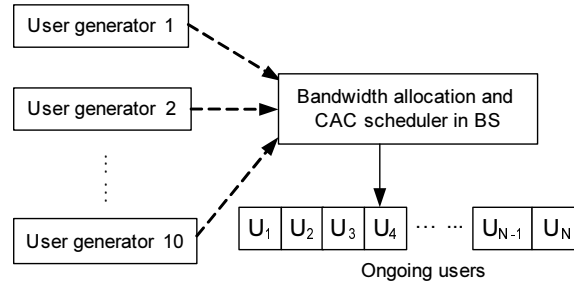


图 2.3: Simulation configuration

仍会被接受。反之, 这个用户的接入申请会被拒绝。假设这个用户被允许接入, 那么接下来, 在线的  $K - 1$  个用户要调整它们的目前使用的资源使得整个基站系统的效用最大。然后, 这个新用户会分配资源  $b_K^*$ 。这样的方法, 将可以总能保持整个系统的效用最大化。

## 2.6 仿真实验与结果

为了简单起见, 我们通过一个简化的基站服务仿真模型来评估我们提出的CAC方案, 如图2.3。在这个模型中, 设置了十个用户接入申请发生器和一个基站CAC控制器。这些用户接入申请发生器发送接入申请到基站CAC控制器。这些申请是按照Poisson模型, 速率  $r = 30$  to  $100$  每小时。它们在基站接受服务的时间服从指数分

布，其中均值为600 到1500 秒。带宽请求值从600Kbps到2Mbps。详细的参数见表格??。基站控制器负责接受用户的接入申请，并执行一个CAC的方案来决断是否接入这个申请，并分配和调整用户的资源大小。全部可用的带宽为75Mbps。

同时，我们选择了其它二种CAC的方案做为实验中的对比方案。一种方案叫Baseline。这种方案中，CAC控制器依照简单的接入原则。如果目前系统中可用的带宽大于用户的需求带宽，那么就允许接入。反之，则拒绝这个用户。另一种对比方案ElKadi采用了的按比例资源拆借方案。如果用户请求的资源比系统中可用的空闲资源多，那么就把所有的在线用户的资源减少一个固定的比例，放入空闲资源池中。从而满足新的申请用户的带宽资源需要。<sup>[49]</sup> 这个方案其实也是一种资源预留的方案。

表格2.2 显示了这三种CAC方案的仿真的统计结果。我们比较了传统的网络参数如在线用户数、带宽的利用率；也比较了本章中提出的QoS的参数。可以从表格中的数据可以看出，我们提出的方案比其它两个方案的综合性能要好。例如，Eldadi方案的带宽利用率最低，但是同时它的用户的请求拒绝率表现最好。对于Baseline方案而言，它通过大量地拒绝新用户的请求来保证在线的用户的QoS。与这二者相对应的，我们的方案可以做出较好的折衷，在基本保持接通率的情况下，增加带宽的利用率。对用基站系统的效用可以保持在141.4，而单个用户的QoS保持在0.984（最大值为1）。图2.4 - 2.8分别显示了这三种方法在各种评价参数的仿真曲线。Elkadi的方法的带宽利用率曲线的波动情况比其它两种方法要大，如图2.6所示。这是因为这种方法通过降低在线服务的用户的所使用的资源而对新用户做了资源的预留。这样做优点是显著提高新用户的接入率。而且，在线用户的数目也会较多，如图2.5所示。这种方法却在QoS上牺牲了在线用户的QoS，明显，平均QoS曲线，在三种方法中它是最底的。Baseline的方法会使得用户平均QoS曲线总是保持为最大。它是通过拒绝大量的新的用户来保证这一点。这样做也明显对新的用户不太公平。无论是Elkadi方法还是Baseline方法，都不能在资源受限的情况下做出较好的折衷。但是，我们提出的方法可以保持平均QoS比Elkadi方法高，同时，用户接入的拒绝率与带宽利用率都可以平衡的较好。



[tb]

表 2.1: 仿真中用户连接的类型

请求的带宽资源 (Kbps)	最低的带宽需求 (Kbps)	到达率 (/hour)	在基站中停留的时间 (seconds)
64	64	100	600
90	64	90	700
128	64	80	800
256	128	70	900
384	192	60	1000
768	384	50	1100
1024	512	40	1200
1512	756	40	1200
1768	884	30	1500
2048	1024	30	1500

[tb]

表 2.2: 仿真的结果统计

	Baseline	Elkadi	Proposed
拒绝率(%)	14.8	1.2	4.0
用户的连接平均个数	128.0	146.5	142.7
基站的QoS水平	128.0	140.6	141.4
单个用户的平均QoS水平	1.00	0.960	0.984
带宽利用率(%)	95.6	87.8	93.8

