

分类号 TN929.5

密级 公开

重庆邮电大学硕士学位论文

论文题目 LTE-Advanced 随机接入研究

英文题目 Research on Random Access Technology

Based on LTE-Advanced

硕士研究生 施 涛

指导教师 王 琼 高工

学科专业 通信与信息系统

论文提交日期 2010.4.23 论文答辩日期 2010.5.30

论文评阅人 _____

答辩委员会主席 _____

2010 年 5 月 30 日



独创性声明

本人声明所呈交的学位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。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得重庆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谢意。

学位论文作者签名：张涛 签字日期：2010年6月6日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解重庆邮电大学有关保留、使用学位论文的规定，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，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆邮电大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：张涛 导师签名：王强
签字日期：2010年6月6日 签字日期： 年 月 日

摘 要

为了适应和满足未来移动通信市场的需求和 ITU-R IMT-Advanced 技术征集的需要, 3GPP 开始了 LTE-Advanced 的研究。LTE-Advanced 定位于更高的系统容量和更小的接入时延。而接入的步骤和用户的碰撞问题是造成时延增加的主要原因。为了满足 LTE-Advanced 时延方面的特殊需求, 本文对 LTE-Advanced 随机接入流程和退避算法进行研究。

随机接入流程中由于前导码和信息部分的碰撞从而造成的重传时延问题是随机接入过程中面临的首要解决问题。针对此问题, 本文在 LTE-Advanced 随机接入的流程研究中, 提出了一种基于 LTE“一步法”接入流程的改进方案, 改进方案首先执行前导码与信息部分的发送, 然后通过接入流程中增加一个反馈控制信令来表示前导码和信息部分在传输过程中的碰撞情况来决定后续的接入步骤, 避免了不必要的重传时延, 从而减少 UE 随机接入的平均时延和提高其随机接入的成功率, 最后通过仿真验证了此方案在 LTE-Advanced 的可行性。

在 LTE-Advanced 随机接入退避算法中, 为了解决由于用户的碰撞造成的时延问题, 本文通过分析了几种常用的退避算法, 提出了一种基于贝叶斯准则的多信道改进退避算法。该退避算法通过把接入信道划分为一个主传信道和多个重传信道, 在主传信道中利用贝叶斯准则对随机接入用户数进行估计, 在重传信道中利用前导序列良好的自相关性和互相关性及基站检测得到的碰撞用户数, 从而得到最大的用户传输概率。最后通过仿真分析了该改进退避算法在时延和吞吐率方面所表现的性能, 及在 LTE-Advanced 系统中的应用场景。

关键字: LTE-Advanced 随机接入 退避算法 贝叶斯估计

Abstract

3GPP started LTE-Advanced Research in order to adapt and meet the needs of future mobile communications market and the ITU-R IMT-Advanced technology collection. Higher system capacity and smaller access delay are needed in LTE-Advanced. The access steps and the collision of users are the main reasons of increasing the delay of access. In order to satisfy the special needs of LTE-Advanced, random access procedure and backoff algorithms are researched in this paper.

In the random access procedure, the delay of retransmission is the primary problem, which is due to the collision of preamble and the information part. For this problem, in the study of LTE-Advanced random access process, an improved access process program is presented based on the LTE "one-step" process in this paper. Firstly the preamble and message part are send in the improved program, then through increase a feedback signaling which represent the collision of the preamble and the information during the transmission case in the access process and to determine the follow-up access steps to avoid unnecessary retransmission delay. the average delay of UE random access is reduced and the successful access ratio is improved accordingly. And finally the feasibility of this program is verified by simulation.

In the backoff algorithms of the random access of LTE-Advanced, in order to solve the issue of delay owing to users' collision, In the research of Backoff algorithms, several common Backoff algorithms are analyzed in this paper, a multi-channel backoff algorithm is presented, which is based on Bayesian estimation. The access channel is divided into a main transmission channel and several retransmission channels in improved backoff algorithm, it take advantage of Bayesian principle to estimate the user number of randomly access in the main transmission channel. In the base station detection, the collision number of users is obtained by favorable autocorrelation and cross correlation of preamble sequence in retransmission channel, so the maximum transmission probability of users is obtained accordingly. Finally the delay and throughput in terms of performance and application scenarios is analyzed by simulation in LTE-Advanced system.

