

北京邮电大学

硕士学位论文

LTE随机接入的研究

姓名：陈沐

申请学位级别：硕士

专业：信号与信息处理

指导教师：吴伟陵

20070307

LTE 随机接入的研究

摘 要

通过HSDPA和HUSPA等增强技术的实现, 3GPP无线接入技术将在未来几年中保持竞争力。为了保证未来10年甚至更长的时间内保持领先, 3GPP无线接入技术需要一个长期演进的过程来保证其竞争力。在这个背景下, 3GPP成立了LTE计划, 该计划目的是引入全新的无线空中接口和各种先进的技术, 以便达到更大的传输速率、更小的接入延迟和更大的系统容量。

本论文主要讨论了3G LTE中的随机接入信道的理论和设计。随机接入信道是一个基于竞争的上行信道。在不同的无线系统中, 随机接入的功能也有所不同。例如, 可以用作接入网络、进行资源请求、携带控制信令、进行上行同步、调整传输功率等。甚至, 它可以用作传输少量的数据。竞争机制是随机接入信道的最基本的特征。多个移动台可以同时尝试接入, 并有可能导致碰撞。

在本论文中, 我们主要讨论了当前3G LTE的随机接入的研究的进展情况。在论文的前面1到4章, 主要总结了无线接入协议、WCDMA系统中的随机接入信道设计、退避控制算法等。这些技术对于理解3G LTE中的随机接入信道设计是很有帮助的。在第五章, 主要研究了随机接入流程, 并且提出了一种改进的随机接入流程。通过仿真可知, 改进方法能够获得更好的时延性能。在第六章中, 提出了一种新型的退避控制算法, 也就是NRS算法。NRS算法是应用于多信道环境中一种接入算法, 它利用了GCL码等良好的相关特性, 通过估计重传用户的个数来改善接入的性能。该算法还利用伪贝斯估计的方法来补偿由于估计不准确而带来的问题。最后通过仿真可知, 该算法在吞吐率和时延方面都有很好的性能。

关键字: LTE、随机接入、随机接入信道、NRS

RESEARCH ON RANDOM ACCESS IN LTE

ABSTRACT

With enhancements such as HSDPA and Enhanced Uplink, the 3GPP radio access technology will be highly competitive for several years. However, to ensure competitiveness for the next 10 years and beyond, a long-term evolution of the 3GPP radio-access technology needs to be considered. Hence, 3G LTE project is initiated, which introduce new air interface and some new techniques, in order to gain faster transmission speed, reduce access latency and improve system capacity.

This dissertation mainly focuses on the design of Random Access Channel (RACH) in 3G LTE. The RACH is a contention-based channel used in uplink access, i.e. from UE (User Equipment) to Node B (base station). This channel can be used for several purposes. In different wireless system, the function of RACH differs. The RACH can be used to access the network, to request resources, to carry control information, to adjust the time offset of the uplink, to adjust the transmitted power, etc. It can even be used to transmit small amounts of data. Contention is the key feature of the random access channel. Many UE can attend to access a base station simultaneously, leading to collisions.

In this paper, we mainly discuss current consideration about RACH in 3G LTE. From 1st to 4th chapter, summary of multiple access technology, RACH in WCDMA system and backoff schemes are given to achieve a better understanding about RACH in LTE. In the 5th chapter, random access procedure is studied and a new procedure is presented, which can achieve better performance in terms of access delay. In the 6th chapter, the resource allocation scheme is research and related conclusion is made. In the last chapter, a newly designed backoff algorithm, namely NRS algorithm is proposed. NRS algorithm is suitable for multi-channel system using GCL/CAZAC signatures as their preamble. Simulation

results demonstrate that NRS can achieve very good performance in terms of throughput and delay.

KEY WORDS: LTE, random access, RACH, NRS

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名： 陈沐 日期： 2007.4.2

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在__年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名： 陈沐 日期： 2007.4.2

导师签名： 吴晓芳 日期： 2007.4.2

第一章 绪论

1.1. 3G LTE综述

1.1.1. 3G LTE 背景介绍

经过 20 多年的发展,移动通信市场靠话音业务获得了巨大的成功。移动通信技术不断发展,人们对数据业务的需求也越来越旺盛。3G 技术和未来几 HSDPA、HSUPA 技术的引入正是为了满足这些需求的。然而,运营商需要在和有线网络提供商或其他的网络提供商的竞争中保持竞争力,则必须逐年降低建设成本和运营成本,同时采用新的技术降低每比特的成本和增加网络容量。从 2004 年 11 月开始,一个名为“UTRAN 演进”或“3G+”的会议在多伦多举行。这此会议的主旨是收集关于 3GPP 版本 6 之后的无线接入网络的演进的意见。在接下来的一次全体会议上,“增强行 UTRA 和 UTRAN”的提案得到了通过并且得到了 26 个组织的支持。这说明了 3GPP 伙伴、运营商、设备商之间合作的强烈愿望,并致力于共同研究未来 3G 技术的演进。在这种背景下,3GPP 启动了 3GPP“长期演进项目”,简称为 3GPP LTE(Long Term Evolution)项目^[1]。该项目旨在通过不断演进的 3G 系统,提供更强大的数据业务支持,为用户提供更好的服务。

通常来说,发展一个新的空中接口需要 10 年的时间,而“后 3G”技术的研究到目前为止已经进行 5 年。新的 4G 频谱不会早于 2007 年的 ITU 世界无线会议前分配,加上研究、标准化和设计产品等的时间,4G 系统最早会在 2015 左右正式商用。而此期间的 2008 年到 2015 年,人们将致力于一个发展“3G+”技术的计划。该计划主要针对已经分配好的 IMT-2000 的 2GHz 的频段,将原来使用的 3G 技术的网络平台升级到 3G+技术。

1.1.2. 3G LTE 的目标和需求

LTE 着重考虑的方面主要包括降低时延、提高用户的数据率、增大系统容量和覆盖范围以及降低运营成本等。为了满足这些要求,需要对无线接口以及无线网络的体系架构进行一些改进。研究将围绕以下一些方面展开,如:物理层上下行的空中接口、第二层到第三层的接口,UTRAN 结构的调整和与射频相关的问题等。空中接口和无线接入网体系结构演进的目标主要包括以下内容^{[2][3]}:

- ◆ 极大提高峰值数据速率(在20MHz带宽下支持下行100Mbps、上行50Mbps的峰值速率);
- ◆ 在保持现有基站位置的同时提高小区边缘比特速率;
- ◆ 有效提高频谱效率(3GPP Release 6版本的2~4倍);

- ◆ 将接入网时延(用户平面UE-RNC或者NodeB以上的相应节点到UE)降低到10ms以下;
- ◆ 减小控制平面时延;
- ◆ 优化15km/h以下低速用户的性能, 能为15-120km/h的移动用户提供高性能的服务, 可以支持120-350km/h的用户;
- ◆ 吞吐量、频谱效率和移动性指标在5km半径的小区内将得到充分保证, 当小区半径增大到30km时, 只对以上指标带来轻微的弱化;
- ◆ 支持多种载波带宽;
- ◆ 5MHz、10MHz、15MHz、20MHz;
- ◆ 1.25MHz、2.5MHz, 以满足配置系统时窄带频谱分配时的灵活性;
- ◆ 支持与现有的3G系统和非3GPP规范系统的协同工作;
- ◆ 增强的MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service);
- ◆ 降低Release 6 UTRA空中接口和网络架构的成本;
- ◆ 系统和终端具有合理的复杂性、成本和功耗;
- ◆ 支持增强的IP多媒体子系统IMS (IP Multimedia Sub-system) 和核心网;
- ◆ 尽可能保证后向兼容, 但当与系统性能或容量提高矛盾时需要考虑适当的折衷;
- ◆ 有效的支持多种业务类型, 尤其是分组域 (PS-Domain) 业务(如VoIP等);
- ◆ 优化系统为低移动速度终端提供服务, 同时也应支持高移动速度终端;
- ◆ 系统应该能工作在对称和非对称频段;
- ◆ 尽可能简化处于相邻频带运营商共存的问题。

1.1.3. 3G LTE 的工作计划

从时间上来看, 3GPP 的 LTE 工作计划可以分为 Study Item(SI)和 Work Item(WI)两个阶段^{[4][5]}。第一阶段 (SI 阶段) 从 2005 年 3 月到 2006 年 6 月, 完成 3GPP LTE 的可行性研究, 形成研究报告。在 2006 年 3 月已经完成或正在进行的相关内容: RAN-CN 功能的划分与调整; RAN 体系结构的优化; 无线接口协议的体系结构; 物理层中多种接入方案、宏分集与射频部分的研究; 状态与状态转移问题。在 2006 年 3 月到 6 月将完成包括信道结构的研究、演进的 MIMO 机制、信令的流程与终端移动性问题等方面的研究。并且将在 6 月份提出 WI 阶段的工作时间计划。第二阶段 (WI 阶段) 从 2006 年 6 月到 2007 年 6 月, 使用一年左右的时间完成核心的技术规范撰写工作。在 2007 年年中完成相关标准制定工作后, 预计在 2008 年或 2009 年将成熟的商用产品推向市场。目前由于会议进度原因, 3GPP 的工作时间表比原定时间推迟了约半年。

1.1.4. 3G LTE 的热点问题和关键技术

为了实现 LTE 的设计目标, 需要着重在空中接口传输技术和接入网结构上

对现有 3G 系统进行改进。各个通信设备制造商和运营商自 LTE 研究展开以来,经过对多种方案的讨论、比较和分析,已经初步确定了一些进一步研究的工作假设。在空中接口方面,多种先进的信号处理技术将被采用,以提供更高的频谱效率和更可靠的传输性能^{[6][7]}。具体而言,包括在下行链路采用能够有效对抗多径衰落、提高频谱效率的 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex)技术;采用自适应链路技术使编码调制参数能够适应无线信道的变化;通过在发射端和接收端配置多个天线,从而提高系统的容量、改善系统性能;而上行链路则采用峰均比(Peak to Average Power Ratio, PAPR) 较低的分布式或集中式单载波频分复用提供多址接入;在帧结构和频谱规划上,尽可能与现有 3G 标准相兼容,以方便终端在不同制式系统中的切换,减小未来升级带来的投入。

在接入网体系结构方面,设计的主要目标是减小时延和复杂度,使得协议能够有效支持新的物理层传输技术,从而提供更高的用户容量、系统吞吐量和端到端的服务质量保证。在 3G LTE 中,最终将要实现所有业务通过分组域传输,如何保证各种分组业务、特别是实时性要求较高的分组业务的服务质量,将成为一个关键的问题。3G LTE 将提供分离的用户平面和控制平面,将取消 3G 标准中原有的专用传输信道,所有业务将通过一个共享传输信道来承载,因此资源调度将发挥至关重要的作用。同时,更多的功能将从原有的 RNC(Radio Network Controller)实体移植到 Node B 中,这样一方面可以减小协议处理带来的时延,另一方面可以使资源的调度等功能的实现更加靠近于空中接口,从而能更为有效地适应无线链路的变化。

1.2. 3G LTE中的随机接入

1.2.1. 3G LTE 随机接入的用途

在 GSM 系统中,随机接入信道(Random Access Channel, RACH)的主要作用是初始接入。对于 GPRS 和 EDGE 系统,由于基于分组交换的数据传输功能的增强,RACH 不仅仅作为初始接入,同时也作为数据传输的竞争信道。

在 3GPP LTE 中,一些新的特性会影响到 RACH,比如分组传输(包括实时数据)将会在分组交换域进行,用户平面数据则大部分在共享信道传输,协议状态的数目也需要减少。因此,RACH 在 LTE 中可能的用途可以总结如下^[8]:

(1) 初始接入

当一个用户在 LTE-IDLE 状态时,表明网络并不精确地知道用户处于哪个小区,该用户也没有任何小区范围内特有的识别号(C-RNTI)。为了能够和基站进行通信,用户必须发起初始接入建立 RRC 连接。这一步包含了初始接入和相关的信令流程。具体的信令内容 3GPP LTE 正进行相关讨论。相关的总结文档可以参

考文献^[9]。无论采用何种初始接入的流程，都必须包含基于竞争的随机接入过程。

(2) 建立同步

当 UE 和 Node B 尚未进行同步或者失去同步时，需要进行上行同步。这个过程可以是由 UE 发起或者由网络发起。

(3) 资源请求

在 LTE 中，由于专用信道不复存在，控制平面的数据将在共享信道传输。对于上行，每个用户需要向基站上报资源请求。基站将根据所有接收到的信息安排上行带宽给每个用户。资源请求可以根据相关因素（比如业务类型）在 RACH 或者其它非竞争信道上进行上报。

(4) 切换接入

在切换之后接入到新的小区。UE 在进行随机接入携带一定的信息，其中可以包括接入的原因。

随机接入的用途和对应的情景可以由下图表示：

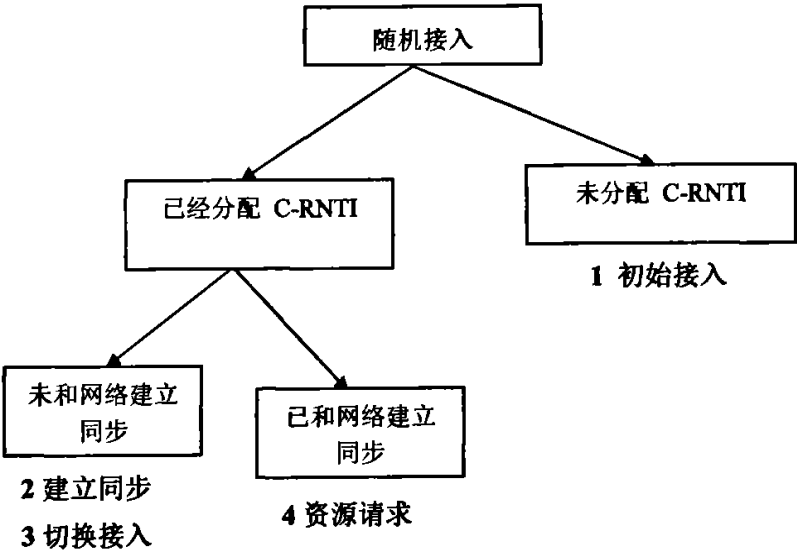


图 1-1 LTE 随机接入的用途和情景

1.2.2. 3G LTE 随机接入的要求

3GPP LTE 相关技术文档^[2]规定了从 LTE-IDLE 状态到 LTE-ACTIVE 状态和从 LTE-ACTIVE 中的 DORMANT 子状态到 ACTIVE 子状态的时延，分别为 100ms 和 50ms，如图 1-2 所示。假设这些时延不包括 NAS 时延，那么这些时延由以下几个部分组成^[10]：

- ◆ RACH 接入时延（比如碰撞退避导致的时延）
- ◆ 空中接口时延
- ◆ UTRAN 处理时延
- ◆ UE 处理时延
- ◆ 资源分配时延

虽然总的时延受到很多因素的影响，但是随机接入的时延是其中最主要的一项。

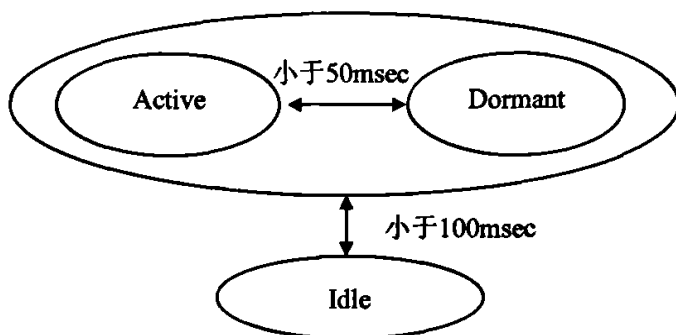


图 1-2 LTE 状态转移时延要求

1.2.3. 3G LTE 随机接入的改进方向

在 WCDMA 系统中，随机接入是一个基于两步的方案。随机接入通过功率爬坡的机制（power-ramping）来实现，同时解决了时间和功率不确定性的问题。接入消息部分的长度为 10ms 或者 20ms，所有的随机接入信道根据 ASC（接入服务类别）分成若干组。拥有不同 QOS 的用户将接入不同组别的随机接入信道。在 LTE 中，随机接入可能有如下的提高：

（1）简化的随机接入过程和接入时延的减少。

功率爬坡适用于 CDMA 系统，因为在 WCDMA 系统中，随机接入信道和其它控制信道、业务信道共享相同的时频资源，只是通过随机码来进行区分。如果码间的正交性不能完全保证，就会对其它信道的传输造成干扰。因此，在开始发起接入时，要尽可能选择较低的功率，不能被捕获时，再逐步增大功率。随着功率的增大，接入前缀被捕获的可能性也增大。因此，功率爬坡也相当于完成了初始接入时的开环功率控制，这对 CDMA 系统是非常重要的。然而对于 LTE 中上行物理层方案—分布式 FDMA 而言，可以保证信道之间的正交性，是否需要功率爬坡是值得商榷的。

据估计，基于功率爬坡的随机接入过程的平均时延达到了 1350ms。很显然这个数字已经远远超出了 LTE 的要求。为了明显地降低时延，不应该使用功率

爬坡。

(2) RACH 资源分配的优化。

在 WCDMA 系统中，所有随机接入信道根据 ASC 来分组。如此一来，在特定的接入时刻，只有部分的随机接入信道能够被用户使用。这样降低了随机接入信道容量的容量。这样显然是不希望看到的，尤其是在网络负荷比较大的时候。

另外一方面，分配给随机接入信道的资源和随机接入过程的过程几乎是静态的，不能根据接入负荷进行动态调整。

第二章 基于竞争的多址接入协议

2.1. 综述

多址接入协议可以分为非竞争和竞争协议两大类。非竞争协议通过某种方式分配专用信道资源（时间、频率或码道等），以避免冲突。因此，非竞争接入协议可以保证传输成功，并不会受到其他传输的干扰。非竞争接入协议的例子包括 TDMA (Time Division Multiple Access) 和 FDMA (Frequency Division Multiple Access)，或者令牌环等，经常用于有中央控制的网络中。而在基于竞争的多址协议中，由于存在碰撞的可能，并不是每次传输都可以保证成功。因此，接入协议必须解决冲突并保证所需发送的数据能够陆续地传输成功。

随机接入属于基于竞争的多址协议，随机接入信道是一个竞争信道，也就是多个 UE 允许同时使用该信道^[11]。竞争信道的主要问题是当多个 UE 尝试在同一时刻接入信道时，会发生碰撞。为了成功地传输数据，必须有机制去避免或者控制碰撞的发生。