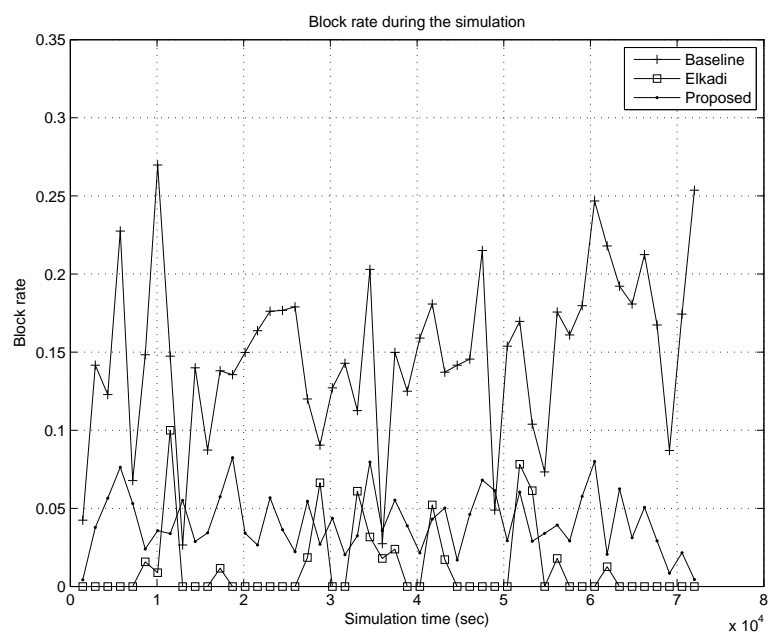


图 2.4: 基站中用户请求接入的拒绝率

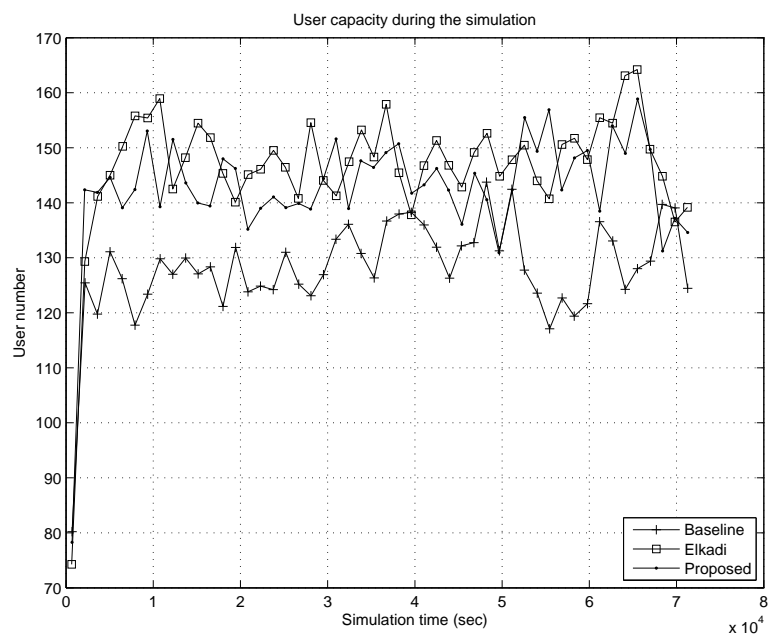


图 2.5: 基站的在线用户数

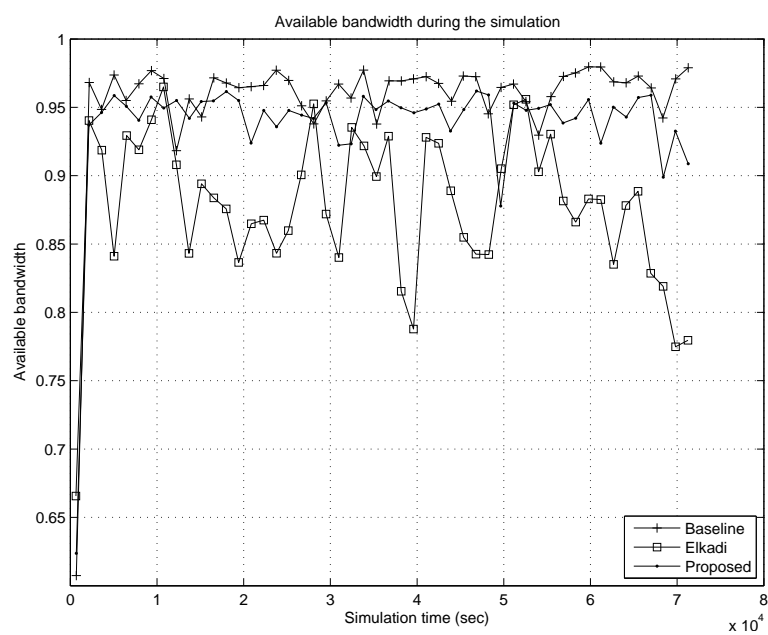


图 2.6: 基站的带宽利用率

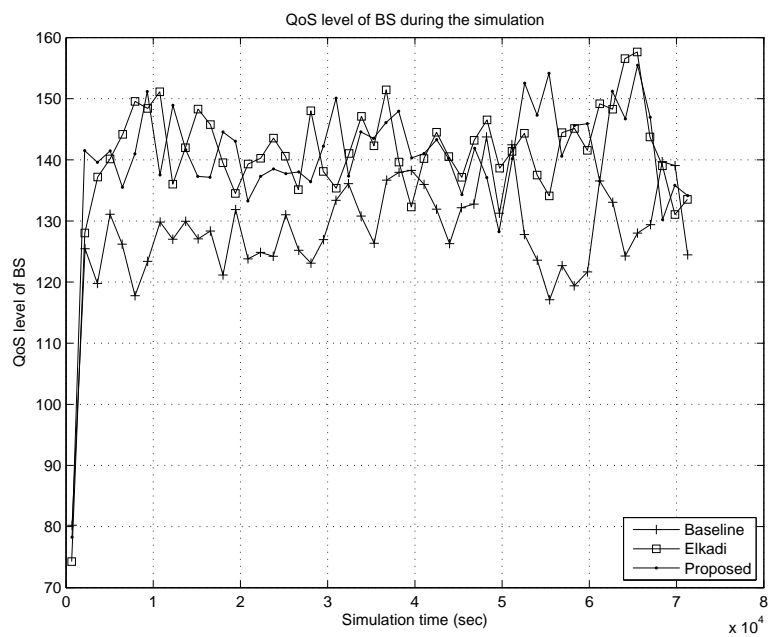


图 2.7: 基站的QoS水平

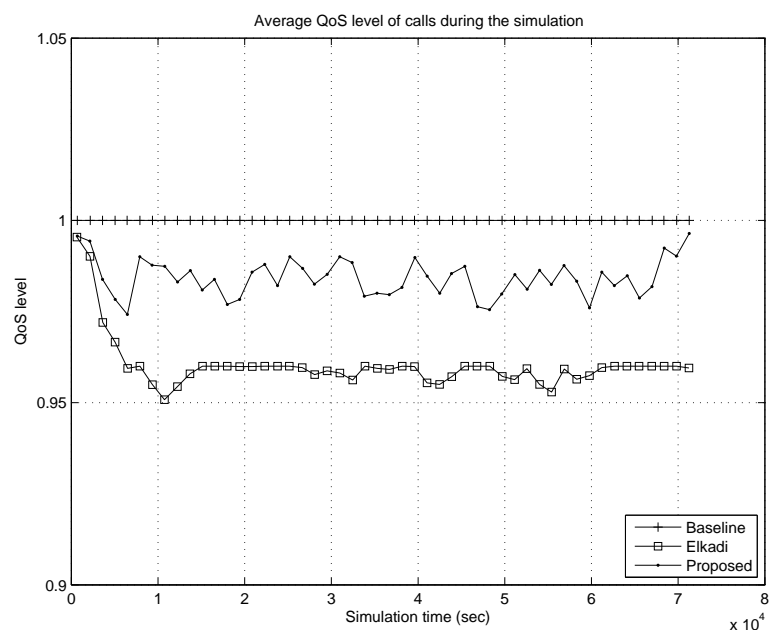


图 2.8: 在线用户的平均QoS水平





### 3 高速移动用户的无线网络基站切换算法

本章针对在WiMAX网络中,高速移动用户基站切换算法问题。对于用户切换的流程进行分析,建立了一个WiMAX基站切换信令协议的交互概率模型。通过对此模型的分析,提出了一个用于在高速移动速度下保证切换成功的前向纠错方法。该方法在提供了一个方法通过增加额外的保护来保证切换过程的完成。通过仿真实验表明,所提出的方案可以通过计算在不同的移动速度下达到所需冗余比特数来达到认定的基站切换成功率。

#### 3.1 引言

无线网络通信领域的高速数据服务总是需要宽带无线访问技术的支持。WiMAX (World Interoperability for Microwave Access) 是一项替代现在有线宽带访问技术如ADSL, 提供最后一公里的无线网络接入技术。它提供一种方便快捷的方法来建立无线城域网 (WMN, wireless metropolitan area network)。这项技术可以对高速数据业务如宽带互联网访问, VoIP (Voice over Internet Protocol), IPTV等高速数据应用提供技术支持。WiMAX技术用来支持在基站与固定、移动或漫游用户终端之间的高速数据连接。固定WiMAX (IEEE 802.16-2004) 的标准中定义了面向连接的媒体访问层 (MAC) 和基于正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 的物理层协议<sup>[7]</sup>。而移动WiMAX (IEEE 802.16e-2005) 的标准中还规定了对于移动用户所需的各种MAC层和物理层协议<sup>[53]</sup>。