Keywords : LTE-Advanced Random access Backoff algorithm Bayesian estimation

目 录

摘 要	I
Abstract	II
目 录	IV
第一章 绪论	1
1.1 LTE-Advanced 综述	1
1.2 LTE-Advanced 目标需求与关键技术	2
1.2.1 LTE-Advanced 的目标需求	2
1.2.2 LTE-Advanced 关键技术	3
1.3 LTE-Advanced 随机接入技术	6
1.4 研究工作与论文结构	7
第二章 LTE-Advanced 中的 RACH	9
2.1 RACH 功能	9
2.1.1 定时调整	9
2.1.2 功率调整	9
2.1.3 资源请求	10
2.2 LTE-Advanced 随机接入信道	12
2.2.1 随机接入信道时频结构	12
2.2.2 随机接入信道复用方式	14
2.3 LTE-advanced 随机接入场景	15
2.4 随机接入过程	16
2.4.1 竞争随机接入	16
2.4.2 非竞争随机接入	18
2.5 LTE-Advanced 中的检测分析	19
2.5.1 时域检测	19
2.5.2 频域检测	20
2.6 本章小结	21
第三章 随机多址接入技术	22
3.1 ALOHA 协议	22
3.1.1 纯 ALOHA 协议	22
3.1.2 时隙 ALOHA 协议	23

3.1.3 扩展 ALOHA 协议	23
3.2 CSMA 协议	24
3.3 树型多址协议	25
3.4 预约时隙协议	26
3.5 本章小结	27
第四章 LTE-Advanced 随机接入流程研究	28
4.1 随机接入前导码选择	28
4.2 LTE-Advanced 随机接入过程概述	29
4.2.1 一步法和两步法随机接入流程方案	30
4.3 一种改进的随机接入流程方案	33
4.3.1 改进方案仿真分析	34
4.4 本章小结	36
第五章 LTE-Advanced 随机接入中的退避算法	37
5.1 随机接入退避算法	37
5.1.1 UB 算法	37
5.1.2 BEB 算法	37
5.1.3 GB 算法	38
5.1.4 MILD 算法	39
5.2 最优接入控制算法	39
5.2.1 系统模型	39
5.2.2 算法描述	40
5.2.3 最优控制接入算法性能分析	40
5.3 基于贝叶斯准则的一种改进退避算法	41
5.3.1 基于贝叶斯准则的信道状态描述	41
5.3.2 改进退避算法描述	43
5.3.3 改进退避算法仿真分析	44
5.3.4 LTE-Advanced 中退避算法的使用	46
5.4 本章小结	49
第六章 结论与展望	50
6.1 论文总结	50
6.2 展望	51
参考文献	52
致 谢	54
附 录	55

第一章 绪论

1.1 LTE-Advanced 综述

2008 年 3 月, 在 LTE 项目标准化接近于完成之际, 一个在 LTE 基础上继续演进的项目——先进的 LTE(LTE-Advanced)项目在 3GPP (3rd Generation Partnership Project 第三代合作伙伴计划) 拉开了序幕。LTE-Advanced 项目的启动是为了满足 ITU-R IMT-Advanced 技术征集的需要, 是一项名副其实的“4G”技术, 3GPP 在 R9 版本中初步提出了对 LTE-Advanced 进行研究。在 2008 年 3 月初, 3GPP RAN 全会就通过了 LTE-A-advanced 项目 SI (Study Item 研究阶段) 的 SID (SI 描述, 相当于立项申请), LTE-Advanced 的相关工作正式在 3GPP 开始。2008 年 4 月初, TSG (Technical Specification Group 技术规范组) RAN (Radio Access Network 无线接入网) 通过组织讨论会初步明确了基本需求和研究方向, 并在 2008 年 5 月初的 RAN#53 次会议上, RAN1 已经率先开始了 LTE-Advanced 的研究工作, 在 2008 年 5 月底, 3GPP 在 RAN 全会上通过了 LTE-Advanced 需求文件 TR 36.913 的初稿。根据 ITU-R 在 2008 年 6 月的会议结论, LTE-Advanced 的技术指标全面高于 IMT-Advanced。2008 年 7 月 3GPP RAN1 开始了 LTE-Advanced TR 的起草工作, 并于 2009 年 9 月完成了 SI, 预计将于 2011 年初时完成 WI 阶段的工作。