2.2. ALOHA 协议

在所有 ALOHA 协议族中，纯 ALOHA^[12]协议是最基本的一种。当一个 UE 有包需要传输，它通过信道进行传输。如果没有发生冲突，则传输成功了。如果传输没有成功，每个发生碰撞的用户各自随机延时一段时间后进行重传。延时的随机性保证了重传包不会无休止的发生碰撞。为了知道包是否被正确接收，UE 将等待 Node B 反馈回来的确认指示。纯 ALOHA 协议的效率是比较低的。因为可能发生碰撞的时期为两个包长，碰撞很容易发生，使得最大的信道吞吐量仅有 0.184。一个简单的改进方法就是使用使用时隙 ALOHA^[13]。

时隙 ALOHA 协议的特点是：将时间分成长度相等的时隙，每个 UE 被限定在时隙的开始边缘发起传输。时隙的长度必须比包的传输持续时间长。这个方法减少了一半的发生碰撞时期，能够大大提高性能，使得吞吐量提高到了 0.368。在 UMTS 中使用了时隙 ALOHA 协议，该协议是很容易实现的。必须强调的是，用户之间必须实现同步。时隙 ALOHA 的基本原理如图 2-1 所示。

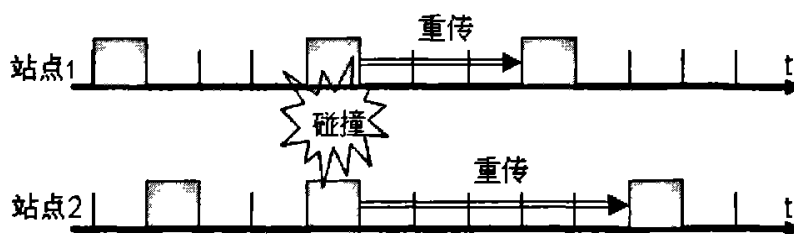


图 2-1 时隙 ALOHA 的基本原理

2.3. 基于扩频技术的时隙ALOHA协议

扩频技术与时隙 ALOHA 系统结合,可以使得它们优势互补^[14]。在结合后的系统中,所有用户共用一个扩频码。所有新产生的数据包可以在下一个时隙的开始时刻在信道上传输。这一点是时隙 ALOHA 系统的基本特性。如果两个或两个以上的数据包在一个时隙内被发送,这些数据包在时间轴上会有重叠的部分,在信道中会发生碰撞,但是这些发生碰撞的数据包不一定全部被毁坏。只要它们到达基站的时间之差满足一定的条件(这是扩频 CDMA 固有的时延捕捉特性),它们中的一些便可以被基站中的上行接收机成功接收。这一点是传统的时隙 ALOHA 和结合了扩频技术的时隙 ALOHA 系统的最主要区别。由于结合后的系统具有了时延捕捉特性,它的系统吞吐量会比传统的时隙 ALOHA 系统高出很多^[15]。

由于应用了扩频信号,即便所有的数据包使用同一个扩频码,基站的上行接收机也可以区分出不同的数据包。根据扩频码的特性,如果两个使用同一个扩频码的数据包恰巧绝对同时到达基站接收机,则它们会表现出很强的相关性。但是如果这两个数据包的到达时间不是绝对相同(它们的到达时间之差大于一个码片的宽度),则可以认为这两个数据包是准正交的。如果合理的设置基站中上行接收机的结构,并将此特性加以利用,那样就可以让接收机准确的观察并记录下信道中彼此竞争的数据包与接收机中匹配滤波器所产生的相关尖峰在时间轴上的具体位置。通过这样的记录,一些满足条件的数据包会被成功的跟踪并最后被成功捕捉,其余的数据包会被接收机拒绝。容易看出,这一条件很大程度上取决于这些数据包的到达时间。

2.4. 树型多址协议

在 ALOHA 系统中，一般采用了冲突时延和重传机制，时延特性只具有统计均值，而无明确的上限保证。而在采用树型搜索算法的多址协议中一次完整的搜索长度可以确定，因此可以提供明确的时延上限。

在树型算法中，信道可以分成上行和下行两个通道，用户向系统端发出的业务使用上行信道，系统使用下行信道将算法的控制信息下发给用户。系统信道的时隙结构如图 2-2 所示，每发生一次碰撞，下行信道就下发控制信息，控制碰撞之后的分支数目，即时隙数。树型算法的实现依靠下行信道的控制信息的传输。在一次碰撞之后，系统通过下行信道将该碰撞时隙的用户分成几个组，不同的组对应不同的时隙，如果分组的时隙再发生碰撞，则重复相同的算法，直到所有时隙都是成功传输（或出现空闲时隙），就可以使本次碰撞的所有用户传输一次。图 2-3 是有 6 个站点冲突的完整搜索时序示意图。

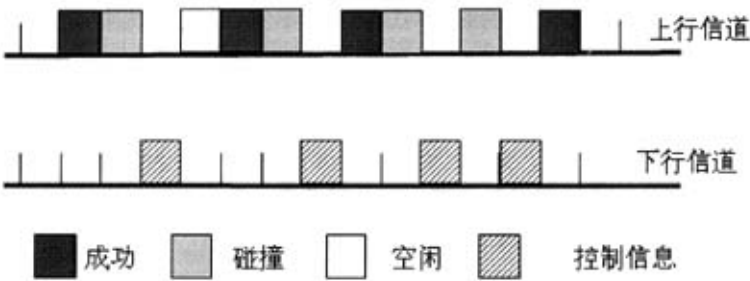


图 2-2 树形算法信道时隙结构

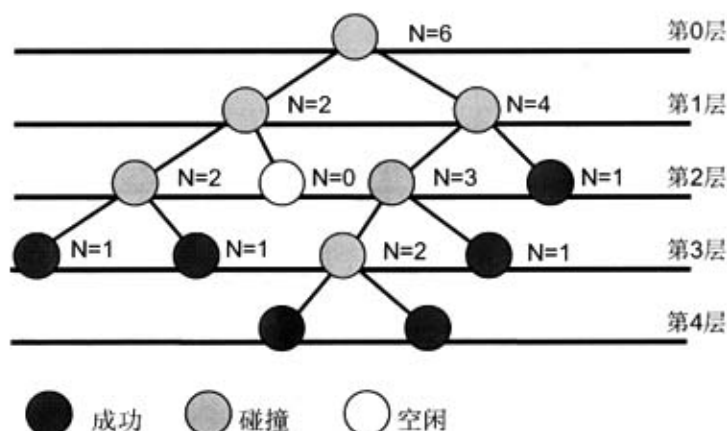


图 2-3 树形算法时序示意图

不同的分支数目最适合的业务到达强度是不同的。轻负载时候 2 叉算法比多分支算法有优势，原因是轻负载条件下每次碰撞的用户数目少，过多的分支使的空闲时隙增加，浪费了信道容量；中等负载时 3 叉和 4 叉算法性能好，此时 2 叉算法中碰撞的时隙增加，而多分支算法中空闲时隙减少；当信道业务强度继续增加时，固定分支的算法效率都下降，但是分支数目越多，下降点开始越晚。

由于业务到达的随机性，使的固定树型的搜索算法，都不能适应变化的业务流量。动态树型算法可以解决整个问题，可以参考^[16]。它的缺点是复杂度比较高，为实现该算法需要记忆的信道过程较固定算法多。

树型算法的最大优势在于其稳定性，无论输入负载如何变化，系统总可以保持一定的吞吐率。ALOHA 类协议采取了控制发送概率、随机延迟等方法，是将竞争在时间上向后分散开来，这种策略对短时的冲突有效，如果负载长时间保持在一个较高的门限上，将冲突推迟到后面只会增加后面冲突的概率，导致冲突更加频繁，最终导致系统吞吐量急剧下降。树型算法在于每次发生冲突之后，禁止部分发生冲突的站继续参与竞争，降低下一时隙竞争用户的个数，从而降低冲突发生的概率，保证了协议的稳定性^[17]。

2.5. CSMA 协议

CSMA 协议(Carrier Sense Multiple Access)是应用于如以太网、无线局域网等网络的多址技术^[18]。它的特点是用户在传输之前监听信道，只在信道空闲的时候

才发起传输。如果传输媒介被监听到忙碌，传输将推迟一段时间进行。当信道并不是高度负载时，该协议是非常有效的，具有很好的时延性能。然而，冲突仍然有可能发生。如果两个用户同时监听到信道空闲并决定传输，那么将发生碰撞。

根据监听信道的策略，CSMA 可以分为^[19]：非坚持性 CSMA，坚持 CSMA。非坚持 CSMA 的特点示当检测当信道忙碌时，主动地退避一段时间，暂时放弃坚持检测信道。坚持 CSMA 的特点示一直要坚持连续检测信道直到信道空闲为止。坚持性 CSMA 又分为 1-坚持 CSMA 和 p-坚持 CSMA。

根据不同的应用环境、传输媒质和碰撞解决的方法不同，CSMA 又分为：CSMA-CD (Collision Detection)和 CSMA-CA (Collision Avoidance)。

在 CSMA-CD 协议中，用户将可以在发送数据的同时，检测多个传输（包括自己的）之间的冲突，并且中止传输发生碰撞的包。这样的话，无效的传输时间将被减少。

以太网中采用了 CSMA-CD 协议，但是它不能在无线环境中使用。因为不是所有站点都能够互相监听到对方，而且这种机制要求全双工方法，能够实现同时发送和接收。一个解决这些问题的方法是使用碰撞避免的过程，802.11 中采用了 CSMA-CA 协议作为多址接入技术。具体的方法如下^[20]：

- (1) 在任何传输之前，站点先监听网络媒介。
- (2) 一个站点如想传输数据，首先发送一个 Request-To-Send(RTS)的包。这个包包含了数据的长度信息 T_{data} 。
- (3) 接收端反馈一个 Clear-To-Send(CTS)控制包，该包包含了相同的信息 T_{data} 。如果发送端没有收到 CTS 包，那么它将不进行数据传输。
- (4) 当站点监听到 RTS 时，则在 $T_{data} + T_{CTS}$ 的时间内不进行任何动作。
- (5) 当站点监听到 CTS 时，则在 T_{data} 的时间内不进行任何动作。

CTS 和 RTS 是非常短的包。因此它们发生碰撞的概率很低。而且，这种法减少了站点隐藏情景下发生碰撞的概率，如图 2—4 所示。

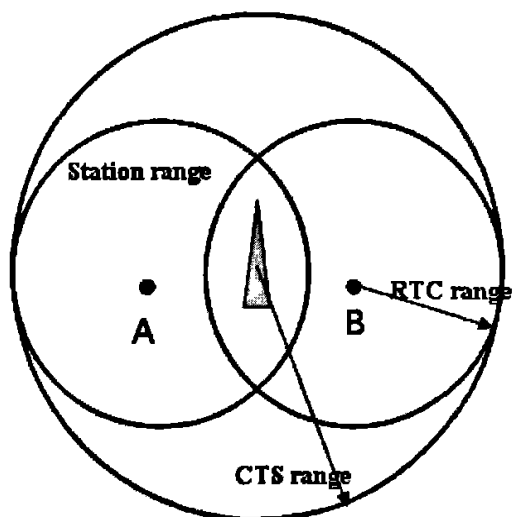


图 2-4 通过接收 CTS 进行碰撞避免的示意图

2.6. 预约时隙协议

预约方案同时具有 ALOHA 和 TDMA 的优点。它要求连续的信息广播和不同站点间良好的同步。有两类的资源预约方法：直接预约和间接预约。

分组预约多址接入（PRMA, Packet Reservation Multiple Access）是一种间接的预约协议。它的原理非常简单，包括了竞争和预约两个方面。时间帧被划分为相等的时隙，相同编号的时隙将周期性地出现，相当于多信道的情形。首先所有的终端使用 ALOHA 协议和其他终端进行竞争。当有一个站点成功接入某时隙，那么后续帧中的相同时隙将自动地分配给该站点。当站点停止使用该时隙时，时隙将释放出来，重新用作竞争接入。当站点接入成功时，Node B 需要通过广播发送指示。在发起接入之前，站点通过监听广播知道哪些时隙是可用的。

预约 ALOHA 协议采用了直接调度的方案。和 PRMA 一样，它包含了竞争和预约两个部分。因此，时间帧被分为两个阶段，竞争阶段和预约阶段。竞争阶段包含了若干个短时隙。在这个阶段，终端将使用 ALOHA 协议进行竞争接入。预约阶段则包含了比较长的时隙。如果一个 UE 在竞争阶段成功得到一个短的时隙，那么它可以在对应的预约时隙进行传输。该协议的实现方法如图 2-5 所示。

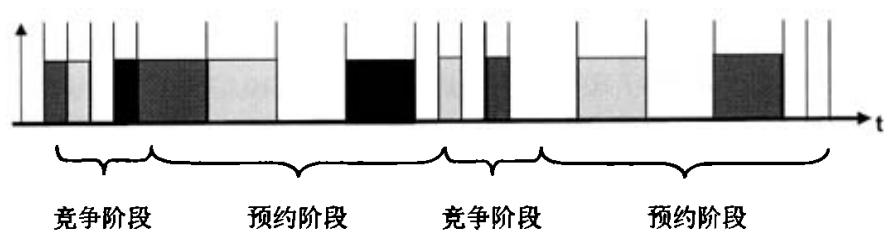


图 2-5 预约 ALOHA 协议的示意图

第三章 WCDMA 随机接入过程

这一章主要描述 WCDMA 系统中的随机接入过程。了解现有系统的工作机制是非常有益的，有助于我们理解随机接入原理。尽管 3G LTE 中的空中接口和 WCDMA 已经是完全不同，但是很多方面仍然是相通的。

在 WCDMA 中，随机接入信道（RACH）通常用来传输信令，如：开机后向网络注册，或从跨区移动后进行位置更新，以及对呼叫进行初始化等^[21]。

移动台的随机接入信息是通过随机接入物理信道(PRACH)发送的。基站捕获了移动台发送的反向接入信息后，在无需上层干预的条件下，通过 AICH 信道发送捕获指示(AI)信息。移动台收到捕获指示 AI 信息后，根据 AI 指示或发送随机接入消息部分(收到 Ack 时)或开始新的接入尝试(收到 Nack，即发生碰撞时)。此过程是建立在时隙 ALOHA 基础上完成的。移动台的信息不管何时产生，都要在事先定义好的时间间隔(接入时隙)开始接入。

3.1. 随机信道的定时

上行 PRACH 和下行 AICH 都被划分为许多接入时隙，每两帧有 15 个接入时隙，每时隙长 5120 码片^[22]。如图 3-1 所示，上行 RACH 前导部分和 RACH 信息部分只能在每个上行链路接入时隙开始处发送；捕获指示 AI 也只能在下行链路接入时隙开始处发送。移动台在每个接入时隙开始时发起接入尝试。本小区中哪些时隙可用的消息在广播控制信道中发布。基站接收机根据 PRACH 接收定时，在正确地捕获了 RACH 的前导之后在 AICH 信道发送捕获指示信息(AI)。移动台在得到 AI 信息之后与已发的最后一个前导相隔 τ_{p-m} 发送消息部分。

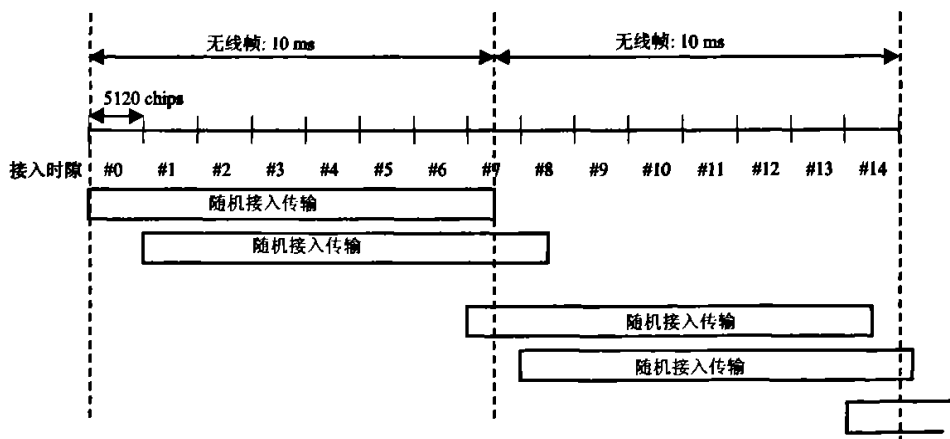


图 3-1 随机接入时隙和接入位置

图 3-2 为 PRACH 和 AICH 的定时关系, 其中: τ_{p-p} 为前导之间的间隔(L1 层控制); τ_{p-a} 为前导和捕获指示之间的间隔, τ_{p-m} 为前导和信息之间的间隔。各参数的取值和范围由 AICH-Transmission-Timing (由高层设置的参数) 决定, 图 3 所示为 AICH-Transmission-Timing 为 0 的情况。

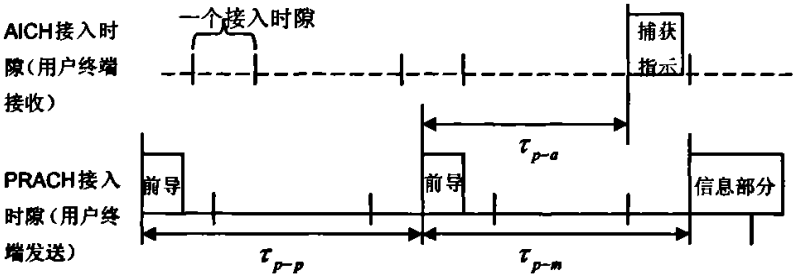


图 3-2 从用户终端看 PRACH 和 AICH 之间的定时关系

3.2. 随机接入信道结构

移动台用物理随机接入信道(PRACH) 的接入机制基于时分 Aloha 方案, 每两个 10ms 的帧中包括 15 个接入时隙。每个时隙的长度为 5120 个码片随机。接入传输信息包括前导和信息两个部分。

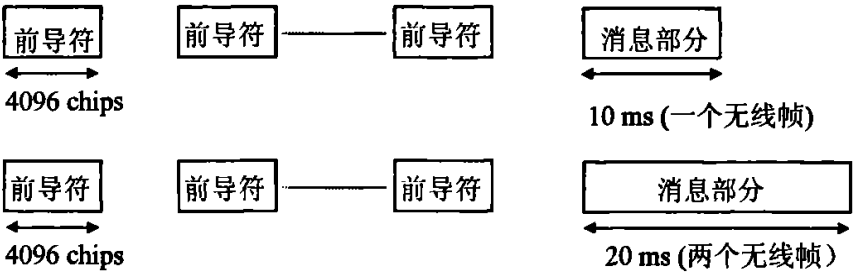


图 3-3 随机接入突发结构

前导部分由前导扰码和前导标志码(signature)构成, 其中标志码(signature)用于在物理层标识用户, 指示消息部分扩频码码号。每个前置码有 4096 个码片长, 包含重复 256 次的 16 个码片长的标记。