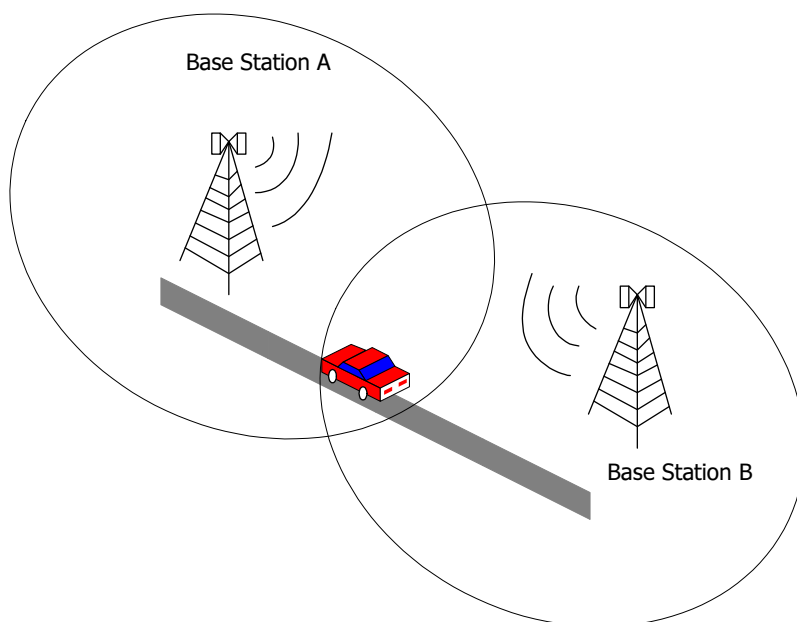


图 3.1: 基站切换示意图

在无线移动通信中,基站切换是一个非常重要的组成部分。它可以保证在用户在移动过程中(从一个地理位置到另一个地理位置,如图3.1),用户的通信保持不被

中断<sup>[54][55]</sup>。基站切换可以是在同一网络中的小区切换（也被称为微移动性，Micro-mobility），也可以在不同的网络中的切换。譬如是在无线局域网（WiFi）与移动通信网之间的切换。当前的移动WiMAX标准详细定义了切换过程中所需的切换信令协议。这些协议用来在单点到多点（Point-to-multipoint, PMP）模式的通信中支持切换过程。通常，切换技术可以分成两种：软切换（Soft handover, SHO）和硬切换（Hard Handover, HHO）。在软切换过程中，移动台在切断与原有基站通信之前，就已经完成和目标基站的切换信令，并建立了正常的通信连接。而在硬切换过程中，移动台先要完成断开与原有服务基站的连接，然后再与重新目标基站建立连接。显然，软切换的优点在于在切换的过程中，数据连接始终存在。但是同时的资源利用率较硬切换要低。硬切换过程中，数据连接会在一个段时间内是断开的。由此引入了一些延时，对于时间敏感的应用而言，也需要做专门地处理和优化来确保服务质量。通常对于时间敏感的应用，软切换也必须要进行一些优化的处理才能保证在移动WiMAX中QoS。

近些年来，对于软切换方面的研究，许多学者做了许多工作。他们中一部分人的工作的特点是集中在对于目标基站的选择上。通过对移动台的位置变化的预测、收集分析相邻基站的QoS信息或是对基站信号的分析来优化目标基站的选择<sup>[56][57]</sup>。另外一些人工作主要是集中在提高某些QoS的指标。在文献[58]中，为了解决在切换过程中丢包率增加的问题，作者设计了一种交叉层的方法，在上层设备中如（网络层中的路由器）缓存切换移动台的数据。在文献[59]中，Chen等学者为了减少在切换过程中的延时，提出了一种预协商的机制。这个机制利用预测移动台与基站间的距离，提前在目标基站中分配所需要的资源。在文献[60]中，作者通过用IP层的链路来传送MAC层的信息来达到减少切换延时的目的。还有一些学者的研究集中在对切换中出现的CID分配冲突提出了更加合理的分配方案或是对移动台的数据进行分类处理，最终也可以提高QoS的水平<sup>[7][61]</sup>。

以前的大部分工作主要是从数据链路层或IP层来考虑到切换的性能。他们的工作一般是假设物理是个理想的信道。本文认为物理层的信道工作应该可以与数据链路层工作进行协调，可以提高切换的性能。特别是在移动台的高速移动状态下，交叉层的工作可以有效地提高切换的性能与效率。而对高速移动而言，除了物理层在调制编码时应考虑以外，数据链路层也应该参与来提高性能。在本章中，我们分析了信道质量对切换信令交换的流程，通过建立信令的概率模型来分析在高速移动状态时的切换性能。最后通过建立一个简单实用的前向纠错方法来提高切换的效率。切换的性能与效率通常可以用一个切换的成功率来描述。我们通过统计在切换过程中每次信令交换成功概率来计算出最后的完成整个切换过程概率。我们可以观察到对于切换过程，高速移动会对切换造成非常大的影响。这个概率不但可以连接水平上反映移动台的QoS水平，也在研究切换延时和用户丢包模型中扮演着重要的角色。

本章的工作是对首先对数据链路层的切换流程进行分析并建立概率数学模型。然后对此模型及在不同移动速度下切换成功概率之间的关系进行细致的分析与讨论。最后提出一种简单的前向纠错方法对模型的正确性进行仿真验证，同时这种方法也可以根据实际移动台速度给切换信令附加更多的保护比特。

### 3.2 基站切换与移动台的移动性分析

#### 3.2.1 切换的流程

在IEEE 802.16e的标准中，当前的切换信令的交换流程如图3.2。基站会周期地广播“邻近通告消息”（Neighbor Advertisement Message, MOB\_NBR-ADV）。这个消息用来标识邻近基站或是它们的信道特性。移动台总是会侦听此消息来收集邻近基站的信息。如果一个移动台检测到与当前基站的信道变差，它会发送一个请求消息（MOB\_SCAN-REQ）给当前服务的基站。这时如果基站收到此请求消息后会反馈给移动台一个消息（MOB\_SCAN-RSP）。此消息会指示移动台使用特定的无线资源（如时隙）来进行扫描操作（Scanning）。当扫描操作结束后，移动台初始化通过发送切换请求消息（MOB\_MSHO-REQ）给当前基站。然后基站会发送响应消息信令（MOB\_BSHO-RSP）。当移动台收到此消息时，它会发送消息（MOB\_HO-IND）通知当前基站可以关闭此移动的连接，释放无线资源。在切换最后的过程中，移动台继续与目标基站交换测距消息以及重新接入的各种信令来完成全部的接入过程。所以综合上述的分析，一次成功的切换过程，尽管无线资源的分配也是切换需要考虑的内容，但是从数据链路层的信令层面上看，其核心首先是各种切换信令的成功传递与交换。

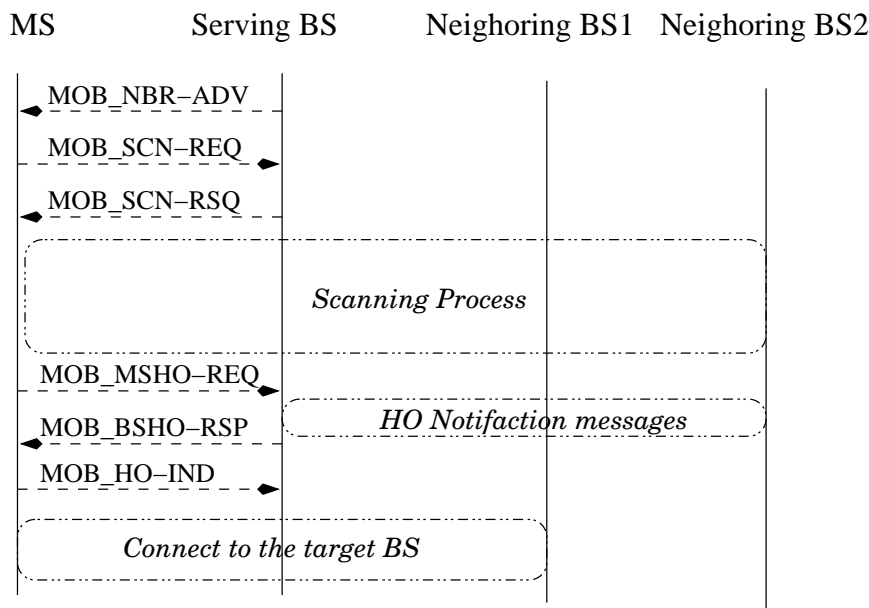


图 3.2: 切换流程示意图

#### 3.2.2 切换成功概率与误比特率的关系分析

不失一般性，我们假设在一次移动台的切换过程中有 $M$  ( $M \geq 2$ ) 个信令需要交换。设事件 $A_i$ 表示一次信令的传送。 $p_i$ 是一次信令成功传送的概率，其中 $i =$