LTE-Advanced 作为 LTE 的平滑演进, 不需要对 LTE 进行全面更新, 只需要在其基础上进行适当的增强, 就可以满足 IMT-Advanced 的需求^[1]。3GPP 也将利用这一演进, 进一步巩固 LTE 标准在未来市场竞争中的优势地位。基于这一种定位, LTE-Advanced 系统应支持原 LTE 的全部功能, 并支持与 LTE 的前后向兼容性, 即 R8 LTE 的终端可以接入未来的 LTE-Advanced 系统, LTE-Advanced 终端也可以接入 R8 LTE 系统。3GPP 要求 LTE-Advanced 与 LTE 在实际的部署过程中可以共用一个技术平台, 而在一些 LTE 没有充分考虑的场景下采用如中继 (Relay) 技术、协同多点传输技术来提高系统性能。随着 3GPP 对 LTE-Advanced 的研究深入, 3GPP 认为由于 LTE 的大规模技术更新已经将近 20 年来学术界积累的先进信号处理技术 (如 OFDM、MIMO、自适应技术等) 消耗殆尽, 因此 LTE-Advanced 技术发展将更多地集中在 RRM 技术和网络层优化方面^[2]。

1.2 LTE-Advanced 目标需求与关键技术

1.2.1 LTE-Advanced 的目标需求

LTE-Advanced 着重考虑的方面主要包括降低时延、提高用户的数据率、增大系统容量和热点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优化。目标需求主要包括以下内容^[3]：

- 全面达到或超出IMT-Advanced的需求；
- LTE-Advanced是LTE的进一步演进，支持原LTE的全部功能；
- 支持与LTE的前后向兼容性；
- 支持从宏小区到室内、家庭覆盖的各种场景；
- 首要目标是低速移动用户（<10km/h）；
- 进一步增强自配置自优化能力；
- 支持和现有RAT的切换；
- 支持网络共享；
- 降低终端和网络的成本和功耗；
- 保持多厂家支持；
- 支持多频谱整合（连续和非连续频谱），最大带宽100MHz；
- 潜在部署频段：450–470MHz、698–862MHz、790–862MHz、2.3–2.4GHz、3.4–4.2GHz；
- 峰值速率：下行>1Gbps；上行>500Mbps；
- 峰值频谱效率：下行30bps/Hz（8×8天线）；上行15bps/Hz（4×4天线）；峰值频谱效率是低优先级目标（优先考虑4×4天线）；
- 宏小区平均频谱效率：下行（2.4-3.7）bps/Hz（提高约40%）；上行（1.2-2）bps/Hz（提高约60%）；
- 宏小区边缘频谱效率：下行（0.07-0.12）bps/Hz（提高约10%-50%）；上行（0.04-0.07）bps/Hz（提高约40%）；
- 微小区、室内频谱效率更高；
- 系统延迟：不差于LTE（在采用优化的系统配置情况下）；
- 切换和互操作性能：不差于LTE；
- VoIP容量：大于300个并行VoIP/5MHz（提高约1倍）；
- E-MBMS：不应等待 LTE-Advanced（预计为 R10），应在 R9 LTE 就支持 E-MBMS，R10 可进一步增强。

1.2.2 LTE-Advanced 关键技术

LTE-Advanced 作为 LTE 的平滑演进, 为了获得更优的系统性能, 计划引进几种关键技术, 如多载波聚合技术、中继技术、多点协作传输技术, 从而提高频谱效率与传输速率。

①多载波聚合技术

多载波聚合技术通过聚合方式将多个 LTE 载波扩展成 LTE-Advanced 系统的传输载波, 根据实现方式的不同, 可以分为连续聚合与非连续聚合^[4], 如图 1.1, 使用这种扩展方式, 可以满足 LTE-Advanced 系统带宽 100M 的系统需求, 同时 LTE 系统的用户终端能够使用 LTE-Advanced 系统聚合的“LTE 载波单元”, LTE-Advanced 系统的用户终端也可以使用多个“LTE 载波单元”进行通信。多载波聚合技术在 LTE-Advanced 系统的实际部署方面有明显的技术优势。因为多载波聚合技术是直接聚合多个 LTE 载波, 不需要重新设计物理信道和调制编码方案, 减少了对 LTE 系统物理信道和调制编码方案的影响。通过复用已有的 LTE 系统资源, 多载波聚合技术大大降低了 LTE-Advanced 系统的设计难度, 便于实现 LTE 系统向 LTE-Advanced 系统的平滑过渡, 满足了系统后向兼容性的要求, 进而大大缩短 LTE-Advanced 系统的商用时间。同时在聚合连续 LTE 载波的情况下, 合理减少载波间的保护带宽, 将增加带宽内传输数据的载波数量, 可以进一步提高 LTE-Advanced 系统的频带利用率。