消息部分长度为 10ms 或者 20ms。如图 5 所示为随机接入消息部分无线帧，每个无线帧 10ms，被划分为 15 个时隙，每时隙 2560chips。每个时隙由两部分组成：数据部分(用来映射 RACH 传输信道)；控制部分(用来承载 L1 层的控制信息)。数据部分和控制部分是并行传输的，消息部分长度为 10ms 时它包括一个无线帧，消息长度为 20ms 时它包括两个无线帧，消息部分的长度由高层来配置。

数据部分允许采用的扩频因子为 256, 128, 64, 32，因此依据扩频因子而定，每个时隙数字部分发送的比特数为 10, 20, 40 或 80bit。控制部分采用 256 的扩频因子。每个时隙只包含 10bit，其中 8bit 是允许接受端进行相干检测的导频比特，还有 2bit 用来指示 RACH 传输信道消息部分传输格式的 TFCI 信息。数据部分的信息和控制部分的信息是同时发送的，即用两个不同的 PN 码同时发送消息的数据和控制部分。

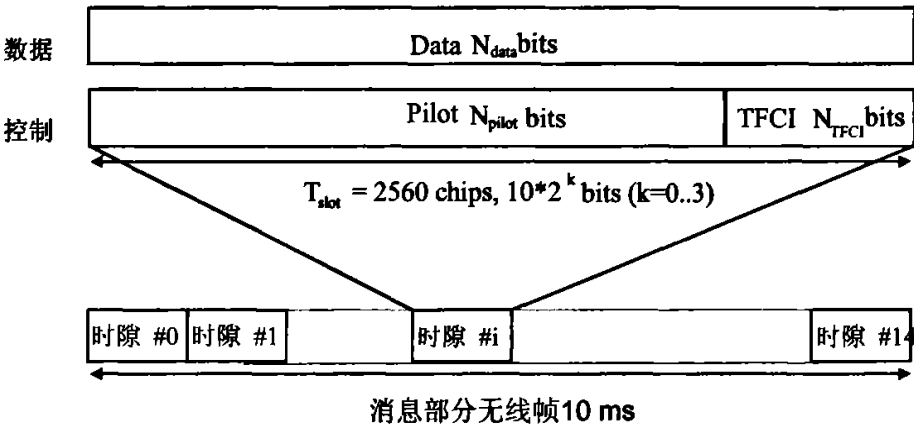


图 3-4 随机接入消息部分帧结构

3.3. 物理随机接入过程

随机接入过程中 MAC 层负责 RACH 传输的传输时间间隔(TTI)级(即 10ms 无线帧级)的定时控制，接入时隙(Access Slot)级的定时由 L1 层控制。在 RACH 消息部分出错需重传的情况由高层控制(RLC 或 RRC)。

- 物理层对随机接入的控制过程如下^[23]：
- (1) 根据给定的 ASC 的可用 RACH 子信道，得到可用的上行接入时隙。在这些时隙中随机选取一个接入时隙。如果当前没有可用的时隙，那么下一个无线帧(10ms)中可用的时隙随机选取一个时隙。随机函数应使每种允许的选择等概率的被选取。
 - (2) 按给定的 ASC 从可用的签名中随机选取一个签名。随机函数应使每种允许

的选择等概率的被选取。

- (3) 将前置重罚计数器设置为 $\text{Preamble_Retrans_Max}$ 。
- (4) 如果 $\text{Preamble_Initial_Power}$ 比最低的功率要求低, 则将受控前置功率设为一个大于 $\text{Preamble_Initial_Power}$, 小于要求的最低功率的一个值。否则, 将受控前置功率设置为 $\text{Preamble_Initial_Power}$ 。
- (5) 若受控前置发送功率超过最大允许功率, 则将前置发送功率设置为最大允许功率。若受控前置功率比最小功率要求小时, 将前置发送功率设为一个大于或者等于受控前置功率, 小于最低要求功率的一个值。否则, 将发射功率设置为受控前置功率。按照选定的上行链路接入时隙, 签名, 和前置发射功率发送一个前置。
- (6) 如果在选定的上行链路接入时隙对应的下行接入时隙内, 没有检测到对应的已选签名的正或负的捕获指示(AI+1 或-1)。
 - ◆ 按 1 中的选取方式, 选择一个新的上行链路接入时隙, 作为下一个可用接入时隙;
 - ◆ 在给定的 ASC 可用签名中随机选择一个新的签名, 随机函数应使每种允许的选择等可能的被选取。
 - ◆ 按 $P_0 = \text{Power_Ramp_Step}[\text{dB}]$ 增加前置的发送功率;
 - ◆ 将前置重计数器减一;
 - ◆ 如果前置重发计数器 > 0 , 从步骤 6 重复。否则, 发送 L1 状态给高层(MAC)并推出物理随机接入过程。
- (7) 如果在选定的上行链路接入时隙对应的下行接入时隙内, 检测到对应的已选签名的负捕获指示, 发送 L1 状态 ("Nack on AICH received")给高层并退出物理随机接入过程;
- (8) 依据 AICH 发送定时参数发送完上一次前置后三或四个上行接入时隙, 发送随机接入消息。随机接入消息控制体的发送功率应该比上次发送前置的功率一个 $P_{p-m} [\text{dB}]$ 。
- (9) 发送 L1 状态 "RACH message transmitted"给高层并退出物理随机接入过程。

3.4. MAC控制的随机接入过程

MAC 控制的随机接入过程如下:

- (1) 有数据要传送时, MAC 在可用的 ASC 组中选择某一 ASC, 它包括 PRACH 的信道标识 i 和相关的持续因子 P_i 。
- (2) 根据 P_i 移动台决定是否启动 L1 的 PRACH 传输过程, 如果启动此过程 MAC

层向 L1 层发送“PHY-ACCESS-REQ”原语。 P_i ($0 \leq P_i \leq 1$) 为发送概率, 用来控制两组前导之间的时间间隔, 在控制过程中抽取一随机数 R ($0 \leq R \leq 1$)。当 $R \leq P_i$ 时启动 L1 的 PRACH 传输过程, 开始下一组前导的发送。否则再延迟一个 TTI, 开始新的持续检测。 P_i 取值越大区间越大, 随机数 R 落入其中的概率越大, 延迟时间就短。

- (3) MAC 层通过接收 L1 层发来的“PHY-ACCESS-CNF”原语得知接入信息。如果收到“No ack on AICH”信息, 在下一个传输时间间隔(TTI)将开始新的持续检测。定时器 T_2 用来确保两个连续的持续检测之间至少有一个 TTI。如果收到“N ack on AICH Received”信息, 补偿计时器 T_{BOI} 开始工作。定时器满后, 持续检测重新开始, 补偿计时器 T_{BOI} 被设置为整数倍的 TTI (N_{BOI}), 是在给定范围($0 \leq N_{BOImin} \leq N_{BOI} \leq N_{BOImax}$)之间随机抽取一个数。当延时固定时 $N_{BOImin} = N_{BOImax}$; 当不需要延时, 即只需要一次持续检测时 $N_{BOI} = 0$ 。如果收到“Ack on AICH Received”信息, 向 L1 层发 PHY-DATA-REQ 原语, 按格式发送随机接入的消息部分。
- (4) 在每次持续检测形成之前, 都要检查是否从 RRC 发来新的包括 RACH 传输控制参数信息的原语“CMAC-Config-REQ”, 如果有则更新参数。

第四章 3G LTE 随机接入的讨论

4.1. 上行定时调整

在 LTE 中，UE 和 Node B 之间的定时存在两种情况：同步和非同步。在初始接入之前，系统完成了下行时隙同步和下行帧同步的相关过程，而上行是不同步的。此时，移动台从广播信号中得知时隙和帧的开始和结束位置。但是由于下行传播时延，UE 实际接收到广播信号的时间和 Node B 发送广播信号的时间是不一样的。因此，移动台无法估计在什么时刻发送数据，才能保证 Node B 在期望的时间接收到信号。

在 3G LTE 中，物理层的上行同步过程将作为随机接入流程的一个部分来完成。Node B 在成功接收到 UE 的接入信号后，通知 UE 一定的时间偏移量（时间提前量），UE 将按照这个偏移量设定发送时间，补偿由于传播造成的时延。上行定时调整的具体实现过程，如图 4-1 所示：

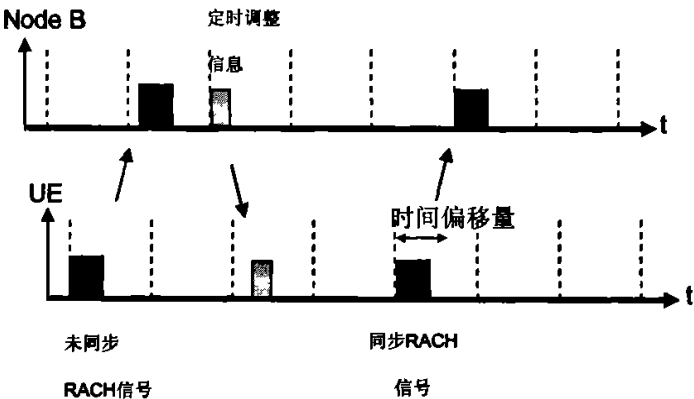


图 4-1 上行定时调整过程

在成功的随机接入过程之后，Node B 和 UE 实现了上行同步。这样的话，各个用户上行信号就能够在期望时间到达 Node B。

4.2. 资源请求

在传输任何数据之前，UE 需要得到上行传输的资源。NodeB 扮演了调度器的角色并确提供给 UE 调度信息。在 E-UTRA 中，随机接入可作为一种请求带宽

和时间资源的方法。请求带宽可以使用以下几种方案^[24]。

- (1) RACH 过程只用作上行同步和调整功率。随机接入的主要目的是建立 UE 和 Node B 的同步，随后发起资源请求来获取上行资源。这个资源请求的过程也是基于竞争的，区别在于此时系统已经是同步的。具体过程，如下图所示：

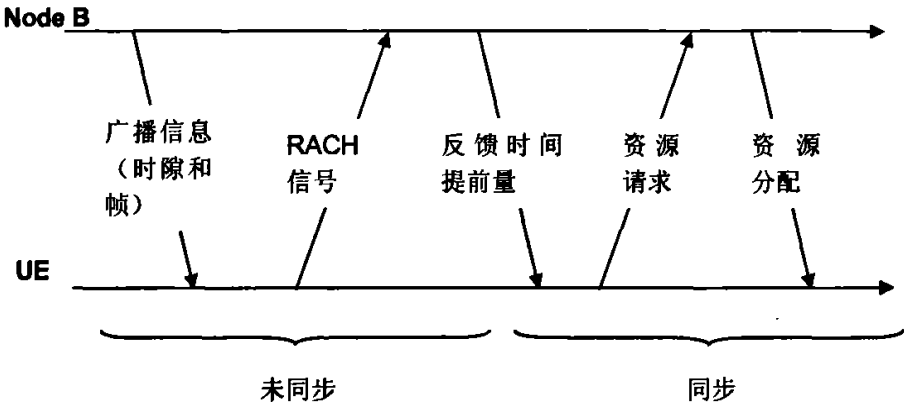


图 4-2 资源请求方案 1

- (2) 随机接入信号由两个相互独立的部分组织：随机接入前缀符和随机接入消息。前缀符（或称为签名 signature）是一个伪随机序列。它的特性是，若干个前缀符在相同频率和时间上接入，系统仍可能检测出来。随机接入消息则包含着一定信息。消息部分的内容可以包括用户 ID、需要的资源量、请求的原因、接入的性质等。在这里，消息部分可以包含资源请求的信息。对于 Node B 端而言，只有前缀符用于检测。在成功检测出前缀符时，消息部分可以同时译码并且解析出来。如果网络有足够的资源，那么 Node B 将发送一个资源确认给 UE。同时，前缀符可以用作消息部分解调的参考符号。
- (3) 随机接入信号只包含了前缀符号，但是前缀符隐含地表示了资源请求的内容。一组前缀符可以包含多个不同的序列，每个序列对应特定的频率和时隙。如果成功检测的话，UE 和 Node B 都知道哪些资源将会被使用。

4.3. 随机接入信道时间频率结构

关于如何分配资源给随机接入信道和上行已调度信道（scheduled channel），有两种可能的方案。第一种方案是在特定的子帧内，分配整个系统带宽给随机接入信道。第二种方案是在只有部分系统带宽分配给随机接入信道。两种方案的示

意图如下:

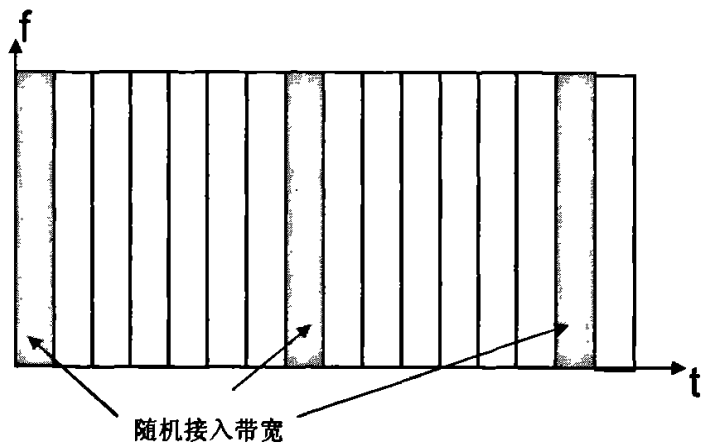


图 4-3 随机接入带宽分配方案 1

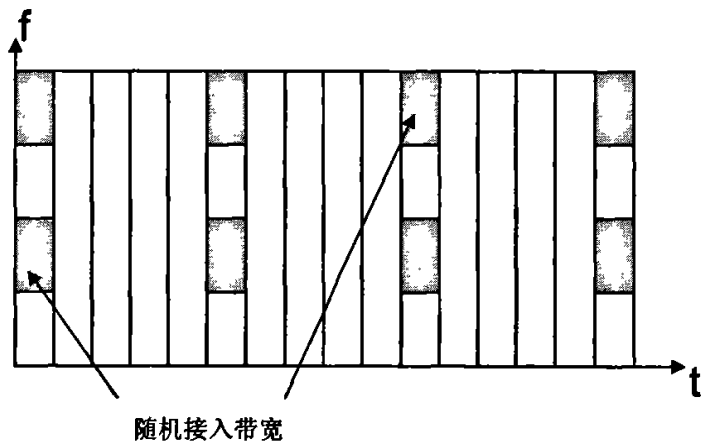


图 4-4 随机接入带宽分配方案 2

无论是使用哪种方案，随机接入都不能超过一个 TTI（Transmission TimeInterval）的长度。一个 TTI（子帧）的长度为 0.5ms。LTE 的无线帧长度为 10ms，因此包括了 20 个 TTI。选择哪种方案主要由 UE 可支持的带宽大小决定的。随机接入的带宽越大，越容易达到比较好的检测成功率。如果 UE 支持的带宽较小，比如 1.25M 或者 2.5M，每个随机接入信道的带宽不能太大，第二种方案将是比较合适的选择。如果 UE 支持的带宽比较宽，比如 10Mhz 或者 20Mhz，那么第一种方案比较适合。

传输带宽越大，能提供更多的分集增益，能达到更好的检测成功率。当负载

比较大的时候，分配多个传输带宽给随机信道，可以减少碰撞发生的概率。因此可以采用自适应的分配带宽的方式来改善随机接入的性能。但是这种方法的代价是增加了系统复杂性。Node B 可以估计当前负载的大小，然后将接入信道的分配方案广播给那些准备接入的 UE。比如，如果给定 10Mhz 的系统带宽。在低负载时，Node B 可以分配 5Mhz 的带宽给随机接入信道，每个子帧两个信道。在高负载时，Node B 可以分配 1.25Mhz 的带宽给随机接入信道，每个子帧 8 个信道。

随机接入信号在特定的子帧内进行传输的，一个子帧的长度为 0.5ms。为了避免对下一个子帧造成干扰，需要规定一定的保护间隔。也就是说，随机接入信号的长度应设计成小于 0.5ms。这样设计的目的是避免 Node B 在专门用于数据传输的信道上接收到随机接入信号。保护时间的长度由小区大小确定。越大的小区意味着往返传播时间 (RTT, round trip time) 越长。需要计算 RTT 时间来确定保护时间的长度。

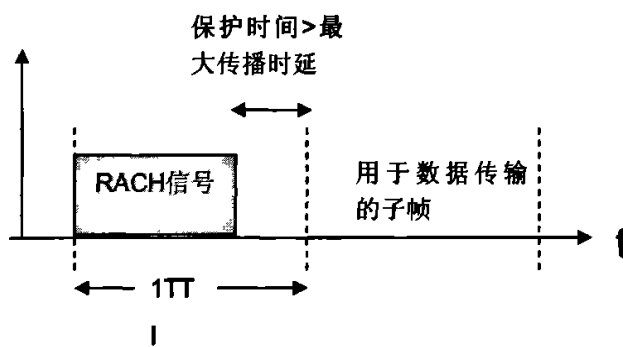


图 4-5 必要的时间保护间隔

比如，UE 和 Node B 之间的距离为 10km，那么对应的 RRT 为 66.67 μs 。一个典型的时间保护间隔应该为 10 μs 。然而，LTE 规定可以支持非常大小区，也是支持半径达 100km 的小区。在最差的情况下，RTT 为 0.66ms，甚至超过了一个 TTI 的长度。一个简单的克服这个问题的办法是保证接入子帧的下一帧不用作数据传输。在这种情况下，Node B 调度器将不会分配该子帧给任何用户，该子帧相当于保护时间间隔。

4.4. 功率调整

4.4.1. 开环功率控制

在 WCDMA 中，物理层使用码分多址技术，随机接入是在和上行数据传输相同的频率和时间进行的。这样就不需要专门分配资源给随机接入，但是会造成干扰。因此，在 WCDMA 中需要功率爬坡的过程来减少干扰。用最大传输功率传输会导致太多的干扰，因而影响正常的数据接收。上行的功率是由最后一次接入的前缀的发射功率所决定的。Node B 并没有直接通知 UE 去调整发射功率。

在 E-UTRA 中，随机接入和数据传输使用的资源是相互正交的，因此不需要特殊的过程来控制干扰。因此，可以省略功率爬坡过程可以省略也便更快地进行接入检测。当不使用功率爬坡时，可以使用以下过程来确定上行发射功率：