$0, 1, \dots, M-1$ 。如果不考虑自动重传(ARQ)的策略, 则有以下结论:

$$P(A_i) = p_i, P(\bar{A}_i) = 1 - p_i, i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3.1)$$

在WiMAX切换过程中, 重传策略不但可以用来对用户数据的传递, 也通常用于保证信令消息的可靠传送。所以, 根据切换信令的要求, 这里我们假设一个信令消息如果不能被对方成功接收, 将会被重传定时器激发再次重传过程, 并且直到接到对方反馈为止。那么, 考虑了重传策略后, 则公式 (3.1) 可以重新写为下面的式子:

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^{N_i} q_i^{j-1} p_i = \sum_{j=1}^{N_i} (1 - p_i)^{j-1} p_i, \quad N_i \geq 1, \quad (3.2)$$

其中,  $N_i$ 表示在一次切换过程中, 第*i*个信令消息在成功接收到前会被传递的次数。在切换过程中有*M*个信令消息, 那么, 只有*M*个信令都收到, 切换才认为是成功的, 所以切换成功的概率可表示为:

$$P_{succ} = \prod_{i=0}^{M-1} P(A_i) = \prod_{i=0}^{M-1} \left[ \sum_{j=1}^{N_i} (1 - p_i)^{j-1} p_i \right]. \quad (3.3)$$

在WiMAX的物理层中使用了交织信道编码的技术, 所以这里的无线信道可以假设为无记忆的信道。那么,  $p_i$ 将主要与移动台和基站之间的无线信道的误比特率有关。我们用数学公式表示如下:

$$p_i = \varphi(P_b(\gamma_b), L_i),$$

其中,  $P_b(\gamma_b)$ 是当接收比特信噪比为 $\gamma_b$ 的误比特概率。这样, 如果设第*i*个信令消息的长度为 $L_i$ , 则有

$$p_i = [1 - P_b(\gamma_b)]^{L_i}. \quad (3.4)$$

所以, 将公式 (3.4) 代入公式 (3.3), 可以得到切换成功概率与无线信道误比特率之间的关系。

$$\begin{aligned} P_{succ} &= \prod_{i=0}^{M-1} P(A_i) \\ &= \prod_{i=0}^{M-1} \left\{ \sum_{j=1}^{N_i} \{1 - [1 - P_b(\gamma_b)]^{L_i}\}^{j-1} \cdot [1 - P_b(\gamma_b)]^{L_i} \right\} \end{aligned} \quad (3.5)$$

这里, 我们给出公式 (3.5) 的一个例子, 如图3.3。可以明显地看出, 对于固定的 $N_i$ , 切换的成功概率 $P_{succ}$ 随着误比特率 $P_b(\gamma_b)$ 的增大而降低。当误比特率较大时 (在 $10^{-4}$ 到 $10^{-2}$ 之间), 使用重传策略会有效地改善切换的成功率。

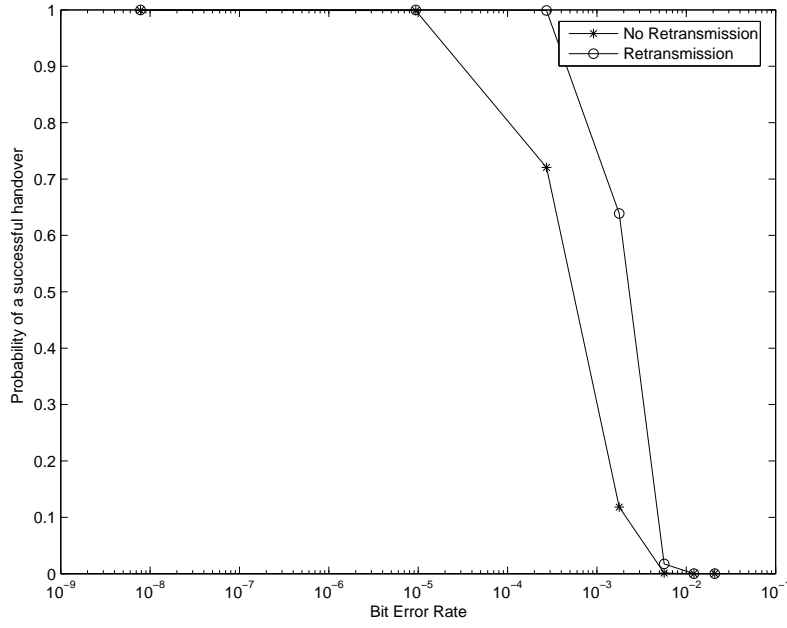


图 3.3: 切换成功概率与误比特率的关系。在此例中,  $M = 5, \sum_{i=0}^{M-1} N_i \leq 50, L_i = 250$

### 3.2.3 切换成功概率与移动台速度的关系

上一节的分析指出了切换成功概率也两个重要的参数有关：一是信道的误比特率，二是信令消息的重传次数。在一个实际的WiMAX网络中，这两者都与移动台的移动速度有关。首先，移动的速度会影响多普勒频率偏移，进而影响信道的误比特率，最终对信令消息的重传次数产生影响。同时，两个相邻基站覆盖的交叠部分是有限距离的，所以不能做到无限次的重传。所以，一个快速移动的终端要求基站切换的速度与时间也有更严格的要求。基于上述的考虑可知，通常情况下，移动台的移动速度越快，切换成功的概率会越低。为了定量的分析起见，我们假设在切换过程中，对信令处理的时间是可以忽略不计的。所以，在整个切换过程中的延时可以写为下面的式子，

$$T_M = (N_0 + N_1 + \cdots + N_{M-1}) \cdot T_{retx} + M \cdot T_{prop},$$

其中， $N_i$ 表示第*i*个信令传递的次数。 $T_{retx}$ 是同一信令消息重传的计时器间隔， $T_{prop}$ 是在移动台与基站之间的承载信令的电磁波传播所需时间。

我们用 $D_{overlap}$ 表示在移动台移动方向上两个相邻基站的覆盖范围的重叠部分的距离。如图3.1所示。 $v_m$ 是移动台的移动速度。则有在一次成功的基站切换过程中，下面的约束需要满足：

$$T_M < \frac{D_{overlap}}{v_m}. \quad (3.6)$$

在这个约束下，一次成功切换的概率可以进一步被改写为下面的式子

$$P_{succ} = \begin{cases} \prod_{i=0}^{M-1} \left[ \sum_{j=1}^{N_i} (1-p_i)^{j-1} p_i \right], & \text{if } T_M < \frac{D_{overlap}}{v_m}, \\ 0, & \text{others,} \end{cases} \quad (3.7)$$