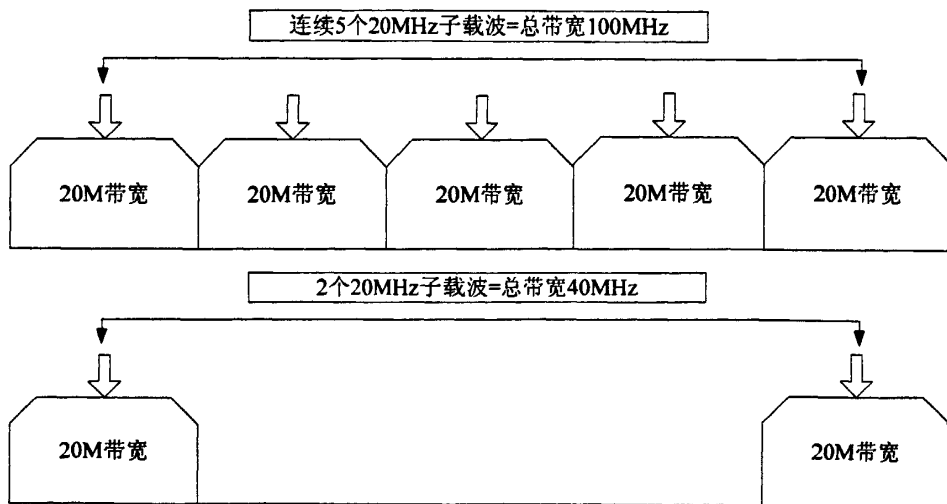


图 1.1 连续载波聚合和非连续载波聚合示意图

在载波聚合技术中, 传输块在聚合后的载波上的映射问题是实现载波聚合技术的关键, 将关系到系统的前后向兼容、复杂度等问题。单一的数据流需要在一些节点上被分配到不同的载波上。从 MAC 层的角度来看, 传输块在载波上的映射问题, 3GPP 提出了两种可能的方案^[4]。

1) 在方案 1 中每个载波上都有一个传输块，单一的数据流在某些点上被分到不同的载波上，载波上数据流的聚合在 MAC 层完成。在载波的设计上，为了保持载波在物理层上的原有结构，每个载波都是独立设计的，具体体现在特殊载波的位置、链路自适应和 HARQ (Hybrid Automatic Repeat-reQuest 混合自动重传请求) 等。方案一中 MAC 层—物理层接口如图 1.2 所示：

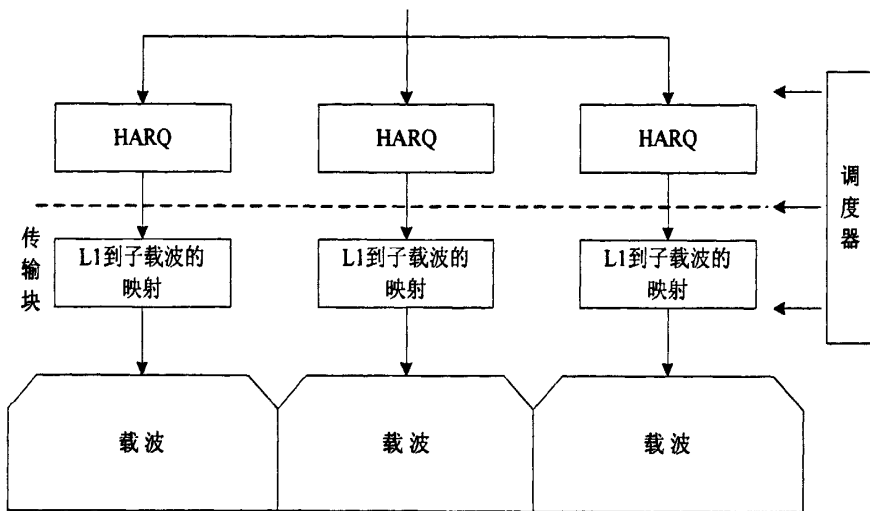


图 1.2 载波聚合方案一（数据流在 MAC 层聚合）

2) 在方案 2 中考虑到所有的载波共用一个传输块，单一的数据流在某些点上被分到不同的载波上，载波上数据流的聚合在物理层上进行。因此每个载波的物理层结构需要重新设计。方案 2 中 MAC 层—物理层接口如图 1.3 所示：