(1) UE 根据开环功率控制的结果确定一个合适的传输功率或者使用最大的传输功率。

(2) 当成功检测时候，Node B 估计出功率调整量，并且在反馈 UE 接入成功的同时通知需要调整的功率大小。

合适的功率调整量可以使得的传输能量大小处于最优的水平，并因此延长了电池寿命。

4.4.2. 功率爬坡过程

在随机接入过程中，检测时延和能量消耗之间存在互替关系。每次随机接入都使用比较高的功率传输，固然可以减少检测延时，但是同时也会消耗更多的能量。

在窄带宽的情况下（比如 1.25Mhz），功率爬坡可以用作避免深度衰落的影响。同时，功率爬坡过程是一种对抗高负载饱和的有效方法。在高负载的情况下，很多 UE 将使用相同的频率和相同的时隙进行接入。如果每个 UE 都使用大功率尝试接入网络，那么 SIR（Signal to Interference Ratio）会变得很小，因此检测概率将会降低。使用功率爬坡的方法可以使得非同步用户之间的干扰比较小。最后，功率爬坡过程可以是一个在用户之间提供优先级的很好方法。例如，紧急呼叫可以使用功率爬坡过程而普通呼叫则不可以使用该过程。此外，还可以通过采用不同的步长来提供不同的优先级。上述方法总结如下：

- ◆ 1.25Mhz 传输带宽下，功率控制将用作对抗本地深衰。使用的步长是 UE 的优先级的函数。
- ◆ 在比较宽的带宽下，功率爬坡过程作为一种选择。Node B 通过广播告诉 UE 是否需要进行功率爬坡。

在 LTE 中，功率爬坡的示意图如下^[25]。

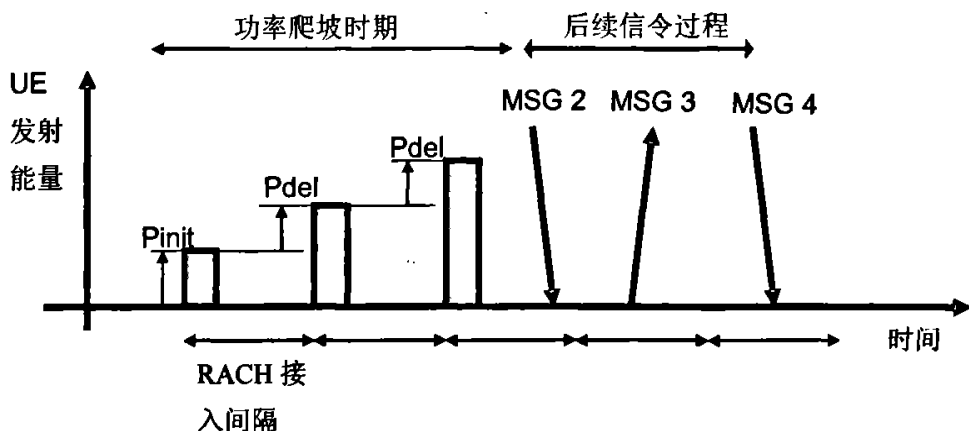


图 4-6 LTE 中随机接入功率爬坡过程

4.5. 前缀符的设计

RACH 前缀符的设计应当符合一下几个特性：

- ◆ 良好的自相关特性，以便得到准确的时间估计进行上行同步。
- ◆ 良好的互相关特性，以便得到非同时到达的不同接入前缀符的时间估计。
- ◆ 良好的互相关特性，与同时到达的不同前缀符的互相关特性为零。

在 WCDMA 中，RACH 前缀符满足以上所说的大部分特性。然而，其中的一些特性，比如相关特性可以进一步提高。也就是说，同时多个前缀同时发送时，SIR 值比较小，其检测成功率可以进一步提高。自相关和互相关都很小的区间为接入时延范围。这个时延范围是由 Node B 到 UE 的传播时延所决定的，因为 UE 的 RACH 传输是同步于 Node 发射的广播导频信号。这个小相关区域应当小于 RACH 前缀符的长度。在这个前提下，前缀符的设计应关注于得到更好的相关特性上。正交 GCL 序列就是符合以上特性的一种很好的序列。

在这里，首先介绍零相关区（ZCZ）序列集合。ZCZ 序列集合是一组相同长度的序列，在时延范围 $|p| \leq T$ 内，他们的自相关函数值为 0；同时，同组的不同序列在相同的时延范围 $|p| \leq T$ 内的循环互相关函数值也为 0。拥有这样性质的序列称为零相关序列。给定序列的长度 N 和给定序列数目 M ，ZCZ 中时延范围 T 值的上限在文献^[26]给出：

$$T \leq N/M-1 \quad \text{式 (4-1)}$$

在所有 ZCZ 序列中，一类叫 GCL（Generalized Chirp-Like）的正交序列比较适合在随机接入信道中使用^[27]。一个 GCL 序列 $\{c(k)\}$ 定义如下：

$$c(k) = a(k)b(k \bmod m), \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad \text{式 (4-2)}$$

其中 $N=sm^2$ ， s 和 m 为正整数， $\{b(k)\}$ 是一个“调制”序列，为单位幅度的 m 进制复序列，而 $\{a(k)\}$ 是特殊的“载波”序列，为 Zadoff-Chu 序列。定义如下：

$$a(k) = W_N^{k(k+N \bmod 2)/2 + qk}, k=0, 1, \dots, N-1 \quad \text{式 (4-3)}$$

其中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$, r 和 N 互质, q 是任意整数。

对于正交调制序列的选择而言，最适合的选择为哈达序列和 DFT (Discrete Fourier Transform) 序列，DFT 序列定义如下：

$$b_i(k) = W_m^{ik}, \quad i, k = 0, 1, \dots, m-1. \quad \text{式 (4-4)}$$

一组哈达序列是由 $m \times m$ 的哈达矩阵定义的。定义方法如下：一个只包含 1 和 -1 的 m 维哈达码矩阵 H_m 满足 $H_m H_m^T = mI$ ，其中 I 维单位矩阵。对于 $m=2^n$ ，其中 n 为正整数，哈达序列可以定义为：

$$b_i(k) = (-1)^{\sum_{l=0}^{n-1} i_l \cdot k_l}, \quad i, k = 0, 1, \dots, m-1, \quad \text{式 (4-5)}$$

以 GCL-DFT 序列为例，它的自相关和互相关特性如图 4-7 所示。参数见表格：

表 4-1 相关函数的仿真参数

m	4
s	25
N	400
q	0
r	1

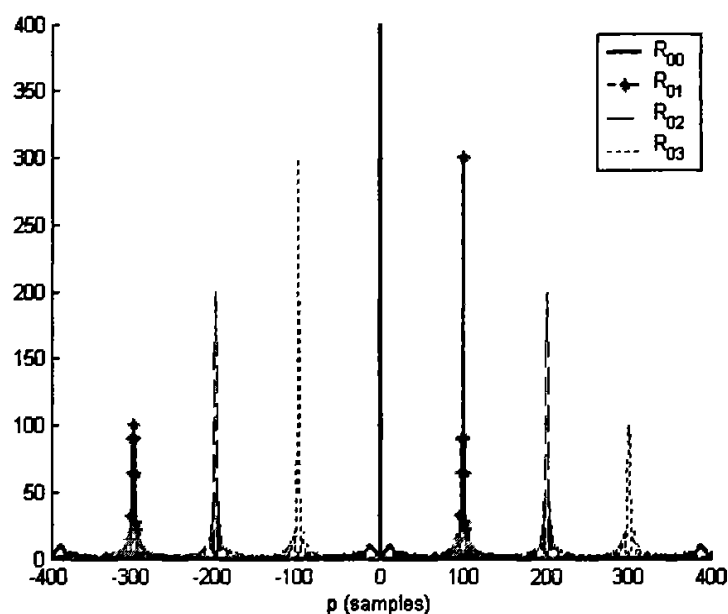


图 4-7 GCL-DFT 序列的自相关和互相关函数

由图中可以看出，互相关函数的峰值在大概 100 ($sm=100$) 的倍数的位置。在时延小于 96 的位置，互相关函数的值小于 20。因此在随机接入中，对应搜索窗口应该设计为 $[-96,0]$ 或 $[0,96]$ 。

基于 GCL 序列设计的 RACH 前缀具有比较好的检测概率，并且在接收信号能量差别比较大的时候，仍能保持良好的性能。这个特性是 WCDMA 系统中 RACH 签名序列所不具有的。

第五章 3G LTE 随机接入流程的研究

在 3GPP LTE RAN2 讨论随进程中, 讨论到了随机接入流程的问题。会议主要讨论到了随机接入(包括初始接入)的步骤, 信令的大小和内容, 采用技术(如是否使用 HARQ)等。本章节主要研究了随机接入流程的两种讨论方案, 并且提出了一种改进的随机接入方案。最后通过仿真的方法比较这三种方案。

5.1. 一步方案和两步方案

随机接入过程可以分成两类: 一类是非同步的随机接入, 另一类是同步的随机接入^[28]。非同步随机接入和同步随机接入的主要区别在于多了建立 Node B 和 UE 上行同步的过程。

在随机接入流程的讨论中, 出现了两种备选方案, 分别是一步方案和两步方案。下面以非同步随机接入为例, 讨论这两种不同方案。同步随机过程与非同步随机过程是类似的。

在一步方案中, UE 向 Node B 同时发送随机接入前导符和随机接入消息。消息部分包含一定的信息, 比如资源请求(包括需要的资源数量)、数据和控制信令等。当 Node B 收到接入前导符后, 反馈给 UE 定时信息(时间提前量)和上行资源。在这里, Node B 同时把定时信息和资源的分配消息发送 UE。在得到资源之后, UE 就可以在共享数据信道上进行数据传输了。

在两步方案中, UE 向 Node B 发送接入前导符。Node B 接收到前导符后, 发送定时信息和用于上报请求的上行资源。这里的上行资源并不能直接作为发送数据使用, 而是用作资源请求。UE 在这个资源上, 通过共享数据信道发送资源请求, 向 Node B 申请所需要的资源数量。当 Node B 分配好资源后, UE 就能使用上行资源来发送数据了。

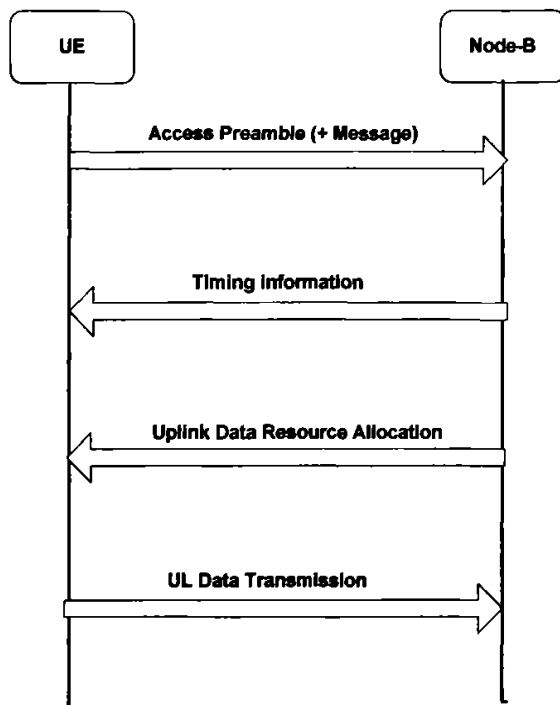


图 5-1 非同步随机接入方案 1（一步方案）

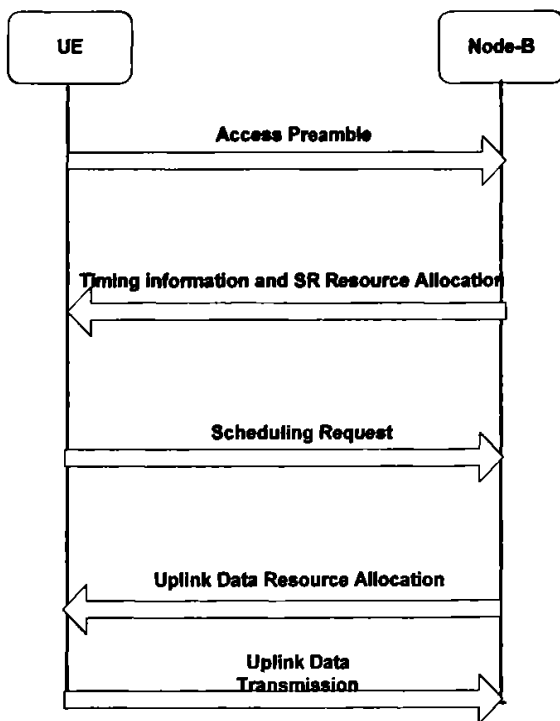


图 5-2 非同步随机接入方案 2（两步方案）

一步方案和两步方案的区别在于,前导符接入和资源请求是一步完成还是分两步完成,前导符和消息部分是否一并传输。一步方案中前缀符和消息部分都在竞争信道上进行接入。两步方案中,前缀符在竞争信道上进行接入,而消息部分将随后在非竞争信道进行传输。接入步骤的不同将影响接入的性能,尤其是在接入时延方面的性能。

随机接入使用的前导符是相互正交的,但是消息部分的内容是不正交的。当消息部分重叠在一起,Node B 将无法识别消息部分的内容。也就是说,在一步方案中,在多个 UE 同时接入,Node B 将无法识别消息部分的内容。

LTE 建议使用 CAZAC/GCL 码作为随机接入的前导符。GCL 码具备优良的自相关和互相关特性。在一定的相关窗内,不同的码字之间互相关很小,可以认为是正交的。GCL 码正交特性和检测性能,可以参考文献[]。前导符携带消息长度对检测性能的影响,可以参考文献[]。

为了评估消息部分的对随机接入性能的影响,首先介绍随机接入竞争过程的一般步骤。

一步方案的随机接入的竞争过程步骤如下:

- (1) UE 随机选择一个时间频率资源。
- (2) UE 随机选择一个前导符序列。
- (3) UE 发送前导符。
- (4) 如果同时多个 UE 使用相同的时间频率资源,则发生碰撞。
- (5) 发生碰撞的 UE,延迟一段随机的时间后,进行重传,即重复过程(1),
- (6) 如果没有发生碰撞,则接入成功。
- (7) 如果 UE 重传次数达到规定上限或者重传时延超过了限制,则接入失败,随机接入过程结束。

两步方案的随机接入的竞争过程步骤如下:

- (1) UE 随机选择一个时间频率资源。
- (2) UE 随机选择一个前导符序列。
- (3) UE 发送前导符。
- (4) 如果同时多个 UE 使用相同的时间频率资源和相同的前导符,则发生碰撞。
- (5) 发生碰撞的 UE,延迟一段随机的时间后,进行重传,即重复过程(1),
- (6) 如果没有发生碰撞,则接入成功。
- (7) 如果 UE 重传次数达到规定上限或者重传时延超过了限制,则接入失败,随机接入过程结束。

一步方案中,消息部分和前缀符一并传输,没有无谓的时延;但是成功概率

低，增加因重传造成的时延。两步方案中，前缀符接入成功后才传输消息部分，需要额外的时延；但接入成功率高，减少了因重传造成的时延。比较两种方案的优劣，关键在于比较分两步造成的时延和因重传造成的时延，具体可通过仿真的方法来进行评估。

5.2. 一种改进的接入方案

在这里，我们提出了一种改进的接入方案（可称为一步到两步方案，1 to 2 step scheme）。在改进的接入方案中，首先执行一步方案相同的步骤，也就是同时发送前缀符和信息部分，而随后的步骤取决于它们检测的情况。前缀符和信息部分被正确检测出来，那么 Node B 将利用该信息并且通知 UE 时间提前量。如果前缀符被检测出来，但是消息部分发生了碰撞，那么将采用类似两步方案的步骤，也就是 Node 通知给 UE 时间提前量和用于资源请求的上行资源。UE 将随后重传资源请求（消息部分）在分配好的非竞争信道上。一个标志位和分配给 UE 的资源量可以同时用来决定消息部分是否被正确检测出来，如图所示：

Timing information	Control message indication	Resource allocation for UL data or SR
-----------------------	-------------------------------	--

图 5-3 反馈信令格式

改进的接入方案的步骤如下图所示。由图中可以看到，根据发生碰撞的情况，有不同的处理步骤。这种方案更加灵活，结合了一步方案和两步方案的特点，能够自适应地根据网络状况选择接入的步骤。而开销仅仅是增加了一个控制指示符。仿真结果显示，该方案的性能优于前两种方案，具体内容参照下一节内容。此方案已经申请为欧盟专利^[29]。

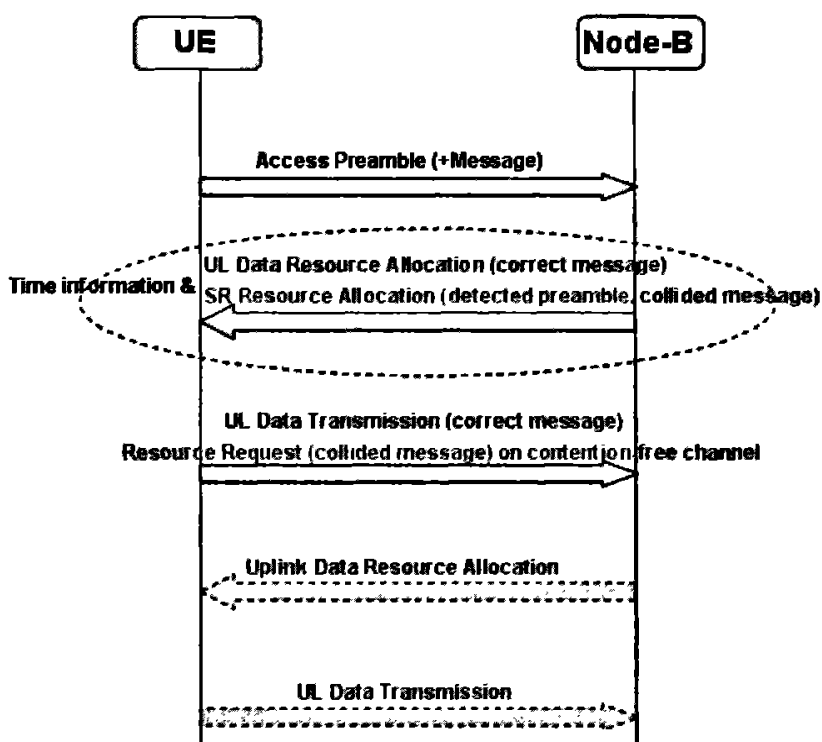


图 5-4 改进随机接入的流程图

5.3. 仿真结果与评估

为了比较一步方案、两步方案和改进方案的性能，可通过仿真的方法来进行评估，主要的参数如下表所示：

表 5-1 随机接入流程的仿真参数

参数	值
前缀符数目	4 或 16
频率资源数量	16 或 4
随机接入信道间隔	2.5ms/10ms
确认延迟	2ms
消息延迟	2.5ms
无线帧长度	10ms
退避算法	二进制指数退避，初始窗口=2 或 8
最大重传次数	9
仿真长度	10,000 ms