其中，

$$T_M = \sum_{i=0}^{M-1} (N_i) \cdot T_{retx} + M \cdot T_{prop}$$

$$p_i = [1 - P_b(\gamma_b)]^{L_i}.$$

这里，我们使用Rayleigh信道。平均接收符号的信噪比（energy-to-noise）可以表示为：[62][63]

$$\bar{\gamma}_s = \frac{1}{1 - \frac{1}{N^2} \left[ N + 2 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) J_0(2\pi f_m T_s i) \right] + \frac{NT_s}{E_s/N_0}}, \quad (3.8)$$

$N$ 是OFDM子载波的个数， $T_s$ 是一个K阶QAM调制的符号在一个子载波上的传输时间。 $N_0$ 是噪声功率， $E_s$ 是传送每个符号的平均能量。 $f_m = f v_m / c$ 是最大的多谱勒频偏， $f$ 为载波频率， $v_m$ 为移动台的速度， $c$ 为光速。那么相应的接收到的平均比特信噪比为

$$\bar{\gamma}_b = \frac{\bar{\gamma}_s}{\log_2 K} \quad (3.9)$$

$$= \frac{1/\log_2 K}{1 - \frac{1}{N^2} \left[ N + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) J_0(2\pi f_m T_s i) \right] + \frac{NT_s}{\log_2 K} \left( \frac{1}{E_b/N_0} \right)} \quad (3.10)$$

其中，

$$J_0(2\pi f_m T_s i) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(2\pi f_m T_s i \sin \theta) d\theta$$

此处，我们假设以Clarke-Jakes的模型为基础的Rayleigh信道模型。

对于M阶的QAM调制（如果 $M = 4$ ，调制的方式是QPSK；如果 $M = 16$ ，那么就是16-QAM）。我们假设在接收端可以进行出错的符号检测。那么对于当接收比特能量与噪声比为 $\gamma_b$ 时，误比特概率（bit error, BER）为 $P_b(\gamma_b)$ 可以写为：

$$P_b = \int_0^\infty P_b(\gamma) f_{\gamma_b}(\gamma) d\gamma$$

其中， $f_{\gamma_b}$ 是Rayleigh信道模型的比特能量与噪声比的概率密度函数。它定义如下：

$$f_{\gamma_b}(\gamma) = \frac{\exp(\frac{-\gamma}{\bar{\gamma}_b})}{\bar{\gamma}_b}, \gamma \geq 0$$

我们假设载波间的干扰（ICI）为高斯白噪声。根据文献[63]，这个近似在 $1024 \geq N \geq 256$ 是比较精确的。那么，对于M阶的QAM和Gray码，可以有如下的近似，

$$P_b(\gamma_b) \approx \frac{P_M(\gamma_s)}{\log_2 M} \quad (3.11)$$

其中， $P_M$ 是符号的错误概率。特别对于QPSK，有

$$P_b(\gamma_b) = Q\left(\sqrt{2\gamma_b}\right). \quad (3.12)$$

$$Q(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-y^2/2} dy \quad (3.13)$$

把公式（3.7）和公式（3.12）合并则有下面的结果。我们可以得到以移动台速度为变量的一个切换成功概率函数。如图3.4

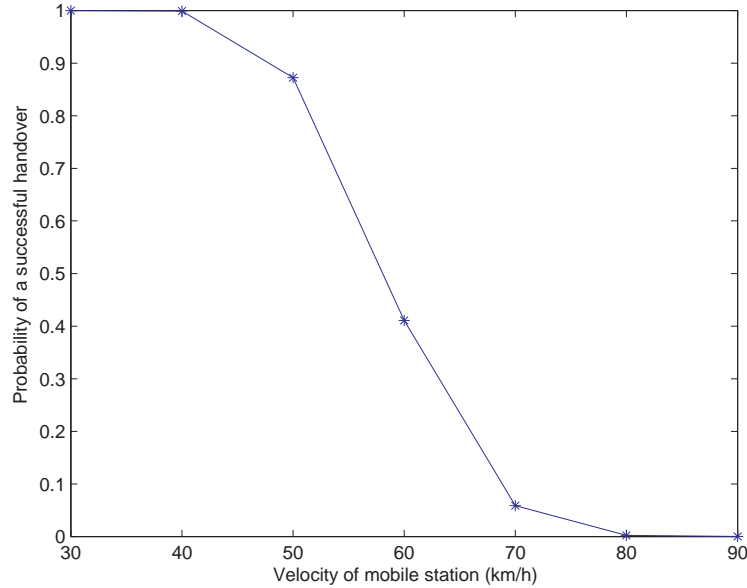


图 3.4: 切换成功概率与用户的移动速度关系，在本例中 $M = 5, \sum_{i=0}^{M-1} N_i = 50, L_i = 250$

很明显，随着移动的速度增快，切换成功概率会显著下降。这样会极大地影响了切换的过程。所以说，如果在高速移动状态下，切换对于移动台来说需要额外的处理。

### 3.3 高速移动下的切换方案

在高速移动状态下，为了提高移动台的切换成功概率，除了可以增加重传的次数以外，我们也需要建立更加可靠的通信链路的传输机制来传送信令消息。本节我们讨论了前向纠错编码的特点，并采用此技术来改善传输的误码率。前向纠错编码是通过



发送端使用冗余比特数来提供差错保护。这些额外的冗余比特可以帮助接收端检测并纠正错误。如果采用了前向纠错的技术，数据重传的次数也会降低。根据WiMAX的标准，切换信令的消息大小约为50到80个字节左右。同时由于所要无线信道的限制及交换的信令消息较多，所以要在满足要求的基础上尽可能减少冗余比特数。不同的前向纠错编码方案可以提供不同的纠错能力。对于同一种前向纠错码而言，冗余比特数越多，纠错能力也越强。所以下面我们要定量的讨论冗余比特的个数。对于一个给定的移动台速度，我们要能基于所要达到的切换成功率来计算出冗余比特数。为了简单起见，我们假设切换消息信令的长度不变，设切换消息传输一次的成功率为 $\tilde{p}$ 以替换公式(3.7)中的 $p_i$ ，如下

$$\begin{aligned}
 P_{succ} &= \prod_{i=0}^{M-1} P(A_i) \\
 &= \prod_{i=0}^{M-1} \left[ \sum_{j=1}^{N_i} (1-p_i)^{j-1} p_i \right] \\
 &\approx \sum_{i=M}^S \binom{i-1}{M-1} \cdot \tilde{p}^M (1-\tilde{p})^{i-M}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

其中， $S = \sum_{i=0}^{M-1} N_i$ 是总共重传的次数。根据3.2节的分析，可以得到如下的公式：

$$\begin{aligned}
 S &= \sum_{i=0}^{M-1} N_i \\
 &= \left\lceil \frac{(\frac{D_{overlap}}{v_m} - MT_{prop})}{T_{retx}} \right\rceil \leq \frac{(\frac{D_{overlap}}{v_m} - MT_{prop})}{T_{retx}}.
 \end{aligned}$$

这样，我们就可根据相邻基站覆盖交叠的距离 $D_{overlap}$ 和移动台的速度 $v_m$ ，得到参数 $S$ ；并根据所要求的 $P_{succ}$ 进一步计算得每一个信令的成功传输的概率值。如果使用Reed-Solomon(R-S)纠错编码，我们可以推导出如下的式子。

$$\tilde{p} \approx \frac{2^{k-1}}{k(2^k-1)^2} \sum_{j=t+1}^{2^k-1} j \cdot \binom{2^k-1}{j} \cdot p^j (1-p)^{2^k-1-j}, \tag{3.15}$$