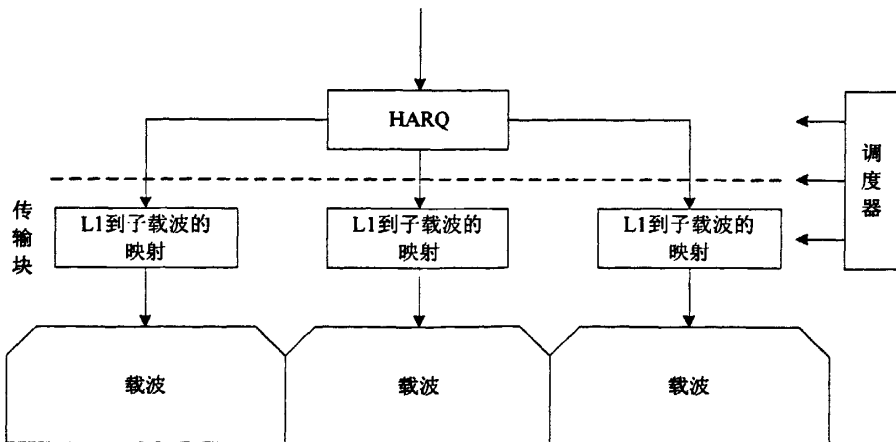


图 1.3 载波聚合方案一（数据流在物理层聚合）

方案 1 在链路自适应和 HARQ 方面体现出了很好的性能，而且容易实现 LTE-Advanced 向 LTE 的后向兼容，但在频谱效率和调度增益方面没有得到很好的实现。

方案 2 可以减少传输块个数和 HARQ 过程，减小了系统的开销。但额外频率

的分集增益被边缘化了, 编码增益的效果也无法体现。

②中继技术

中继技术就是基站不直接将信号发送给 UE, 而是先发给一个中继站 RS (Relay Station), 然后再由 RS 转发给 UE, 上下行的情况类似^[1]。该技术是改善系统覆盖范围, 提高系统容量的有效手段, 通过 Relay 技术可以有效填补系统覆盖不足造成的覆盖空洞和阴影死角。中继技术目前已作为 LTE-Advanced 系统的关键候选技术之一。

在 LTE-Advanced 系统中, RS 主要分为 3 类: 层 1 RS, 层 2 RS 和层 3 RS。层 1 RS 是一个增强的直放站, 结构简单, 它只是通过调整发送功率和带宽来实现物理层信号的自适应发射, 对基站的信号不进行任何解调和解码。在层 2 RS 的定位使用上, 3GPP 目前还存在很大的争议, 因为该层 2 RS 不仅要求可以解调基站的信号, 而且要求能进行有限的带宽自适应, 但不具有完整的协议结构, 仍依赖于基站的集中 RRM (Radio Resource Management 无线资源管理) 控制。在层 3 RS 的定位上, 3GPP 把层 3 RS 定义为一个使用无线回传链路的基站, 它具有和基站相似的空口协议结构, 不仅要求可以解调基站信号, 还要求具有相当完整的 RRM 能力和权限。

中继技术作为 LTE-Advanced 系统的关键候选技术之一, 其在理论上可以获得覆盖和容量增益, 但这项技术也存在潜在的干扰问题, 因为在系统中插入了一个新的网络节点, 将不可避免的带来了新的干扰, 从而导致更复杂的干扰结构。为了在基站和 RS 之间有效地分配时频资源, 可能需要通过额外的帧结构设计和资源调度来实现, 这样将增加系统的复杂度。

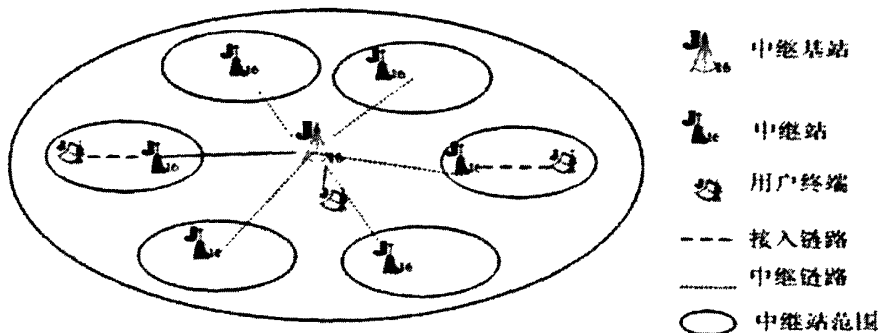


图 1.4 中继 (Relay) 系统

③协同多点传输技术

多点协作传输与 RELAY 技术相似, 是对传统单基站 MIMO 技术的补充和扩展, 通过在网络中插入大量新的站点来拉近天线和用户的距离, 实现“小区分裂”, 从而获得更高的频率复用。新增的站点和基站之间的链接不是通过无线链路实现的, 而是通过射频光纤连接的, 新增的天线站只包含射频模块, 类似一个无线远端单元