新包负载	0.1 ~1 req/ms
------	---------------

(1) 每 10ms 一次随机接入的机会

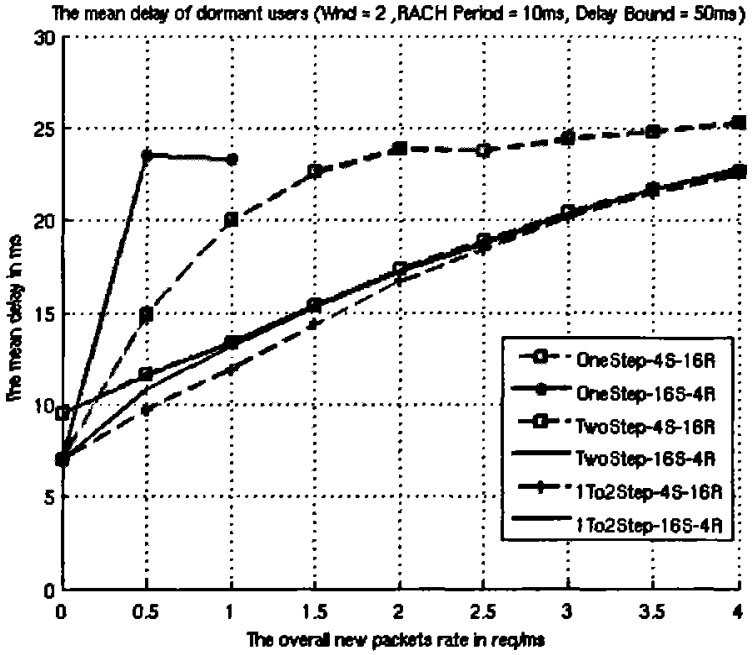


图 5-4 三种随机接入方案的 Idle 用户时延性能比较

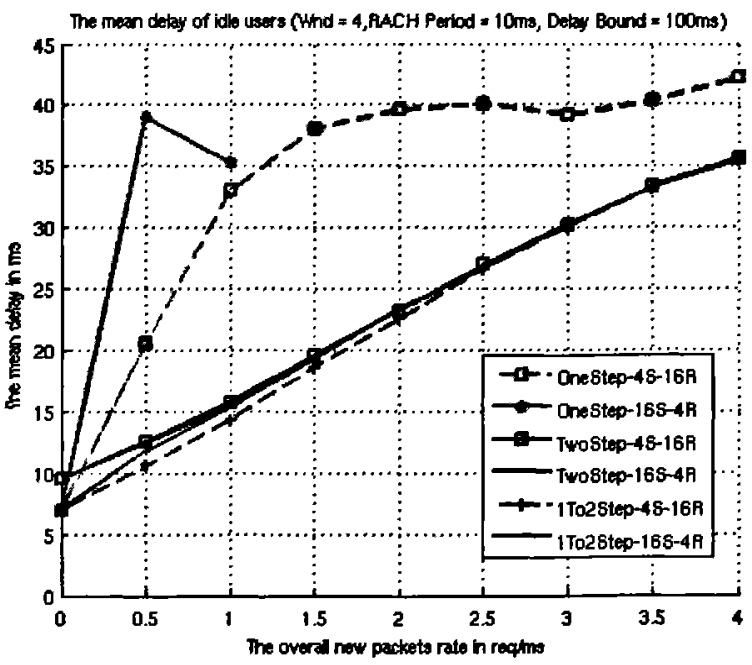


图 5-5 三种随机接入方案的 Dormant 用户时延性能比较

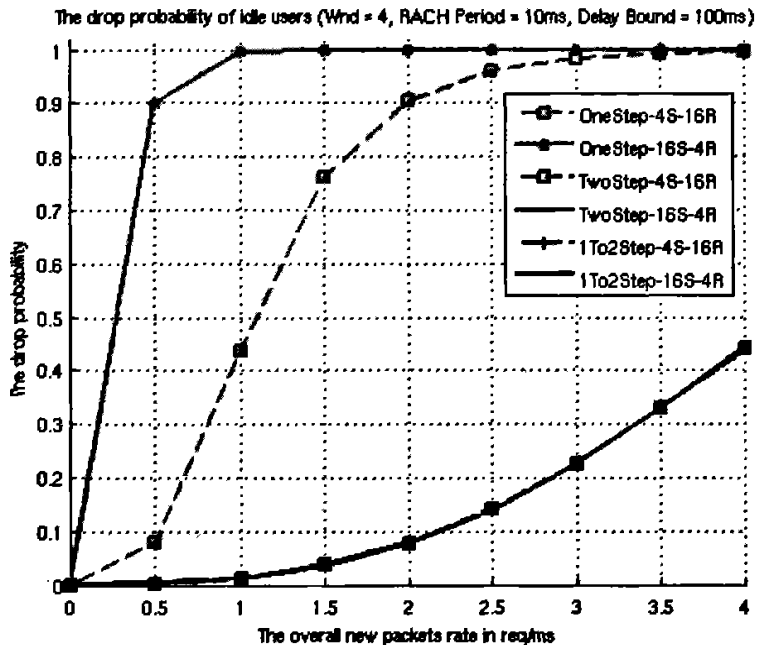


图 5-6 三种随机接入方案的 Idle 用户接入失败概率的比较

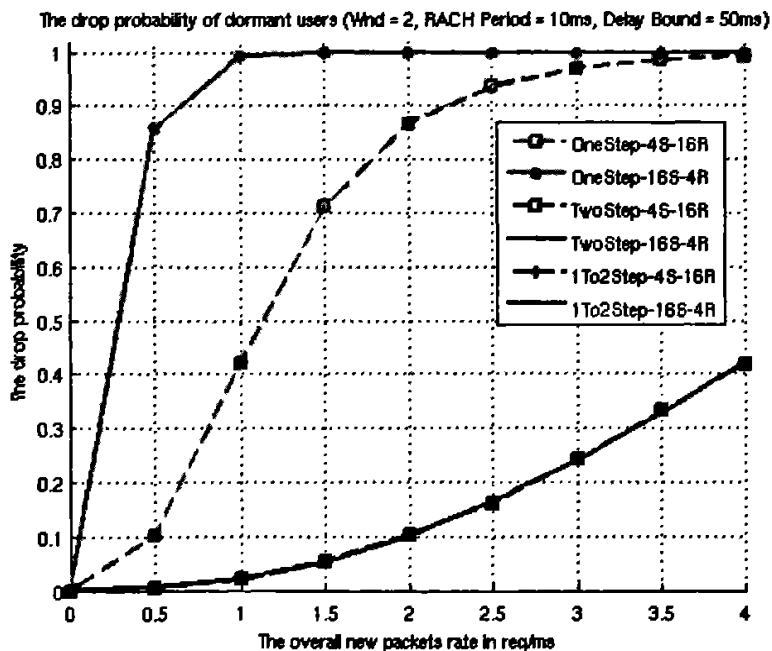


图 5-7 三种随机接入方案的 Dormant 用户接入失败概率的比较

(2) 每 2.5ms 一次随机接入的机会

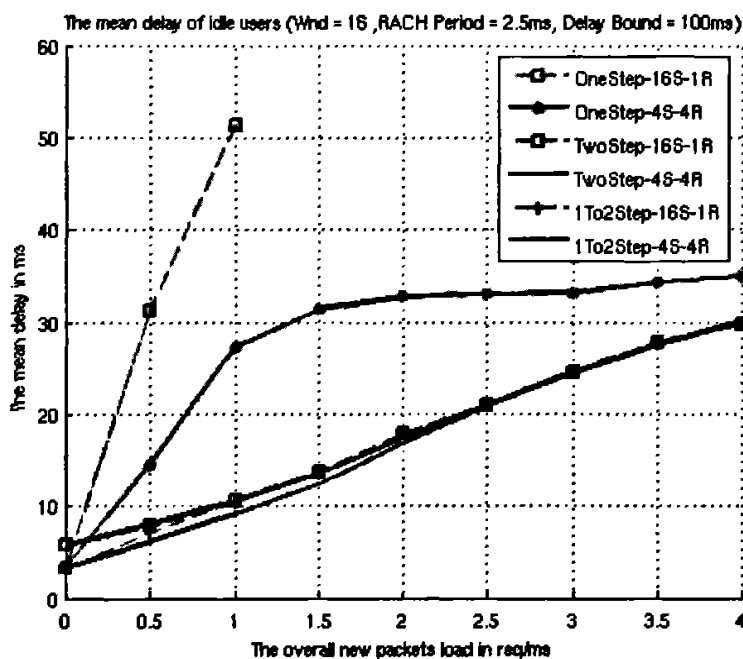


图 5-8 三种随机接入方案的 Idle 用户时延性能比较

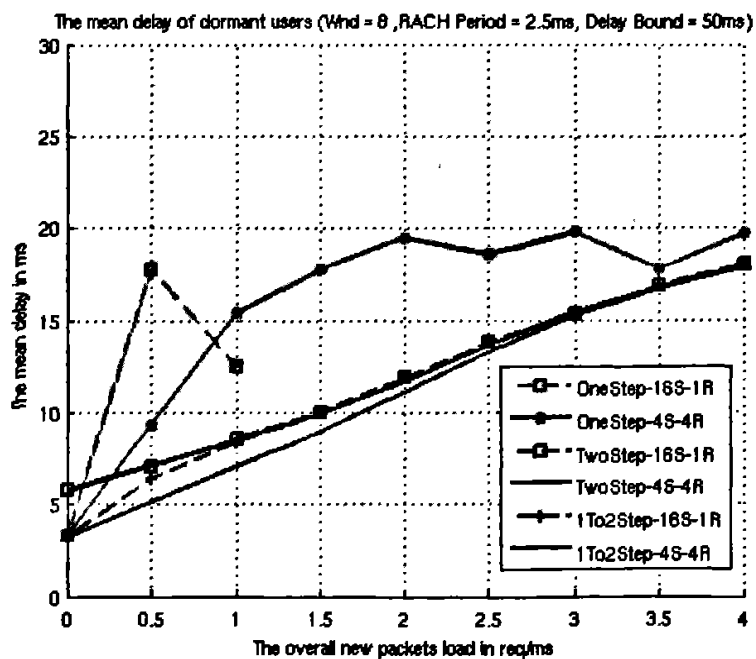


图 5-9 三种随机接入方案的 Dormant 用户时延性能比较

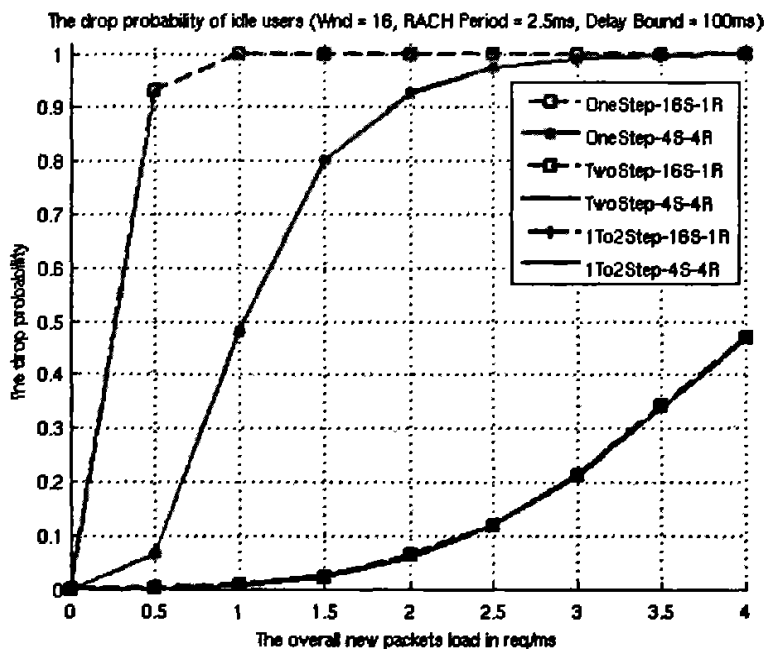


图 5-10 三种随机接入方案的 Idle 用户接入失败概率的比较

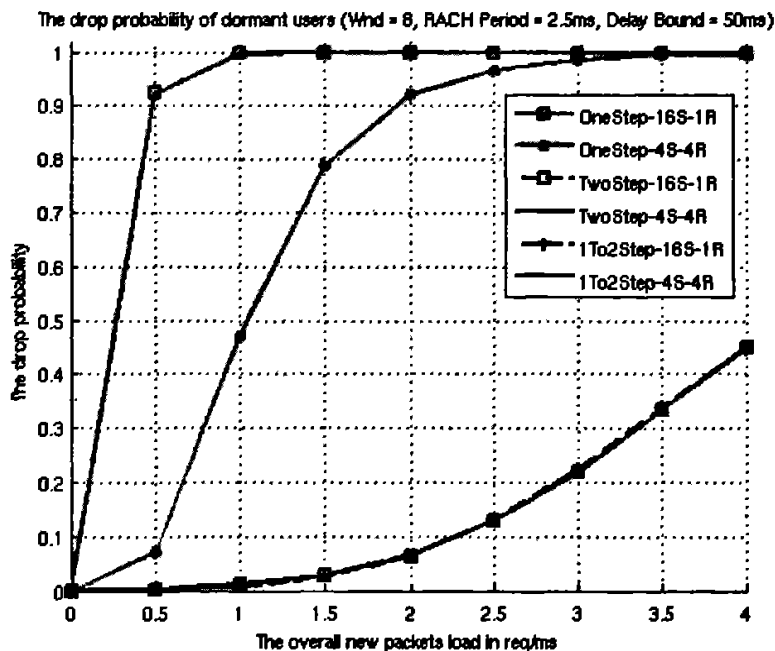


图 5-11 三种随机接入方案的 Dormant 用户接入失败概率的比较

由以上仿真图，我们可以得出以下结论：

- (1) 从平均时延来看，当负载比较小时，一步方案的性能要优于两步方案，而改进方案的性能很接近一步方案；当负载比较大时，两步方案的性能明显优于一步方案，而改进方案的性能优于两步方案，当负载非常大时，两者趋于相同。
- (2) 从接入失败率来看。两步方案和改进方案基本相同，而一步方案失败率比它们都高。在负载比较大的区域，一步方案甚至失败率达到了 100%。这是因为从碰撞的角度上而言，两步方案和改进方案的信道数由频率资源数和前缀符数共同确定，而一步方案仅仅由频率资源数决定。

简而言之，改进方案的性能优于一步方案和两步方案。而一步方案和两步方案的性能优劣与网络负载有关。

第六章 随机接入信道资源分配方案的研究与仿真

在 LTE 系统中，按照 RRC 连接状况可以将协议状态分为 RRC-IDLE 和 RRC-CONNETED，RRC-IDLE 对应非接入层(NAS)协议状态中的 LTE-IDLE 状态，RRC-CONNETED 对应于非接入层(NAS)协议状态中的 LTE-ACTIVE 状态。LTE-ACTIVE 状态按照用户的活性又可以分为 Dormant 子状态和 Active 子状态。Dormant 子状态和 LTE-IDLE 状态的用户都可以通过随机接入的方法，转移到 Active 状态。他们都需要使用随机接入信道，这样就需要研究如何合理分配信道给这两类用户的问题。

另外一方面，LTE 对 Dormant 和 IDLE 用户的接入有着不同的 QoS 要求。为了达到这个目的，可以通过使用不同的接入流程，分配不同的资源数量和使用不同的参数配置等方法来实现不同的 QoS 要求。在本章中，主要研究了后两种方法，并得出了一些有益的结论。

6.1. RACH资源在Dormant用户和Idle用户之间的分配

由 LTE 中对时延要求可知道，Dormant 用户和 Idle 用户对时延有着不同的要求，分别为 50ms 和 100ms。为了保证两种不同接入时延的要求，我们将研究两种不同的 RACH 资源（即信道资源）分配的方案：

- ◆ Dormant 用户和 Idle 用户共享 RACH 资源，但是采用不同的退避参数。
- ◆ Dormant 用户和 Idle 用户分别使用不同的 RACH 资源。（分配更多的资源给 Dormant 用户）

我们下面将通过仿真评估这两种方案的优劣，并得到它们具有相同性能的分界处。

表 6-1 RACH 资源分配方案评估的仿真参数

情景 1			
		Idle 用户	Dormant 用户
到达分布		符合泊松分布，新用户到达率为 0.1 请求/秒/用户。	
buffer 状态		无 buffer	无 buffer
退避算 法和参数	方案 1	二进制指数退避 (BEB) 算法, 初始窗口 w=32	BEB 算法, w=16

	方案 2	BEB 算法, 初始窗口 w=16	
RACH 个数	方案 1	共享 3 个 RACH	共享 3 个 RACH
	方案 2	1	2
子帧长度		0.5ms	
最大时延限制		200 子帧	100 子帧

6.1.1. 两种方案时延性能的比较

由图 6-1 所示, 方案 1 中, Dormant 用户和 Idle 用户共享 3 个信道, Idle 用户退避窗口为 32, Dormant 用户退避窗口为 16。

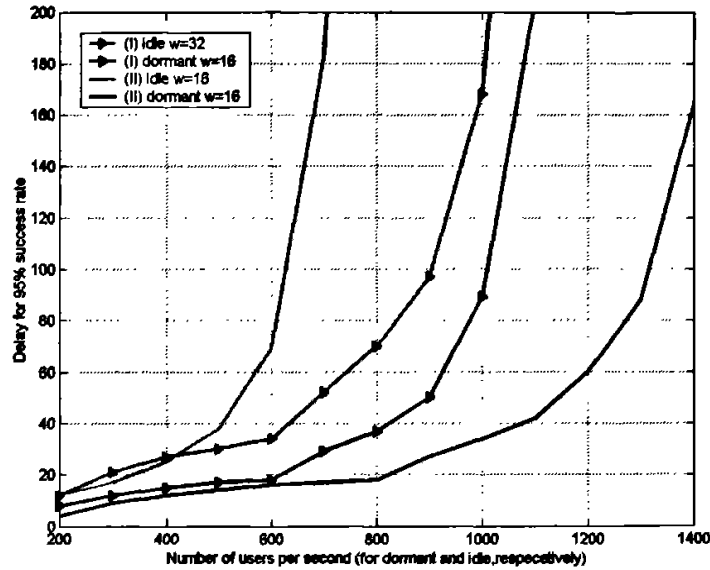


图 6-1 方案 1 和方案的时延性能比较

从图中可以看到, 横轴代表了每秒发送接入请求的用户数。由于到达率为 0.1 请求/秒/用户, 小区内的实际用户数平均是发送请求用户数的 10 倍。为了实现时延的要求 (<100 子帧对于 Dormant 用户, <200 子帧对于 Idle 用户)。方案 1 可以支持平均每秒超过 1000 个 Dormant 用户和 1000 个 Idle 用户。对于方案 2, 支持的 Idle 用户数为每秒 690 个, 而支持的 Dormant 用户数为每秒 1300 个。