其中， $t = \lfloor \frac{N-k}{2} \rfloor$ 是编码的符号纠错能力， $N$ 是全部的比特数， $k$ 是信令消息的比特数， $\lfloor x \rfloor$ 表示不超过 $x$ 的最大整数。那么冗余比特数 $N-k$ 可以确定下来。图3.5表明了想要达到不同的切换成功概率（50%, 80%, 99%）下，在不同的速度下，移动台所需的冗余比特数。

如图3.5所示，当移动台的速度越快，那么为了达到所要设定的切换成功概率，所需的冗余比特数也越多。例如，为了能够达到80%的成功概率，如果移动台的速度分别是50, 70, 90 km/h，那么所需的冗余比特数是2, 10, 28。通过上面的分析，我们可以使用一种自适应的方法根据不同的移动台速度来增加所需的冗余比特。

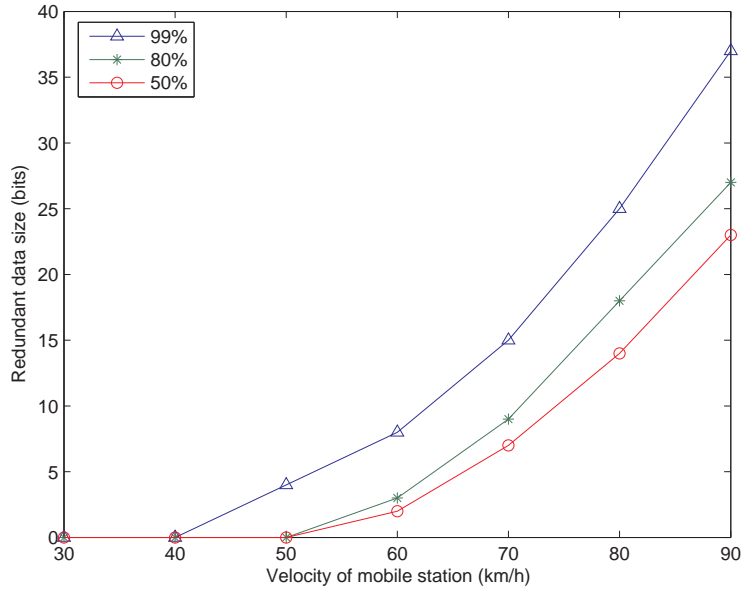


图 3.5: RS码中的冗余比特数与移动台速度之间的关系, 其中, 假设 $k = 250$ 比特 [h]

表 3.1: 仿真实验的主要参数配置

Parameters	Values
Overlap distance	200 meters
Bandwidth	5 MHz
Carrier Frequency	2.5 GHz
FFT size	512
Channel mode	Rayleigh channel
FEC code	Reed-Solomon code
Velocity	30-90 km/h

### 3.4 仿真实验与结果

我们通过计算机仿真实验来验证和评估我们的自适应前向纠错方案。在实验中, 我们使用了NS-2仿真模拟器和修改了的NIST的WiMAX仿真代码。实验主要的实验设置参数如表格3.1 所示。

这里, 我们采用的是自适应的前向纠错码方案。如图3.6所示的仿真结果是在认定理论计算得到的, 在切换成功概率为50%,80%,99%的情况下所需要的冗余比特数。最终得到的仿真所得的实验结果。对于每一组实验参数, 仿真进行1000次, 然后取结果的平均值来得到可靠的统计结果。从图中我们可以看到, 在移动台的速度较低时, 增加一些冗余比特会使得切换成功的概率会显著增加到接近于 1。而当速度逐渐增大后, 对于目标为50%的曲线, 切换成功率会下降, 但仍然会保持在50%以上。这说明, 在保证高切换成功率, 如99%, 所增加的冗余比特数较多, 我们的方案略显些保守。而且我们也注意到, 在速度为70km/h时, 理论成功率50%的曲线存在一个极值点。经过分析, 我们认为有两个原因会造成一是, 对于我们使用的Rayleigh信道模型

所计算得到的前向纠错的冗余比特不是十分准确，二是在冗余比特数与移动台速度之间并不是一个线性的关系。我们使用了最大的冗余比特数来满足前向纠错码的要求。

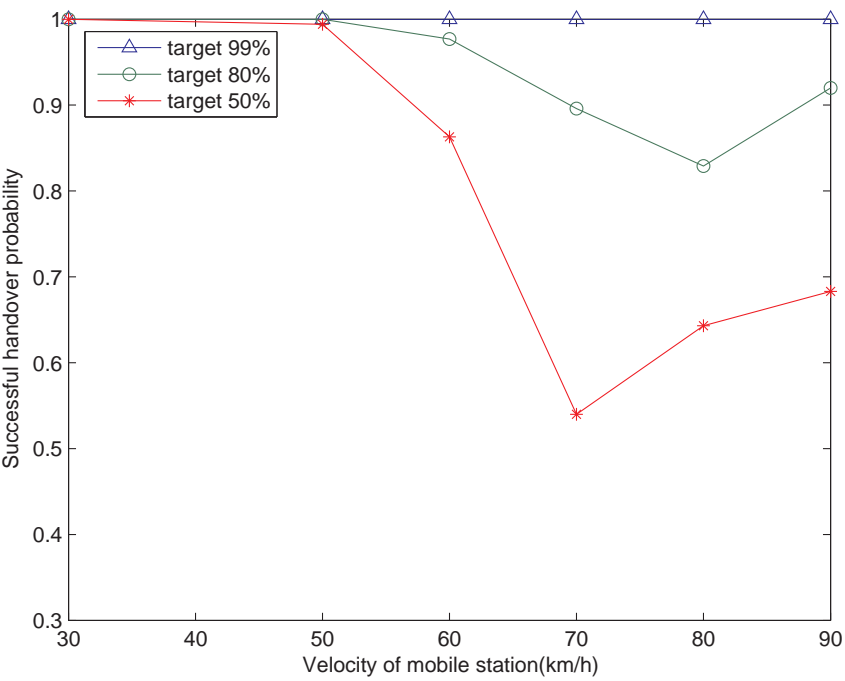


图 3.6: 仿真实验的结果

### 3.5 小结

在本章中，我们以WiMAX网络为例分析了移动台的移动速度对切换成功率的影响。分析的结果表明，由于移动台的速度增加会导致无线传输的信道变差，进而使得切换信令不能正常收发。又由于切换操作是时间受限的，所以在设计切换时要两方面同时考虑。根据理论分析，我们提出了一个简单有效的自适应前向纠错方案，通过理论计算就可以提到在不同速度下所需的冗余比特数，可以满足在不同移动速度下的切换设计需要。最后仿真实验验证了我们的理论分析和所提出前向纠错方案的正确性。

## 4 结论与展望

### 4.1 论文总结

### 4.2 研究展望

本文针对无线宽带下的多媒体蜂窝网络，从系统设计的角度出发，重点研究了MAC层中的三个问题，包括基于高速移动终端的基站切换模型，接入控制与资源分配在多媒体用户下，以及对于资源分配中博弈论理论的应用，做了深入细致的研究，取得了一些有意义的结果。但是无论从资源分配的领域，还是相关，这都是无线资源的一小部分，仍然有许多的问题作者尚未涉及。基于目前作者对这些领域的了解与认识，认为以下几点值得进一步深入开展研究工作。

(1) 在高速移动的终端下



## 致 谢

本学位论文是在刘贵忠教授的亲切关怀和悉心指导下完成的，谨向导师表示衷心的感谢，并致以崇高的敬意！在读博士期间，作者所取得的每一点进步，无不倾注着导师的心血。导师高尚的人格，渊博的学识，一丝不苟、富有启发性的治学作风，坚韧不拔、锐意进取的工作精神，民主而严谨的作风将是作者永远永远学习的楷模！