RRU(Radio Remote Unit),而所有的基带处理仍集中在基站,形成集中的基站单元BBU(Base Band Unit)^[2]。多点协作传输技术主要分为两大类:联合处理及协作调度/波束赋形。联合处理利用不同小区基站天线到用户的空间分集来提高小区边缘用户性能,进一步分为联合传输和动态小区选择两类。其中,联合传输是指多个小区用相同的时频资源向用户发送承载用户数据信息的物理下行共享信道(PDSCH);动态小区选择指同一时刻由UE动态选择某一小区向其发送PDSCH。协作调度/波束赋形则是利用不同小区之间的信息交互,通过对资源(时间、频率、空间等)的调度,包括波束赋形向量的调度来减少小区间干扰ICI(Inter-Cell Interference),从而改善小区边缘性能,提高系统吞吐量。

协同多点传输技术需要多种物理层传输技术的支持,如适应多小区联合传输的MIMO(Multiple Information Multiple Output)技术、预编码技术、网络编码技术、高效的信道估计和联合检测技术等。同时,先进有效的无线资源管理方案也是影响协同多点传输技术性能的重要因素,如小区资源分配策略、负载均衡、联合传输中协作小区的选择机制以及有效的切换策略等。其中切换性能是衡量移动通信系统性能的重要指标,有效的切换策略是实现用户无处不在的网络的关键。在引入协作多点通信技术后,系统中的切换场景将发生变换,现有系统中的切换策略将无法满足不同场景中的切换需要,因此设计有效的切换策略成为协同多点传输技术中亟待解决的问题^[5]。

除了以上介绍的几种关键技术外,在LTE-Advanced系统中使用的关键技术还包括基站间协同、家庭基站,多频段协同等,在物理层传输技术方面,LTE-Advanced目前尚无法找到全新的先进传输技术,因此只是对现有传输技术的基础上进一步优化,这里不一一介绍了,具体可以参阅相关文献。

1.3 LTE-Advanced 随机接入技术

随机接入是UE在开始与网络通信之前的接入过程。由MAC层和物理层联合完成的。按照应用场景的不同分为:竞争随机接入过程和非竞争随机接入过程。竞争随机接入过程主要用于RRC-IDLE状态的初始接入、终端切换期间的过程、RRC-CONNECTED模式中上行或下行分组到达时的接入。非竞争随机接入过程仅用于切换和下行分组到达的情况。随机接入的主要目的就是时序调整,功率调整和资源请求。随机接入技术是通信系统中MAC(Media Access Control)层的一项重要技术。随机接入过程也是MAC层众多过程中最主要的过程之一。如何提高无线网络随机接入性能,优化随机接入过程一直是研究领域中的热点之一。系统吞吐率和时延是衡量随机接入过程好坏的两个主要技术指标。3GPP LTE-Advanced中相关技术

文档规定了从IDLE状态到ACTIVE状态时延为50ms^[3]，如图1.5所示。而接入的步骤和用户的碰撞问题是造成延时增加的主要原因。为了满足LTE-Advanced 时延方面的特殊需求，如何优化随机接入流程，优化接入算法从而提高系统的吞吐量与减少接入延时成为LTE-Advanced随机接入研究中面临解决的首要问题。

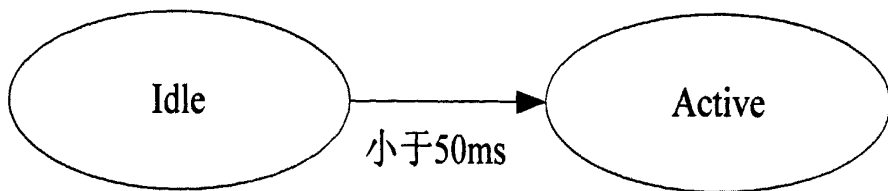


图1.5 LTE-Advanced状态转移时延要求

1.4 研究工作与论文结构

本文针对以上问题，重点讨论了LTE-Advanced随机接入流程和竞争随机接入过程中退避算法两方面的内容，在LTE-Advanced随机接入的流程研究中，提出了一种基于LTE“一步法”的接入流程改进方案，并通过仿真验证该改进方案在LTE-Advanced系统中的可行性。在LTE-Advanced随机接入退避算法的研究中，通过分析几种常用的退避算法，提出了一种适合应用于LTE-Advanced系统的改进的退避算法，并通过仿真分析了改进的退避算法在时延和吞吐率方面的优越性，最后通过仿真分析该退避算法在LTE-Advanced系统中的应用场景。