在方案 1 中, Idle 用户的时延是 Dormant 用户的时延的将近两倍。这个现象是由于, Idle 用户的退避初始窗口是 Dormant 用户的两倍。因此在负载相同情况下, 发生碰撞时的 Idle 用户的平均退避间隔是 Dormant 用户的两倍。而在方案 2

中，由于分配给 Dormant 用户和 Idle 用户的资源比为 2:1，所以 Idle 用户负载是 Dormant 用户负载的两倍。在这种情况下，时延两倍关系的规律就不再成立了。因为在纯时隙 ALOHA 协议中，时延随负载指数倍增长。在低负载的范围内，时延曲线比较平坦，时延受负载的影响并不明显。当负载比较大时，随着负载的增加，时延曲线会变得陡峭。平均信道负载增加一倍，对应的用户时延增长则远远超过一倍。

通过仿真，我们还得到两种方案的碰撞概率。如图 6-2 所示。方案 1 中两类用户使用共享资源，所以其发生碰撞的概率是一样的。在方案 2 中，Idle 用户的碰撞概率和 Dormant 用户的碰撞概率如图所示。平均负载越大，发生碰撞的概率越大。

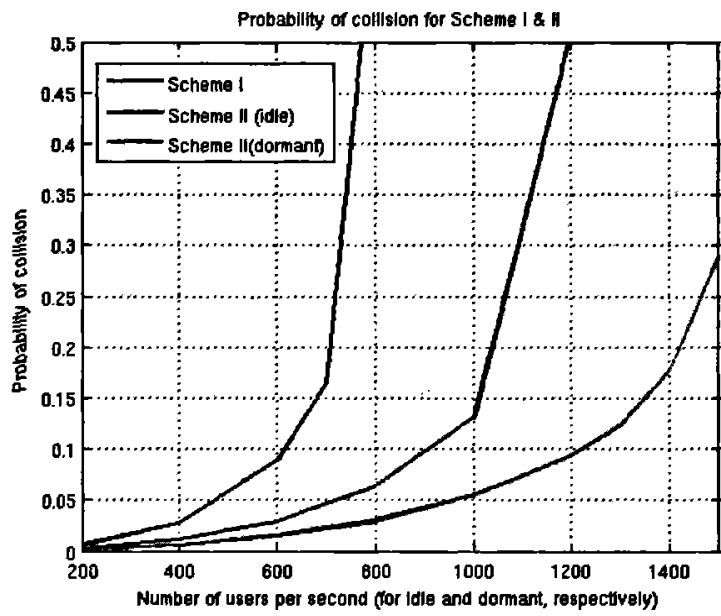


图 6-2 方案 1 和方案 2 的碰撞概率

这个图和图 6-1 所反映的现象是一致的。由此，我们得出第一个结论：可以通过控制退避参数，来控制所得的时延性能。（在满足 QOS 要求方面，方案 1 比方案 2 更好）

6.1.2. 不同用户比例下两种方案的比较

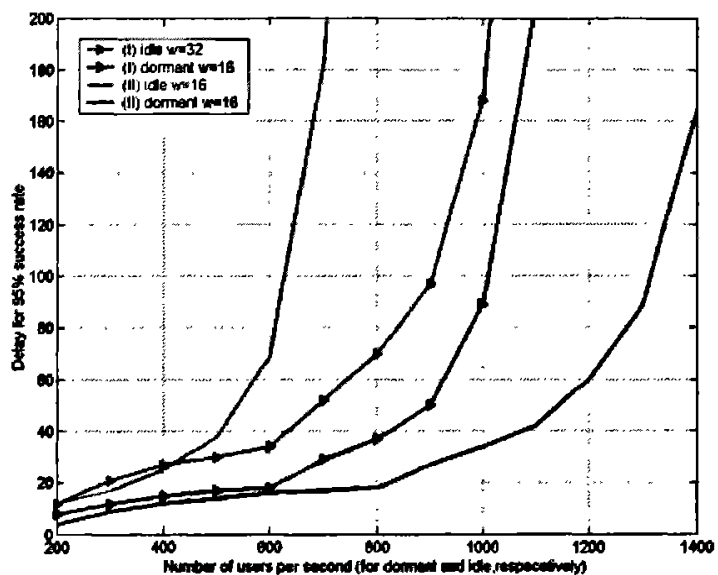


图 6-3 方案 1 和方案 2 的时延性能比较 (Idle 用户数和 Dormant 用户数同时增长)

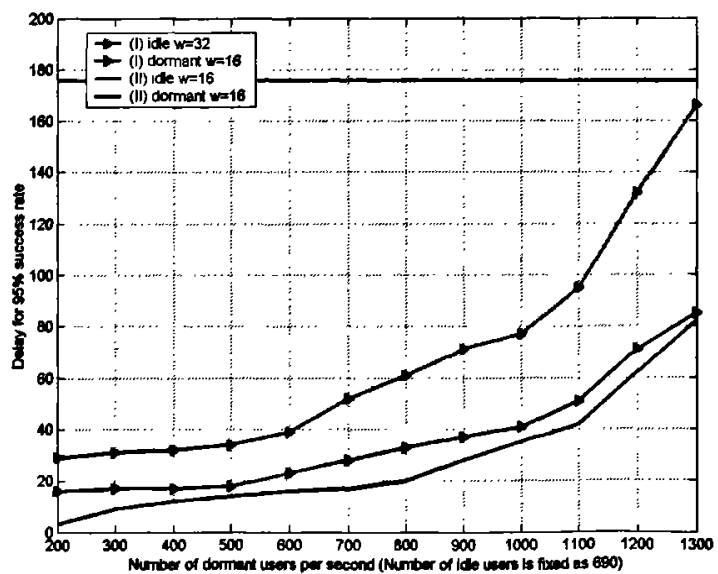


图 6-4 方案 1 和方案 2 的时延性能比较 (Idle 用户数固定, Dormant 用户数增长)

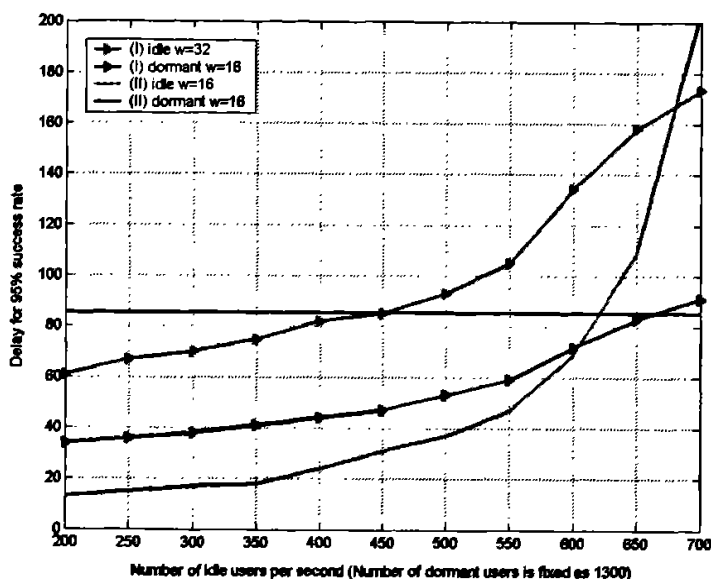


图 6-5 方案 1 和方案 2 的时延性能比较 (Dormant 用户数固定, Idle 用户数增长)

在方案 2 中, 分配给 Dormant 用户和 Idle 用户的资源比为 2:1, 从图 6-3, 6-4, 6-5 三张图中, 我们可以发现一些现象:

- ◆ 当实际的 Dormant 用户数和 Idle 用户数比大于 2:1, 对于 Dormant 用户, 方案要好于方案 2; 对于 Idle 用户, 方案 2 要好于方案 1。
- ◆ 当实际的 Dormant 用户数和 Idle 用户数比小于 2:1, 对于 Idle 用户, 方案 1 要好于方案 2; 对于 Dormant 用户, 方案 2 要好于方案 1。
- ◆ 交界处发生在实际 Dormant 用户数和 Idle 用户数比刚好为 2:1。此时, 方案 1 和方案 2 的时延性能几乎相同。

结论 2: 对于时延性能而言, 没有方案在所有情况下性能比另外一个方案上更优。性能的优劣和 Dormant 用户数和 Idle 用户数的比例有关。

6.1.3. 两种方案适用的用户数范围的比较

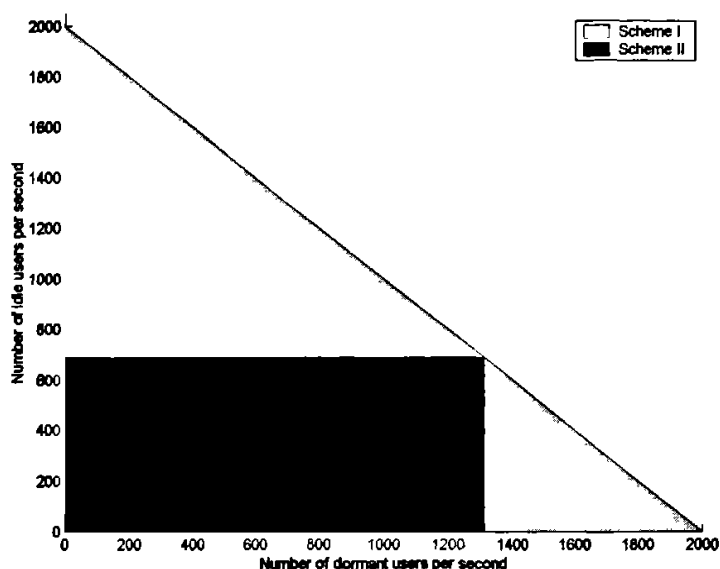


图 6-6 方案 1 和方案 2 可支持的用户数范围

从图 6-6 可知，方案 2 可以同时满足 Idle 和 Dormant 用户时延要求的区域为正方形；方案 1 可以满足时延要求的区域为整个三角形。方案 1 比方案 2 能支持更大的用户数范围，尤其是一类用户明显比另一类用户多的情形下。实际上，对于方案 1 而言，分配给不同用户的资源是随着用户数的比率自动调整的。而对于方案 2，资源分配是固定的，所以其能支持的最大用户数受到了限制。

结论 3：保持用户总数不变，方案 1 比方案 2 能够支持更大的用户范围。方案 1 能够自适应地根据两种类型用户的用户数比率来分配资源。

简而言之，方案 1 要优于方案 2。

第七章 随机接入退避控制算法研究和仿真

7.1. 随机接入退避控制算法综述

在使用 ALOHA 协议的系统中, 用户使用共享信道进行数据传输或者初始接入。因为用户接入信道的随机性, 而且数据传输需要一定的时间, 所以碰撞是不可避免的。冲突发生后, 所有碰撞的数据包都被丢弃, 并在随后一段时间内进行重传。为了避免碰撞再次发生, 需要一种机制来控制重传的时间。随机接入退避控制算法正是这样的机制, 它通过控制重传时间来达到冲突解析的目的。在某些文献中, 它们被归类为冲突解决算法^[30](Collision Resolution Algorithm, 即 CRA)。

然而, 设置退避时间并不是一件简单的事情。在确定数目的重传用户数的情况下, 一个很短的退避时间间隔, 会导致很高的碰撞概率, 使得系统的吞吐率下降。另一方面, 很大的退避时间引入不必要的空闲时间, 增加了平均时延, 降低了系统的性能。除了信道利用率和时延性能之外, 不同用户之间的公平性也是很重要的。在设计算法的时候, 除了考虑系统吞吐率和时延方面的性能, 还要考虑到不同用户之间的公平性。

在退避控制算法中, 目前广泛使用的有二进制指数退避算法 (BEB, Binary Exponential Back-off)、均匀退避算法 (UB, Uniform Back-off)、几何退避算法 (GB, Geometric Back-off)、基于公平性考虑的乘性增加线性减小 (MILD, Multiplicative Increase and Linear Decrease) 算法等。下面将简单介绍这些算法。

7.1.1. UB 算法

当接入包传输失败时, 需要在一段随机退避时延后进行重传。在 UB 算法中, 退避时延符合均匀分布, 分布区间为 $[1, w]$, 其中 w 为窗口的大小 (时间单位为时隙)。在这里, w 的值是固定的, 和重传次数无关。UB 算法的主要特点是实现起来比较简单。

然而, 在 UB 算法中, 退避时延的选择范围是固定的, 最大的退避时间也是 w 。因此, 在网络负载比较大的时候, 窗口较小会导致碰撞概率增加。该算法无法实时根据网络负载状况调整退避时延的大小。

7.1.2. BEB 算法

BEB 算法^[31]可以解决这个问题。在 BEB 算法中, 退避时延的大小和重传次数有关。该算法中, 退避时延的大小符合均匀分布, 而分布范围的上限符合二进制指数分布。也就是说, 每次发生碰撞, 退避时延的范围都会增加一倍。假设 w

为初始窗口的大小，BEB 算法的退避时延 W_i 均匀分布于 $[1, 2^{i-1}w]$ 。

该算法的缺点是存在公平性比较差的问题。当负载很高时，参与竞争的站点将不能公平地共享网络资源，部分站点可能一直无法竞争到信道资源而被“饿死”。举个简单的例子^[30]，比如两个结点相互竞争一个信道，而且两个结点都有足够多的数据量要传输。当一个结点成功地传输，它将减少它的退避时延到最小值。然而另外一个结点没有成功，于是它需要用退避一个比较长的时延后再和第一个结点进行竞争。就很可能出现一种情况，就是第一个结点总是能成功接入到信道，然而第二个结点总是用双倍的退避时延区接入。最后，第一个结点独占了信道，然而第二个结点接入信道的机会很小。

7.1.3. GB 算法

GB 算法与上述算法的不同之处在于，它是通过概率而不是退避时间来控制接入的。具体的说，就是每个站点在接入前，产生一个 $[0,1]$ 均匀分布的随机数，如果随机数小于 q (q 为小于 1 的正整数)，那么进行接入，否则继续等待。也就是说，站点每次接入的概率为 q 。因此，退避时延是符合参数 q 的几何分布的。除此之外，该算法可以改进为：初次接入的概率为 1，而重传接入的概率为 q 。表 7-1 比较了这三种不同算法的均值、方差等统计情况。

表 7-1 不同退避控制算法的统计值

	UB	BEB	GB
$P\{W_i = k\}$	$\frac{1}{w}$	$\frac{1}{2^{i-1}w}$	$q(1-q)^{k-1}$
$E[W_i]$	$\frac{1+w}{2}$	$\frac{1+2^{i-1}w}{2}$	$\frac{1}{q}$
$E[W_i^2]$	$\frac{2w^2+3w+1}{6}$	$\frac{4^i w^2 + 3 \cdot 2^i w + 2}{12}$	$\frac{2-q}{q^2}$
$Var(W_i)$	$\frac{w^2-1}{12}$	$\frac{4^{i-1}w^2-1}{12}$	$\frac{1-q}{q^2}$

7.1.4. MILD 算法

BEB 算法存在公平性问题，为了解决这个问题，有人提出了乘性增长线性减少的算法 MILD。在 MILD 算法中，退避窗口调节机制并不像 BEB 那样按照指数规律剧烈变化，而是采用如下的退避窗口调节机制：

$$\begin{cases} x \leftarrow \min(2x, W_{\max}), & \text{碰撞时} \\ x \leftarrow x_{\text{packet}}, & \text{监听到成功时} \\ x \leftarrow \max(x-1, W_{\min}), & \text{成功传输时} \end{cases} \quad \text{式 (7-1)}$$

MILD 算法退避时延的大小符合范围为 $[1, x]$ 的均匀分布，上式中的 x 为当前

的退避时延的上限。该算法是由 Bharghavan 等人通过试验的方法发现的。该算法的公平性要比 BEB 的好。后来提出了其理论分析模型，并根据公平性约束、有效性约束、分布性约束给出了 MILD 的理论分析。值得注意的是，该算法采用了拷贝的机制。如果结点监听到别的结点成功接入，那么就会拷贝该结点的退避时延 x_{packet} 。通过这种拷贝的机制，算法的公平性得到大大的提高。

除了上述几种算法，还有人提出了自适应的算法，用一个因子 q ，然后根据反馈的三种情况来调整退避间隔的大小。通过仿真的方法来得到最优的 q 值。具体的方法如下：

$$\begin{cases} x \leftarrow x/q, & \text{信道空闲时} \\ x \leftarrow x \cdot q, & \text{碰撞时} \\ x \leftarrow x, & \text{成功传输时} \end{cases} \quad \text{式 (7-2)}$$

7.2. 最优接入控制算法

最优接入控制算法在理想条件下才能实现。它要求在信道发生碰撞时，系统能够精确知道碰撞的用户个数（实际上不可能达到）。系统根据碰撞用户个数，来控制用户重传的概率，从而达到减少冲突概率的目的。最优接入控制算法只能在有节点的网路中（比如蜂窝系统的基站）使用，不适用于类似 Ad-hoc 这样的无中心网路。最优接入控制算法虽然无法实际应用，但是它具备理论参考价值。它是以退避窗口、概率控制重传时间为特点的一类冲突解决算法中性能最优的。它具有最大的吞吐率和最小的平均时延，是其它算法性能的理论上限。

7.2.1. 系统模型

假设在时隙 ALOHA 系统中，多个用户同时竞争接入到基站。在这个系统里，每个用户都在时隙的开头开始传输，而且时隙的长度是固定的。系统只有一个接入信道，并且系统能准确地估计传输的用户的个数 n （称为完备知识，complete knowledge）^[32]。

为了便于分析，作如下假设：

- (1) 每个用户只有一个包传输
- (2) 系统不区分新包用户和其他正在传的用户。
- (3) 每个尝试用户以相同的概率 p ，接入系统。

(4) 假定可能接入系统的用户数为无穷大（infinite users），新包到达符合均值为 λ 的泊松分布。

(5) 当前时刻有可能发包的用户称为尝试用户，假定系统精确地知道尝试用

户数 N_i 。

7.2.2. 算法描述

在有基站控制的单信道系统中，用户按照 S-ALOHA 协议进行随机接入。在每个时隙，准备接入的用户以一定的概率进行接入或者等待。我们称要接入基站的用户为尝试用户，在当前时隙实际发起接入的用户为接入用户，没有发起接入的为等待用户。假设该时隙有 n 个用户尝试传输，每个用户都以随用户数变化的概率进行接入，这种算法我们称之为最优接入控制算法。该算法能使得系统有最小的平均时延和最大的系统吞吐率。