在过去几年中，十分幸运地能和3C实验室、SIGPRO实验室的许多优秀的同学一同学习交流。在此，首先感谢已经毕业离开的武林俊、苏睿，其次要感谢还在交大继续工作学习的陈志刚、钱学明、赵凡、李锋、李凡。还要感谢其他与我朝夕相处的实验室的师弟、师妹，张庆、张静、王喆、南楠、孙力、陈立水、韩一娜、谢辉、程逸逸、戈晓旦、王凤玲、高毅欣、姜海侠、张娜、郭旦萍、刘占伟、李智、王海东、张益民、王琛、党红强、任斐斐、汪欢、金剑、胡瑛、贺丽君、马亚娜、张海涛、王星、杨阳、廖开阳、王秦立、蔡秀霞、邱明建、肖丽、惠有师。他们一直全力支持我的研究和学习，也给我的业余生活带来了许多快乐。同时，也要感谢华中科技大学的徐士麟、北京大学的刘家瑛，一起在南加利福尼亚大学的学习与生活令人难以忘怀。

同时，也要特别感谢南加利福尼亚大学（University of Southern California, USC）的Prof. C.-C Jay Kuo。尽管与Prof. Kuo的交往只有一年的时间，但是 Prof. Kuo 严谨的学风、认真扎实的科研态度使我受益匪浅。还要感谢Loyola Marymount University的Prof. Lei Huang，Huang老师对我的研究工作给予耐心细致的指导和长期的鼓励，每周不但要花大量时间阅读我的周报，还对我在USC的生活给予了诸多的方便。在此对黄老师为我付诸的心血和期望表示由衷的感谢。

感谢我的学友，以及我的朋友们对我的关心和帮助。最后，要特别地感谢远在故乡的父母和兄长！在作者漫长的求学生涯中，他们始终在物质上尽一切可能给予支持，在精神上给予不断的鼓励与鞭策！

*In addition, to my wife Linlin and my son Yangtian, whose love and understanding has made all of this possible.*





## 参考文献

- [1] Majid Ghaderi, Raouf Boutaba. Call admission control in mobile cellular networks: a comprehensive survey[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2006, **6**(1):69–93
- [2] Daehyoung Hong, S.S. Rappaport. Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures[J]. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*. aug 1986, **35**(3):77 – 92
- [3] R. Lunayach, S. Rao, S. Gupta. Analysis of a Mobile Radio Communication System with Two Types of Customers and Priority[J]. *Communications, IEEE Transactions on*. nov 1982, **30**(11):2470 – 2475
- [4] Posner E., Guerin R. Traffic policies in cellular radio that minimize blocking of handoff calls[C]. *Proc. ITC*. Kyoto, Japan, 1985, 294–298
- [5] Ramachandran Ramjee, Don Towsley, Ramesh Nagarajan. On optimal call admission control in cellular networks[J]. *Proceedings of IEEE INFOCOM 96 Conference on Computer Communications*. 1997, **3**(1):29–41
- [6] Yuguang Fang, Yi Zhang. Call admission control schemes and performance analysis in wireless mobile networks[J]. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*. Mar. 2002, **51**(2):371–382
- [7] J. Vazquez-Avila, F.A.C. Cruz-Perez, L. Ortigoza-Guerrero. Performance analysis of fractional guard channel policies in mobile cellular networks[J]. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*. feb. 2006, **5**(2):301 – 305
- [8] F.A. Cruz-Perez, D. Lara-Rodriguez, M. Lara. Fractional channel reservation in mobile communication systems[J]. *Electronics Letters*. nov 1999, **35**(23):2000 – 2002
- [9] Beigy H., Meybodi M. R. A new fractional channel policy[J]. *Journal of High Speed Networks*. nov 2004, **14**(1):25–36
- [10] Yan Zhang, Boon-Hee Soong, Miao Ma. Approximation approach on performance evaluation for guard channel scheme[J]. *Electronics Letters*. mar 2003, **39**(5):465 – 467
- [11] E.A. Yavuz, V.C.M. Leung. Computationally efficient method to evaluate the performance of guard-channel-based call admission control in cellular networks[J]. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*. july 2006, **55**(4):1412 –1424

- [12] E. Del Re, R. Fantacci, G. Giambene. Efficient dynamic channel allocation techniques with handover queuing for mobile satellite networks[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on. feb 1995, **13**(2):397 –405
- [13] Melikov A. Z., Babayev A. T. Refined approximations for performance analysis and optimization of queueing model with guard channels for handovers in cellular networks[J]. Computer Commun. May 2006, **29**(9):1386–1292
- [14] K.H. Tseng, M.-T.T. Hgiao. Admission control of voice/data integration in an ATM network[C]. Communications, 1991. ICC '91, Conference Record. IEEE International Conference on. 1991, 188 –192 vol.1
- [15] J.M. Peha. The priority token bank: Integrated scheduling and admission control for an integrated-services network[C]. Communications, 1993. ICC 93. Geneva. Technical Program, Conference Record, IEEE International Conference on. 1993, vol. 1, 345 –351 vol.1
- [16] A. Iera, S. Marano, A. Molinaro. “call-level” and “burst-level” priorities for an effective management of multimedia services in UMTS[C]. INFOCOM '96. Fifteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies. Networking the Next Generation. Proceedings IEEE. 1996, vol. 3, 1363 –1370 vol.3
- [17] J.R. Fernandez, M.W. Mutka. A burst-level priority scheme for bursty traffic in ATM networks[C]. Computer Communications and Networks, 1997. Proceedings., Sixth International Conference on. 1997, 11 –16
- [18] T Kanai, Y Furuya. A handoff control process for microcellular systems[C]. 38th IEEE Vehicular Technology Conference. 1988
- [19] G N Senarath, D Everitt. Comparison of alternative handoff strategies for micro-cellular mobile communication systems[C]. Vehicular Technology Conference, 1994 IEEE 44th. 1994, 1465 –1469 vol.3
- [20] G E Corazza, D Giancristofaro, F Santucci. Characterization of handover initialization in cellular mobile radio networks[C]. Vehicular Technology Conference, 1994 IEEE 44th. 1994, 1869 –1872 vol.3
- [21] A. Sampath, J.M. Holtzman. Adaptive handoffs through the estimation of fading parameters[C]. Communications, 1994. ICC '94, SUPERCOMM/ICC '94, Conference Record, 'Serving Humanity Through Communications.' IEEE International Conference on. 1994, 1131 –1135 vol.2
- [22] R. Vijayan, J.M. Holtzman. Sensitivity of handoff algorithms to variations in the propagation environment[C]. Universal Personal Communications, 1993. Personal Communications: Gateway to the 21st Century. Conference Record., 2nd International Conference on. 1993, vol. 1, 158 –162 vol.1