全文组织如下：

第一章：简单的对LTE-Advanced及其采用的关键技术进行简要概述，引入本文背景和期望解决的实际问题。

第二章：LTE-advanced中的RACH (Radio Access Channel)。讨论了随机接入的功能，随机接入信道的时频结构和复用方式，并对随机接入的场景和接入过程进行了探讨。

第三章：基于竞争的多址接入协议，介绍了竞争接入过程中几种典型的随机接入技术，并对这些技术的性能与特性进行了分析。

第四章：LTE-Advanced随机接入流程研究，讨论了随机接入过程中前导码的选择，在对LTE“一步法”的接入流程进行研究的基础上，提出一种改进的接入流程方案，并通过仿真验证其在LTE-Advanced系统中的可行性。

第五章：LTE-Advanced系统中随机接入中的退避算法，通过研究分析几种常用的随机接入退避算法，并提出一种基于贝叶斯准则的多信道改进退避算法。

第六章：总结与展望。对本论文进行总结分析，并对后续工作及改进方向提出

展望。

第二章 LTE-Advanced 中的 RACH

2.1 RACH 功能

2.1.1 定时调整

3GPP 对于随机接入的主要作用的想法是一致的，即为了获得更加精细的定时同步^[6]。同步过程限于随机接入过程，但是它只能在下行获得时隙和帧同步。换句话说就是移动终端可以从广播信道的帧开始和结束时隙接收信息，但是广播信号的发射和接收之间是有一定延时的。因此，移动终端无法估计其自身应该在什么时间开始发送上行数据，从而刚好使该数据落入 eNode B（evolved Node B 演进型 Node B）的开始时隙。

RACH 通过对定时偏差进行调整，从而使 UE（User Equipment 用户设备）对往返时间进行适当的补偿来解决这个问题。由往返时间导致的定时偏差如图 2.1 所示：

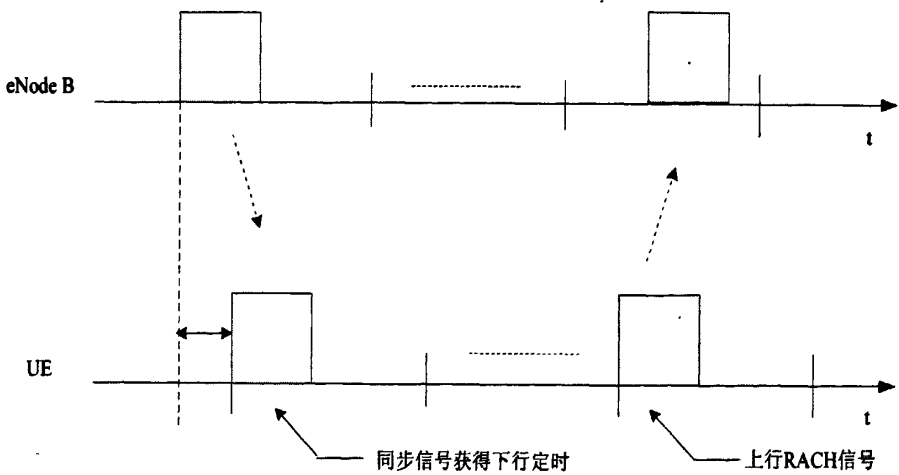


图 2.1 信号传输的往返延时所引起的定时偏差

随机接入过程成功后，基站和 UE 在上行循环前缀的小部分时间内获得同步，这样，随后的上行信号便可以正确的译码从而不会对其他用户产生干扰。

2.1.2 功率调整

为了提高前导码发送成功的概率和降低随机接入的时延，需要对前导码的发送进行功率控制，在 LTE-Advanced 的随机接入过程中，3GPP 目前考虑的功率控制主要有两种方式：功率递增和带路径损耗的功率控制^[5]。