设每个尝试用户以相同的概率 p_r 接入系统，以概率 $1 - p_r$ 等待下一个时刻再以概率 p_r 进行尝试。其中 $p_r = 1/N_i$ ， N_i 为尝试用户数， t 为当前接入的时隙。

如果该时刻只有一个用户传输，那么该用户传输成功，并退出系统；如果同时有超过 1 个用户再传输，那么发生碰撞。发生碰撞的用户，不用进行退避，而是再下一个时刻继续以 p_r 进行尝试。

我们称在某时隙结束后，没有成功接入的用户为等待用户，包括了没允许接入的用户和接入碰撞的用户。允许接入的用户（在概率 p_r 内）称为接入用户；最后成功接入的用户成为成功用户。某时刻 t 的等待用户包括该时刻未达接入概率的用户和和接入失败的需要重传的接入用户。设等待用户数为 M_t 。某时刻 t 的尝试用户 N_t 包括上一时刻等待用户 M_{t-1} 和新到达的用户 A_t 。

简单的说，用户每次接入都是以 $p_r = 1/N_t$ 的概率进行接入， N_t 代表了当前网络负载的状况。负载越大，接入概率越小；负载越小，接入概率越大。以下的小节分析该算法的数学模型，并得出它吞吐率和时延等方面的性能。

7.2.3. 最优接入算法性能分析

(1) 吞吐率

在新包到达率 $\lambda < e^{-1}$ 时，系统的吞吐率等于新包到达率， $S = \lambda$ ；当 $\lambda \geq e^{-1}$ 时候，系统吞吐率为常数 e^{-1} 。

$$S = \begin{cases} \lambda & (\lambda < e^{-1}) \\ e^{-1} & (\lambda \geq e^{-1}) \end{cases} \quad \text{式 (7-3)}$$

在新包到达率 $\lambda < e^{-1}$ 时，用户传输的成功率为 1；在 $\lambda \geq e^{-1}$ ，用户传输成功率为 e^{-1}/λ ，这是一个比 1 小的值。在 $\lambda \geq e^{-1}$ 时，系统吞吐率已达最大值 e^{-1} ，

这个是系统的信道容量。由于到达率已经超过信道容量，所以只有一部分用户能成功接入。

(2) 稳定性

当新包到达率 $\lambda < e^{-1}$ 的条件下，系统达到稳定状态，平均时延为有限值^[33]；

当 $\lambda \geq e^{-1}$ 时，新包到达率超过信道容量，平均时延为无限大，系统处于不稳定状态。

(3) 尝试用户数马尔可夫模型

设尝试用户数为 N_i ，那么以尝试用户数 N_i 为状态建立马尔可夫链模型，并且有以下的转移概率：

$$p_{ij} = p(N_{i+1} = j | N_i = i)$$

$$= \begin{cases} 0 & (j \leq i-2) \\ p(A_i = 0)S_i & (j = i-1) \\ p(A_i = j-i)(1-S_i) + p(A_i = j-i+1)S_i & (j \geq i) \end{cases} \quad \text{式 (7-4)}$$

其中 $p(A_i = a)$ 为新到达 a 个包的概率，是符合泊松分布，有：

$$p(A_i = a) = \frac{\lambda^a e^{-\lambda}}{a!} \quad \text{式 (7-5)}$$

S_i 为有 i 个尝试用户时，信道成功的概率，为

$$S_i = \left(1 - \frac{1}{i}\right)^{i-1} \quad (i > 0) \quad \text{式 (7-6)}$$

$$S_i = 0 \quad (i = 0) \quad \text{式 (7-7)}$$

设稳定状态下，系统尝试用户数 N_i 有稳态 (steady state) 概率分布

$$\{p_n, n=0,1,2,3,\dots\}$$

则有

$$\sum_{n=0}^{\infty} p_n = 1 \quad \text{式 (7-8)}$$

尝试用户数 N_i 的期望值为

$$E(N_i) = \bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} np_n \quad \text{式 (7-9)}$$

根据^[32]，系统的吞吐率为

$$\bar{S} = \sum_{n=0}^{\infty} S_n p_n = \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} p_n \quad \text{式 (7-10)}$$

(4) 等待用户数马尔可夫模型

设等待用户数为 W_i ，那么以等待用户数 W_i 为状态建立马尔可夫链模型，并且有以下的转移概率：

$$q_{ij} = p(W_{i+1} = j | W_i = i)$$

$$= \begin{cases} 0 & (j \leq i-2) \\ p(A_i = 0)S_i & (j = i-1) \\ p(A_i = j-i)(1-S_j) + p(A_i = j-i+1)S_{j+1} & (j \geq i) \end{cases} \quad \text{式 (7-11)}$$

其中 $p(A_i = a)$ 为新到达 a 个包的概率，是符合泊松分布，有：

$$p(A_i = a) = \frac{\lambda^a e^{-\lambda}}{a!} \quad \text{式 (7-12)}$$

S_i 为有 i 个尝试用户时，信道成功的概率，为

$$S_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{i}\right)^{i-1} & (i > 0) \\ 0 & (i = 0) \end{cases} \quad \text{式 (7-13)}$$

设稳定状态下，等待用户数 W_i 有稳态 (steady state) 概率分布 $\{q_w, w=0,1,2,3,\dots\}$ ，则有

$$\sum_{w=0}^{+\infty} q_w = 1 \quad \text{式 (7-14)}$$

尝试用户数 N_i 的期望值为

$$E(q_w) = \bar{w} = \sum_{w=0}^{+\infty} wq_w \quad \text{式 (7-15)}$$

平均尝试用户数 \bar{n} 和平均等待用户数 \bar{m} ，有以下关系

$$S = \bar{n} - \bar{w} \quad \text{式 (7-16)}$$

(4) 平均时延

根据 Little 公式^[33]，平均时延和平均尝试用户数关系为：

$$\bar{d} = \frac{\bar{n}}{S} \quad \text{式 (7-17)}$$

显然这个式子在稳定状态下成立，不稳定状态时， \bar{n} 趋向于无穷大，而 S 为常数值 e^{-1} ，所以时延 \bar{d} 也趋向于无穷大。

$$\bar{d} = \begin{cases} \frac{\bar{n}}{\lambda} & (\lambda < e^{-1}) \\ \infty & (\lambda \geq e^{-1}) \end{cases} \quad \text{式 (7-18)}$$

在这里，我们给出平均时延和平均尝试用户数的近似公式：

$$\bar{d} = \frac{1-\lambda}{1-e\lambda} \quad \text{式 (7-19)}$$

$$\bar{n} = \frac{(1-\lambda)\lambda}{1-e\lambda} \quad \text{式 (7-20)}$$

从以下的两张仿真图可见，近似公式和实际的平均时延相差无几，误差很小。由于退避算法的时延性能一般难以用公式精确推导，该近似公式可以作为工程中使用，用作估计平均时延的值。

值得注意的是，平均时延和 $1-e\lambda$ 成反比关系，在 λ 比较小的时候，平均时延增长缓慢，当 λ 超过 0.3 接近 e 的时候，平均时延急剧增大。

由此可见如果限制新包到达率，拒绝部分新包，可以保证系统的平均时延值非常小。比如在 $\lambda=0.3$ 的时候，平均时延只有不到 5 个时隙。

因此，可以采用限制新包到达或者说限制尝试用户数的方法，来保证小的平均时延。这种方法在对稳定性和时延要求比较高的系统中尤为有用。

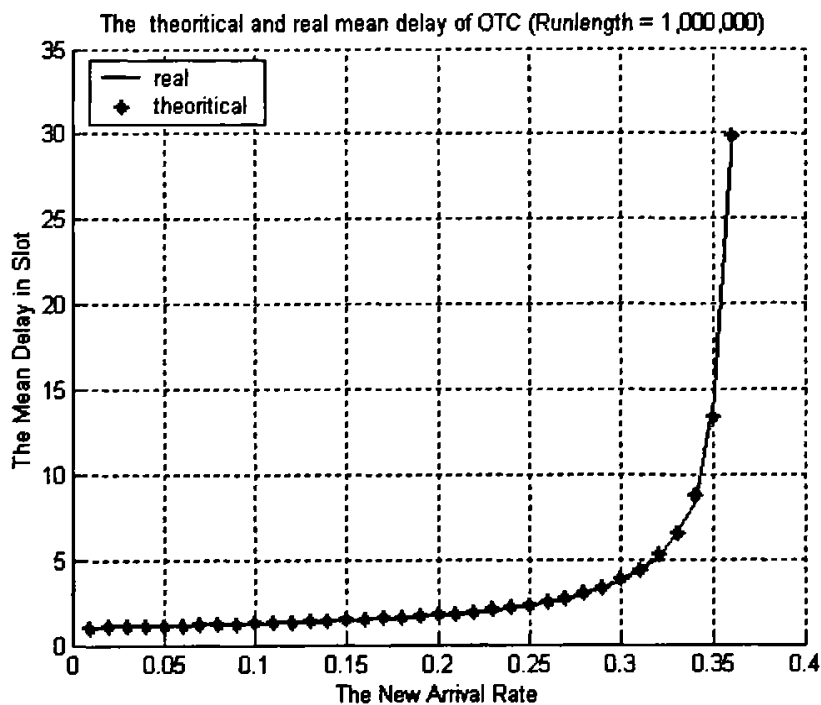


图 7-1 最优接入算法的时延的近似公式值和实际值的比较

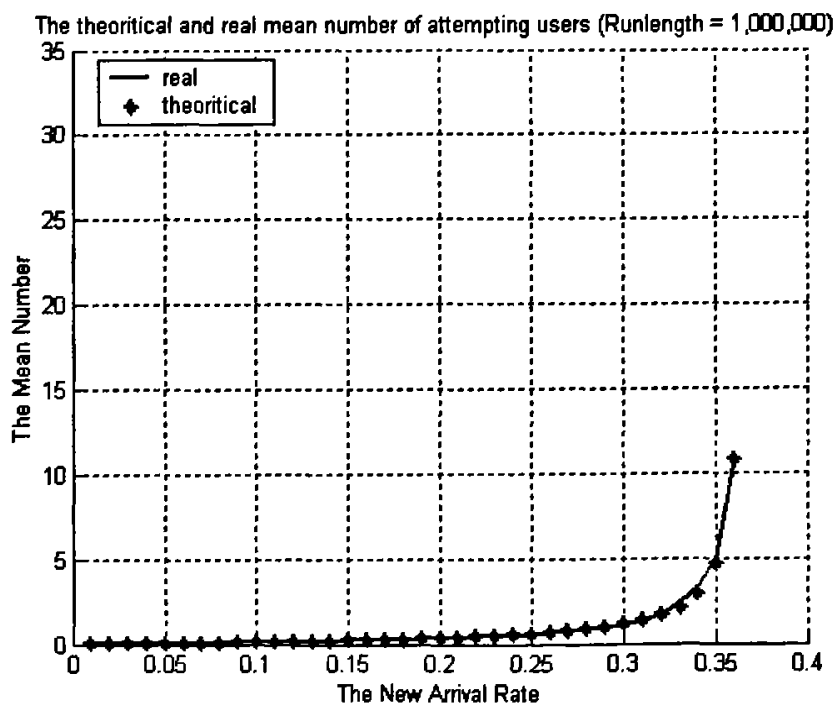


图 7-2 最优接入算法的平均尝试用户数的近似公式值和实际值的比较

7.3. NRS算法

在 LTE 讨论过程中, 3GPP 建议上行使用 CAZAC/GCL 码作为随机接入的签名序列。这类序列有着非常好的自相关和互相关特性, 可以比较准确地检测出传播时延和使用的签名。而且, 基站可以通过自相关运算检测出峰值的个数, 从而可以得到碰撞的包的个数。这就比以前的随机接入只有三种反馈 (空闲、成功、碰撞) 提供了额外的信息量。

基于这个原理, 本文提出了一种新型的接入算法 NRS 算法 (New transmission and Retransmission Separate Algorithm)。NRS 算法是一种应用于多信道随机接入系统 (比如 LTE) 的一种退避控制算法。和 GB 算法一样, 它是使用概率来控制重传的时间等。它的最大特点是新包和重传包分别在不同的信道上传输, 并且在重传信道上使用最优控制来减少时延。该算法在时延、吞吐量方面有着非常优良的性能。本文首先介绍了 ALOHA 系统的最优接入算法, 给出了接入算法性能的上界, 然后给出 NRS 算法的具体实现方法, 最后通过仿真研究该算法的性能。

7.3.1. 最优接入控制算法

最优接入算法已经在上一节中详细表述过了。NRS 算法正是利用了最优接入控制算法的基本原理, 并且延伸到多信道环境中使用。

在单信道时隙 ALOHA 的系统中, 多个用户同时竞争接入到基站。每个用户都在时隙的开头开始传输, 而且时隙的长度是固定的。系统只有一个接入信道, 并且系统知道准备传输的用户的个数 n 。每个用户独立地以相同的概率 p 发起接入, 以 $1-p$ 的概率等待下一个接入时隙。如果有超过两个以上的用户在同一时隙接入, 那么将在信道发生碰撞。发生碰撞的用户和等待用户一起在下一个接入时隙继续尝试接入。信道成功率就是只有一个用户接入的概率, 即

$$S = np(1-p)^{n-1} \quad \text{式 (7-21)}$$

当 $p=1/n$ 时, 式 7-21 将取得最大值。

$$S(n) = (1 - \frac{1}{n})^{n-1} \quad \text{式 (7-22)}$$

时间平均意义上的信道成功率即吞吐量。若每时隙用户都以概率 $p=1/n$ 进行尝试, 系统将取得最大的吞吐量。然而, 尝试用户数是事先不知道的, 无法计算出对应的 p 值, 最优接入算法是物理不可实现的, 但是它提供了接入算法性能上限。S 随 n 的增大而减小, 当 n 趋向于无穷大时, S 等于 e^{-1} , 这个值与普通的

S-ALOHA 协议的吞吐率上限相等。

7.3.2. 算法描述

在实际接入系统中，是无法准确知道要接入的用户数，无法直接应用最优接入算法。接入的用户分成两类，第一类是新发起接入的用户，第二类是由于先前发生碰撞而需要重传的用户。每次发生碰撞，基站都可以检测出碰撞的用户个数，从而就可以估计出总的重传用户数。基于这个思想，在 NRS 算法中，我们将可用的随机信道分成两组：一组是新传信道，另一组是重传信道。新传信道是用于接收第一次传输的接入请求，重传信道是用于接收所有由于发生碰撞重传的接入请求（包括在新传信道和重传信道上发生碰撞）。设总共可用的随机信道数总数为 M ，则新传信道数为 M_1 ；重传信道数为 M_2 ，且有 $M_1 + M_2 = M$ 。具体的信道分组情况如图 1 所示：

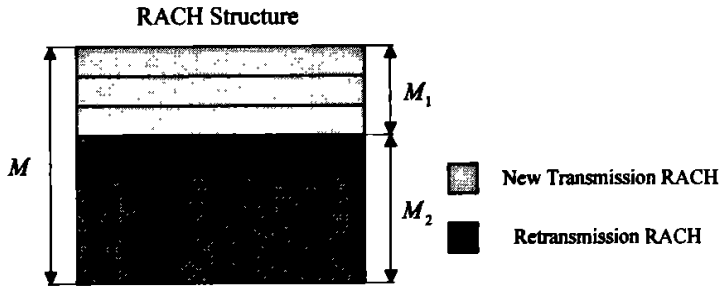


图 7-3 NRS 算法信道结构

NRS 具体的算法步骤描述如下：

- (1) 用户随机选择一个新传信道，并在所选信道上向基站发送一个接入前缀。
- (2) 如果在该时隙只有一个用户发起接入，那么接入成功；如果有两个或以上的用户同时接入，则发生碰撞。发生碰撞的用户将在下一接入时隙，在重传信道上重新发送包。
- (3) 基站通过对接受到信号进行自相关运算来检测峰值的个数，从而估计空闲、成功或者碰撞的包个数 C 。
- (4) 所有发生碰撞（包括在新传信道和重传信道发生的碰撞）的用户，都在重传信道上进行重传。基站估计需要重传的用户的数目为 n ，并通过广播将这个值 n 发送给用户。需要重传的用户以概率 $p = \min(1, M_2 / n)$ 进行尝试，来决定是否进行重传。如果用户要进行重传，那么它随机选择一个重传信道进行接入；否则等待下一接入时隙重复此过程。

(5) 设在接入时刻 t ，在新传信道上发生碰撞的用户数为 A ；在重传信道上，没有达到接入概率而进行等待的用户数为 W ；在重传信道上，达到发送概率进行接入，但是接入时发生碰撞的用户数为 C 。那么在下一接入时刻 $t+1$ ，在重传信道上需要传输的用户数为 $n = A+W+C$ ，这些用户将以概率 $p = \min(1, M_2 / n)$ 进行接入尝试。

(6) 所有接入失败的用户，将一直重复重传过程，直到成功接入为止。

NRS algorithm random access procedure

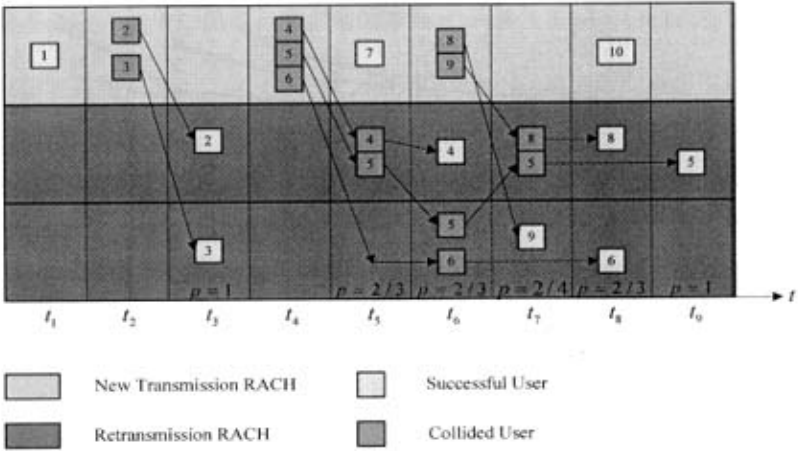


图 7-4 NRS 算法流程

该算法的关键是在于将接入信道进行分组，并在重传信道上使用最优接入算法，从而提高了重传的效率，减少不必要的碰撞和时延，大大提高了系统的性能。图 7-5 是在平均时延上 NRS 算法和 BEB 算法、理想的最优接入算法（OAA）的比较。在这里采用的是总信道数为 4，在 NRS 算法中新传信道数为 1，重传信道数为 3。由图 7-5 可知，可见 NRS 算法比初始窗口长度为 8 或 16 的 BEB 算法在平均时延方面有很大的提高，同时也非常接近理想的多信道最优接入算法。