- [23] J.M. Holtzman, A. Sampath. Adaptive averaging methodology for handoffs in cellular systems[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on. feb 1995, **44**(1):59–66
- [24] P. Dassanayake. Effects of measurement sample averaging on performance of GSM handover algorithm[J]. Electronics Letters. june 1993, **29**(12):1127–1128
- [25] G.P. Pollini. Trends in handover design[J]. Communications Magazine, IEEE. mar 1996, **34**(3):82–90
- [26] O. Grimlund, B. Gudmundson. Handoff strategies in microcellular systems[C]. Vehicular Technology Conference, 1991. Gateway to the Future Technology in Motion., 41st IEEE. 1991, 505–510
- [27] C.Y. Lee William. [M]. McGraw Hill, 1995
- [28] R. Beck, H. Panzer. Strategies for handover and dynamic channel allocation in micro-cellular mobile radio systems[C]. Vehicular Technology Conference, 1989, IEEE 39th. 1989, 178–185 vol.1
- [29] J. Reig. Capacity analysis in downlink WCDMA systems using soft handover techniques with SIR-based power control and site selection diversity transmission[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on. july 2006, **55**(4):1362–1372
- [30] J. Reig, L. Rubio, N. Cardona. Comparison of capacity in downlink WCDMA systems using soft handover techniques with SIR-based power control and site selection diversity transmission[C]. Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th. 2004, vol. 4, 1999–2002 Vol.4
- [31] J. Larrey, J. Reig, N. Cardona. Capacity in downlink WCDMA hexagonal and sectorized scenarios using soft handover techniques with SIR-based power control and SSDT[C]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on. 2004, vol. 1, 6–10 Vol.1
- [32] Chen Nee Chuah, R.D. Yates, D.J. Goodman. Integrated dynamic radio resource management[C]. Vehicular Technology Conference, 1995 IEEE 45th. 1995, vol. 2, 584–588 vol.2
- [33] Gerhard Rolle. "The Mobile Telephone System C 450-a First Step Towards Digitals[C]. Proc. Second Nordic Seminar. 1996
- [34] Chen Gu, Mei Song, Yong Zhang, Yi Man, Chunping Hou. GPS information assisted handoff mechanism in heterogeneous wireless networks[C]. Communications Technology and Applications, 2009. ICCTA '09. IEEE International Conference on. 2009, 743–747

- [35] Ashutosh Dutta, Sunil Madhani, Wai Chen, Onur Altintas, Henning Schulzrinne. GPS Assisted Fast-Handoff Mechanism for Real-Time Communication[C]. Sarnoff Symposium, 2006 IEEE. 2006, 1 –4
- [36] M. Asawa, W.E. Stark. A framework for optimal scheduling of handoffs in wireless networks[C]. Global Telecommunications Conference, 1994. GLOBECOM '94. Communications: The Global Bridge., IEEE. 1994, vol. 3, 1669 –1673 vol.3
- [37] V.V. Veeravalli, O.E. Kelly. A locally optimal handoff algorithm for cellular communications[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on. aug 1997, **46**(3):603 –609
- [38] R. Rezaiifar, A.M. Makowski, S. Kumar. Optimal control of handoffs in wireless networks[C]. Vehicular Technology Conference, 1995 IEEE 45th. 1995, vol. 2, 887 –891 vol.2
- [39] H. Maturino-Lozoya, D. Munoz-Rodriguez, H. Tawfik. Pattern recognition techniques in handoff and service area determination[C]. Vehicular Technology Conference, 1994 IEEE 44th. 1994, 96 –100 vol.1
- [40] Kwong Chiew Foong, Chuah Teong Chee, Lee Sze Wei. Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS) Handoff Algorithm[C]. Future Computer and Communication, 2009. IC FCC 2009. International Conference on. 2009, 195 –198
- [41] S. Kunarak, R. Suleesathira. Predictive RSS with fuzzy logic based vertical handoff algorithm in heterogeneous wireless networks[C]. Advanced Technologies for Communications (ATC), 2010 International Conference on. 2010, 189 –194
- [42] Yang Xiao, Philip Chen, Yan Wang. Optimal Admission Control for Multi-Class of Wireless Adaptive Multimedia Services[J]. IEICE Transactions on Communications. Apr. 2001, **E84-B**(4):795–804
- [43] Yi Qian, R.Q.-Y. Hu, Hsiao-Hwa Chen. A call admission control framework for voice over WLANs[J]. Wireless Communications, IEEE. 2006, **13**(1):44–50
- [44] G Djukanovic, N Gospic, M Sunjevaric. CAC Negotiation Algorithm Proposal for Higher QoS in Heterogeneous Wireless Networks[C]. Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, 2007. TELSIKS 2007. 8th International Conference on. 2007, 19–22
- [45] W Song, W H Zhuang. Multi-Service Load Sharing for Resource Management in the Cellular/WLAN Integrated Network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009, **8**(2):725–735
- [46] O Yilmaz, I R Chen. Utilizing call admission control for pricing optimization of multiple service classes in wireless cellular networks[J]. Computer Communications. 2009, **32**(2):317–323

- [47] X P Zhai, G G Bi, P P Xu. Call admission control with bandwidth reallocation for adaptive multimedia in high-rate short-range wireless networks[J]. Chinese Journal of Electronics. 2005, **14**(1):169–173
- [48] W L Ni, W Li, M Alam. Determination of Optimal Call Admission Control Policy in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009, **8**(2):1038–1044
- [49] Mona El-Kadi, Stephan Olariu, Hussein Abdel-Wahab. A Rate-Based Borrowing Scheme for QoS Provisioning in Multimedia Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2002, **13**(2):156–166
- [50] En-Hui Yang, Xiang Yu. Rate Distortion Optimization for H.264 Interframe Coding: A General Framework and Algorithms[J]. Image Processing, IEEE Transactions on. Jul. 2007, **16**(7):1774–1784
- [51] Jiaying Liu, Zongming Guo, Yongjin Cho. Bit allocation for joint spatial-quality scalability in H.264/SVC[C]. Image Processing (ICIP), 2009 16th IEEE International Conference on. 2009, 3737–3740
- [52] Zhihai He, Jianfei Cai, Chang Wen Chen. Joint source channel rate-distortion analysis for adaptive mode selection and rate control in wireless video coding[J]. Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on. Jun. 2002, **12**(6):511–523
- [53] IEEE 802.16 Working Group. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2[R]. Tech. rep., IEEE Std.
- [54] G P Pollini. Trends in handover design[J]. Communications Magazine, IEEE. 1996, **34**(3):82–90
- [55] D J Wright. Maintaining QoS During Handover Among Multiple Wireless Access Technologies[C]. International Conference on Management of Mobile Business: ICMB. 2007, 10–15
- [56] R Hsieh, Z G Zhou, A Seneviratne. S-MIP: a seamless handoff architecture for mobile IP[C]. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications: INFOCOM. 2003, vol. 3, 1774–1784
- [57] Doo Hwan Lee, K Kyamakya, J P Umondi. Fast handover algorithm for IEEE 802.16e broadband wireless access system[C]. The 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing. 2006, 16–21
- [58] Minsik Shim, Hwasung Kim, Sangho Lee. A fast handover mechanism for IPv6 based WiBro system[C]. The 8th International Conference on Advanced Communication Technology: ICACT. 2006, vol. 2, 944–950

- [59] Jenhui Chen, Chih-Chieh Wang, Jiann-Der Lee. Pre-Coordination Mechanism for Fast Handover in WiMAX Networks[C]. The 2nd International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications. 2007, 15–20
- [60] Ling Chen, Xuejun Cai, R Sofia, Zhen Huang. A Cross-Layer Fast Handover Scheme For Mobile WiMAX[C]. The IEEE 66th Vehicular Technology Conference: VTC. 2007, 1578–1582
- [61] Wenhua Jiao, Pin Jiang, Yuanyuan Ma. Fast Handover Scheme for Real-Time Applications in Mobile WiMAX[C]. IEEE International Conference on Communications: ICC. 2007, 6038–6042
- [62] G L St\ddotuber. Principles of Mobile Communication[M], 2 ed . Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2002
- [63] K K Leung, S Mukherjee, G E Rittenhouse. Mobility support for IEEE 802.16d wireless networks[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2005, vol. 3, 1446–1452