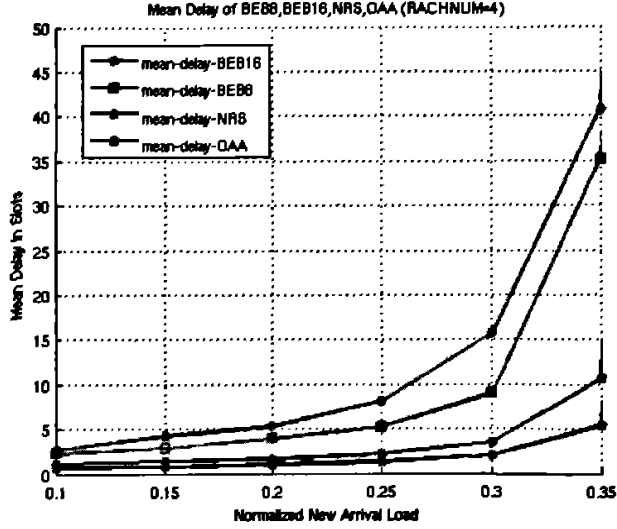


图 7-5 NRS 算法和其他算法的时延性能的比较

7.3.3. 基于伪贝叶斯估计的自适应调整

由于上行随机接入的特性，基站不能很准确地估计检测出碰撞的个数，存在一定误检的情况。随着误检的次数增多，估计出的重传用户数不准确，导致接入概率不准确，影响系统性能。

为了克服这个由于错误检测带来的偏差问题，系统可使用自适应调整的策略来避免这种估计偏差的情况。我们可以通过贝叶斯估计的方法来调整估计出来的重传用户数^{[36][37]}。具体的方法如下：

对当前尝试用户数的估计为 \hat{N} ，实际的尝试用户数为 N ，则

(1) 若有 $\hat{N} \leq M_2$ （接入概率为 1）且没有信道碰撞。即有 $\hat{W}_i = 0$ （所有该时刻用户都成功接入或者没有任何用户接入）。此时，令 $\hat{W}_i = 0$ 。

(2) 若有 $\hat{N} \leq M_2$ ，则接入概率为 1，从反馈可以得到碰撞的信道数和成功的信道数，有

$$\min(N) = C_i \times 2 + S_i \quad \text{式 (7-23)}$$

如果有 $\hat{N} < \min(N)$ ，即对 N 的估计偏小。此时，令

$$\hat{W}_i = \min(N) - S_i \quad \text{式 (7-24)}$$

(3) 当 $\hat{W}_i > M_2$ ，用对用户数估计调整的公式

$$\hat{W}_t = \hat{N}_t + \alpha I_t + \beta S_t + \gamma C_t \quad \text{式 (7-25)}$$

这里有, $\alpha < 0$, $\beta = -1$, $\gamma > 0$

取 $(\alpha, \beta, \gamma) = (-1, -1, (e-2)^{-1})$ 时, 即为伪贝叶斯广播的参数^[6]。

$$\hat{W}_t = \hat{N}_t + C_t \times (e-2)^{-1} - (I_t + S_t) \quad \text{式 (7-26)}$$

因为 NRS 算法中, 重传信道并不传输新包, 所以使用原有的伪贝叶斯广播参数将不适合。这里给出了一个参考的参数 $(\alpha, \beta, \gamma) = (-1, -1, 0.1)$ 。

基站只需要将用户数 $\hat{N}_{t+1} = \hat{A}_{t+1} + \hat{W}_t$, 或者 $p = 1/\hat{N}_{t+1}$ 的概率广播给用户即可。

从仿真图 7-6 可知, 在误检概率分别为 0.1 时, NRS 算法的稳定性下降比较明显。当错误概率为 0.1 时, $\lambda=0.3$ 时系统稳定, 但是 $\lambda=0.32$ 的时候, 由于对用户数的估计不准, 计算所得接入概率不准确, 导致重传用户数的不断增长以至无穷大, 这时候系统变成了不稳定状态。而通过使用参数为 $(-1, -1, 0.1)$ 的伪贝叶斯自适应调整的方法, 系统的稳定性得到了极大的提高, 仍然可以保证在新包到达率 $\lambda < e^{-1}$ 时, 系统是稳定的。将图 7-6 和图 7-5 进行比较, 可知通过使用伪贝叶斯自适应调整后的 NRS 算法和没有误检的 NRS 算法在平均时延的性能几乎一样。

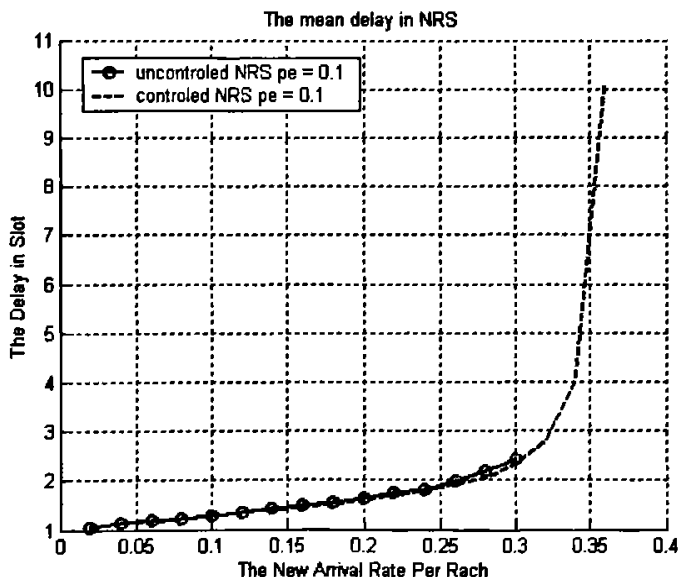


图 7-6 伪贝叶斯估计对 NRS 算法的影响

这种算法的新颖之处在于通过信道分组方式, 区别新传和重传用户, 并充分

利用了碰撞检测信息。同时，该算法使用贝叶斯估计的方法来调整由于检测不准确带来的偏差问题。仿真结果表明，系统的在平均时延、吞吐率方面都比一般 ALOHA 系统有大的提高，所以该算法非常适合对接入时延有非常高要求的接入系统。

由于 NRS 算法是可以估计出当前负载的情况，因此可以通过采用类似于接纳控制的机制，通过限制部分用户的接入，来达到保持系统稳定性和保证用户的时延性能。这一方面的内容有待将来进行进一步的研究。

第八章 论文总结

8.1. 论文总结

随机接入信道是一个基于竞争的上行信道。在不同的无线通信系统中，随机接入的功能也有所不同。例如，可以用作接入网络、进行资源请求、携带控制信令、进行上行同步、调整传输功率等。甚至，它可以用作传输少量的数据。竞争机制是随机接入信道的最基本的特征。多个移动台可以同时尝试接入，并有可能导致碰撞。

在3GPP的会议LTE进程中，随机接入信道也是讨论的热点之一。讨论的关注点主要有随机接入的流程，信令的内容和格式，UE的小区标识号等。直到目前，组织成员已经在很多方面有了初步的成果并达成了相关共识。本人跟踪了3GPP会议随机接入的进展，并对部分问题进行了研究，并取得了一些有益的结论。本文所做的主要工作和取得的主要成果总结如下：

- (1) 本文总结了基于竞争的多址协议，包括：ALOHA协议、树形多址协议、CSMA协议、预约时隙协议等。这些协议有不同的技术特点，并且适用于不同的通信系统。本文还总结了WCDMA系统中的随机接入过程的工作机制和技术特点。
- (2) 本文总结了3G LTE 随机接入的讨论热点。包括了上行定时调整、资源请求、随机接入信道时间频率结构、功率调整、前缀符的设计等内容。
- (3) 本文对3G LTE随机接入流程进行了研究和仿真。主要讨论了一步方案、两步方案和我们提出的一种改进方案。通过仿真结果可知，改进方案比一步方案和两步方案性能更优。该方案已经申请为欧盟专利。
- (4) 本文对随机接入信道资源分配方案进行了研究和仿真。主要针对两种不同的方案进行了讨论：方案一是Dormant用户和Idle用户使用相同的RACH资源，但是使用不同的退避参数；方案二是Dormant用户和Idle用户分别使用不同的RACH资源，在不同的随机接入信道上进行接入。最后得出结论是，方案一要优于方案二。
- (5) 本文提出了一种新型的退避控制算法——NRS算法。NRS算法是应用于多信道环境中一种接入算法，它利用了GCL码等良好的相关特性，通过估计重传用户的个数来改善接入的性能。该算法还利用伪贝斯估计的方法来补偿由于估计不准确而带来的问题。最后通过仿真可知，该算法在吞吐率和时延方面都有很好的性能。

8.2. 课题今后发展方向

目前, 3GPP关于LTE随机接入的讨论已经进行了很久。组织成员已经就很多问题达成了共识, 但仍然有部分内容还需要进一步的深入讨论。

本文只研究了随机接入信道设计的一部分内容。还有很多相关内容由于时间的限制, 没有进行足够深入的研究, 比如传输信令的内容和格式, 随机接入检测概率, UE的在接入过程中标识等。这些方面很多组织都进行了比较深入的研究, 得出了很多有益的结论。相关的结论可以参考各个成员代表在3GPP会议中的技术提案。

本文主要研究了3G LTE随机接入过程。而事实上, 随机接入在很多通信系统中都有着不同的应用。同时, 无线通信技术不断演进, 未来移动通信系统将采用新空中接口。如何灵活地使用现有的技术进行随机接入信道的设计, 将是未来工作的重点。

参考文献

- [1] J.Werner, P.Merz, M.Färber, "SIEMENS 3G PLUS MII base paper", Mar. 2006.
- [2] 3GPP TR25.913, "Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)".
- [3] 3GPP TS 25.912, "Feasibility Study for Evolved UTRA and UTRAN".
- [4] 3GPP TSG-RAN RP-050167, "Work Plan Evolved UTRA and UTRAN".
- [5] 3GPP TSG-RAN RP-040502, "Proposal for the RAN Evolution Process".
- [6] 3GPP TR 25.814, "Physical Layer Aspects for Evolved UTRA".
- [7] 3GPP TR 25.896, "Feasibility Study for Enhanced Uplink for UTRA FDD".
- [8] 3GPP TSG-RAN R2-070645, "RACH access procedure(s) in E-UTRAN".
- [9] 3GPP TSG-RAN R2-052799, "Initial cell access in LTE".
- [10] 3GPP TSG-RAN R1-061369, "LTE random-access capacity and collision probability".
- [11] 赵东风, "时隙式随机争用多址系统分析方法研究", 通信学报, 1999 年, 第 20 卷, 第 8 期。
- [12] 谢希仁, 《计算机网络》, 电子工业出版社, 1999 年。
- [13] 梁钊, ALOHA 随机多址通信技术——从纯 ALOHA 到扩展 ALOHA, 移动通信, 1999 年, 第 23 卷, 第 5 期。
- [14] 郑碧月, 赵广金, 姜辉扩展 ALOHA 随机多址通信技术, 信息技术, 2002 年, 第 4 期, P.10-13。
- [15] 张建勋, 戴居丰, 扩频时隙 ALOHA 技术捕捉能力及性能分析, 中国民航学院学报, 2003 年, 第 3 期。
- [16] 戴剑峰, 无线信道接入技术中冲突解决算法的研究, 中国数据通信, 2005 年, 第 2 期。
- [17] 肖瑶, 周宗仪, 随机接入协议: 研究综述[J], 通信技术, 2003, (1):60-63.
- [18] L.Kleinrock and F.A.Tobagi, "Packet switching in radio channels: Part I——Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics," IEEE Trans.Commun., vol. COM-23, pp.1400-1416, Dec.1975.
- [19] 李建新, CDMA 随机接入理论与技术研究, 西安电子科技大学博士学位论文。
- [20] TS Ho, KC Chen, Performance analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA medium access control protocol, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996.

- [21] 付景兴, 马敏, 陈泽强等, 《WCDMA 技术与系统设计, 第二版》, 机械工业出版社。
- [22] 3GPP TS 25.211, “Physical Channels and Mapping of Transport Channels onto Physical Channels (FDD) ”.
- [23] 3GPP TS 25. 214, “Physical Layer Procedures”.
- [24] 3GPP TSG-RAN R2-052102, “Resource request and UL scheduling for evolved UTRA”.
- [25] 3GPP TSG-RAN R2-070664, “LTE call setup delay and RACH power ramping period ”.
- [26] H.Torii et al., “A New Class of Zero-Correlation Zone Sequences”, IEEE Transaction on Information Theory, Vol. 50, No.3, Mar. 2004, pp. 559-565.
- [27] B. M. Popovic, ”Generalized chirp-like polyphase sequences with optimum correlation properties”, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 38, no. 4, July 1992 ,pp 1406-1409.
- [28] R2-052798, “LTE initial access approach—Samsung”.
- [29] ZhengPing Hu, Mu Chen and Chang Xin, “Network controlled reconfigurable uplink resource request protocol”, EU patent filing, Jul 2006.
- [30] 3GPP TSG-RAN R2-061990, “Random Access Collision Probability and Load”
- [31] Zygmunt J. Haas, Jing Deng, “On Optimizing the Backoff Interval for Random Access Schemes”.
- [32] L.Kleinrock, S.S.Lam, “Packet Swithcing in a Multiaccess Broadcast Channel : Performance Evalution,” IEEE Trans.Commun. , VOL.COM-23, NO.4, Apr. 1975, pp 410-422.
- [33] D.Shen V.O.K.Li,”Performance Analysis for A Stabilized Multi-channel Slotted ALOHA Alogithm”, The 14th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communicaiotn Proceedings.
- [34] Y. C. Jenq, “Optimal retransmission control of slotted ALOHA systems,” IEEE Trans. Commun., vol. COM-29, Jun. 1981, pp. 891-895
- [35] L.Merakos and D. Kazakos, “On retransmission control policies in multiple-access communication networks,” IEEE Automat Contr., pp. 109-117, 1985.
- [36] D.Shen, V.O.K.Li, “Stabilized Multi-channel ALOHA for Wireless OFDM Networks”.
- [37] Rivest, Network control by Bayesian broadcast[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1987.5, 33(3):323~328.

附录

缩写说明

3GPP	3rd Generation Project Partnership
ACK	Acknowledgment packet
AI	Acquisition Indicator
AICH	Acquisition Indication Channel
B3G	Beyond 3rd Generation
BCH	Broadcast Channel
CAZAC	Constant Amplitude Zero Auto Correlation sequence
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA-CD	CSMA - Collision Detection
CSMA-CA	CSMA - Collision Avoidance
CTS	Clear To Send Packet
DFT	Digital Fourier Transform
E-UTRAN	Evolved UTRAN
EDGE	Enhanced Data rate for GSM Evolution
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global Switch for Mobile
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMS	IP Multimedia Sub-system
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCH	Paging Channel
RACH	Random Access Channel
RAN	Radio Access Network
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RTS	Request To Send Packet
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over IP

致谢

光阴似箭，屈指算来，研究生三年时光已如白驹过隙，匆匆而逝。

回首这三年生活，心中无限感慨。三年中奋斗与彷徨，成功与挫折，欢笑和泪水，都让我无比留恋这充满激情与希望的大学生活。研究生的科研和实习经历，使我能充分总结这三年所学，理论联系实际，初窥科学研究的殿堂。

感谢我的导师吴伟陵老师，为我毕业设计提供了良好的实验室环境。信息理论与技术教研中心实验室是一个充满朝气的地方，在这里可以学习到很多新的东西，有很多友善亲和的老师 and 同学，在这群年轻有为的团体中学习工作总让人有激动人心的感觉。在这里，感谢实验室田宝玉老师、林家儒老师、贺志强老师、牛凯老师，他们为了我提供了良好的科研环境和实习机会，并对我们的工作生活关怀备至，提供了很多实际的帮助。

我要特别感谢西门子中国研究院的胡臻平博士，我很庆幸可以和胡臻平博士进行学术科研的探讨。胡臻平博士有着无线通信技术的丰富知识和实践经验，在他的细心指导下，我克服了科研课题中遇到的诸多难题。他也为我提供了很多资料和书籍，这些资料为我写毕业论文提供很大的帮助。同时，感谢西门子中国研究院的常欣博士、王伶博士、张洁博士，你们的细心教导和无私帮助使我获益良多。感谢同一课题组的张翰峰、史宏逵、王维、魏晓萌、李亮、司中威等同学，和你们一起共事共同进步的经历，永远是我值得珍藏的回忆。感谢实验室的师兄王兴华、许文俊等，你们永远是我学习和追赶的榜样。还要感谢廖文奇、李光、王兴华、宁波、梁志平、宋钊、张寅申、樊绍群、刘哲等同学，感谢你们在学习和生活中给我的帮助。

我更要感谢我的父母，他们一直也永远是我奋斗不息的动力。我永远忘不了父母的敦敦教诲和无私关怀，更忘不了父母为我的成长所付出的无比艰辛。一段新的里程又要开始了，我将在新的工作岗位上继续奋斗，我的青春篇章将续写在中国通信事业的最前线。我要在通往成功的道路上披风斩棘，乘风破浪，勇往直前，挥洒最辉煌的人生。

感谢所有给予我帮助的人！

LTE随机接入的研究

作者: [陈沐](#)
学位授予单位: [北京邮电大学](#)
被引用次数: 1次

本文读者也读过(7条)

1. [王晋](#) [LTE上行随机接入技术研究](#)[学位论文]2009
2. [侯金涛](#) [LTE中随机接入技术的研究](#)[学位论文]2007
3. [陈昌](#), [CHEN Chang](#) [LTE随机接入流程研究](#)[期刊论文]-[数字通信](#)2009, 36(4)
4. [胡学斌](#) [LTE上行链路随机接入技术研究](#)[学位论文]2007
5. [谷向阳](#), [李贵勇](#), [Gu Xiangyang](#), [Li Guiyong](#) [TD-LTE随机接入过程的研究与分析](#)[期刊论文]-[光通信研究](#)2010(4)
6. [侯清莲](#), [Hou Qinglian](#) [3G LTE中随机接入过程分析与仿真](#)[期刊论文]-[中国新通信](#)2010, 12(9)
7. [王伟](#) [LTE随机接入中的前导码管理与退避算法](#)[学位论文]2009

引证文献(1条)

1. [胡华增](#), [杜普选](#), [邵小桃](#) [基于MSC8156AMC平台的PRACH基带信号生成](#)[期刊论文]-[现代电子技术](#) 2011(5)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1158790.aspx