①功率递增

在随机接入过程中, 如果初次接入没有尝试成功, 通过在随后的接入尝试中逐步提高发射功率来提高接入成功率。递增的步长可以根据需要调整。

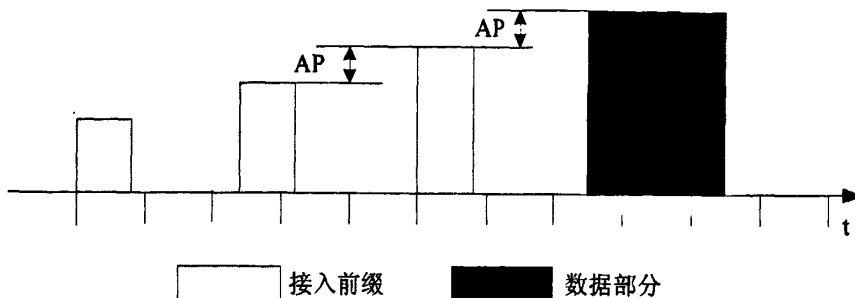


图 2.2 功率递增技术

$$P_{i+1} = P_i + \Delta P \quad (2-1)$$

其中 ΔP 是变化的步长, 其单位是 dB。

当 UE 收到随机接入响应信息之后, 数据部分将在最后的前导序列之后的 3 到 4 个时隙内发送 (取决于在广播信道中收到的响应信息)。数据部分发送的功率为:

$$P_{message} = P_{lastpreamble} + \Delta P_{M-P} \quad (2-2)$$

ΔP_{M-P} 主要是为了基站能正确接收到数据部分而增加的功率。

②带路径损耗的功率控制

主要是在随机接入序列中携带几比特的信道质量信息来表征用户的路径损耗情况, 然后系统根据此信道信息来控制用户接入的发射功率, 以抑制小区间的干扰, 降低带宽资源消耗^[7]。

功率控制可以提高接入的成功率和减小接入延时, 但也可能对随机接入产生负面影响。从原理上说, 一个随机接入信息的检测概率恰恰取决于参与竞争的各用户之间的功率差异, 功率差异越大, 检测概率越高。因此从保证较高的检测概率的角度看, 功率控制可能反而会带来负面影响。

2.1.3 资源请求

在发送任何数据之前, UE 必须获得上行传输资源。基站作为一个调度器可以为 UE 提供调度信息。LTE-Advanced 随机接入过程可以用于请求频域资源和时域资源, 可以包含以下几种可能方式^[8]:

①RACH 过程仅用于定时和/功率调整。其唯一目的就是在循环前缀内获得同步, 然后通过资源请求来获得所需的资源, 在同步情况下, 资源请求过程是竞争的, 如图 2.3 所示:

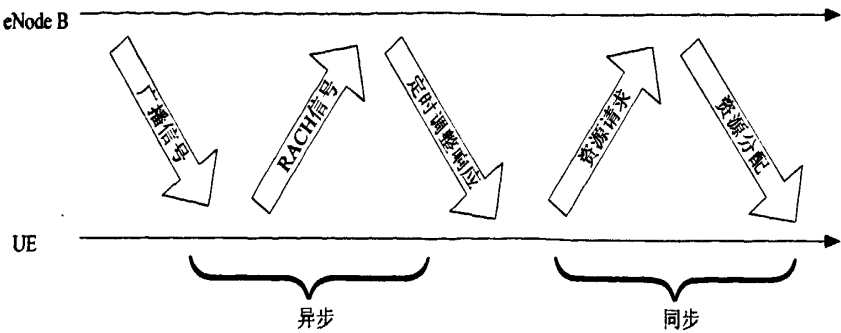


图 2.3 系统同步后的资源请求过程

②随机接入信号由两个不同且独立的部分组成：RACH 签名和 RACH 信息。签名是伪随机码，它可以允许多个随机接入过程在相同的频率和时隙中进行译码。而 RACH 消息中包含的具体的信息。例如，该信息可以包含资源请求（要发送的数据量）。在基站侧，只有签名用于检测。如果成功地进行了检测，那么就需要对消息部分进行译码和分析。如果网络存在有效地资源，那么基站将向 UE 发送资源授予消息。签名部分还可以用作导频，从而实现消息部分的解调。随机接入信号的结构如图 2.4 所示：

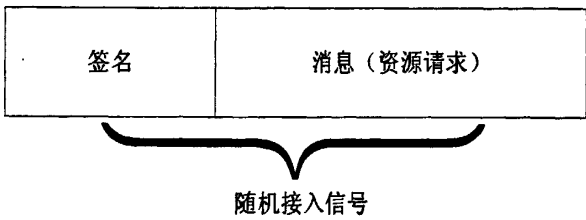


图 2.4 资源请求信息可以包含在 RACH 信号中

③随机接入信号仅有一个签名，但是该签名代表某种资源请求。我们设想多种签名集，每个集合都对应用于发送随后数据的特定频率带宽和时间间隔。如果成功检测，那么 UE 和基站都将知道随后可以使用什么样的资源。图 2.5 为签名集与有效资源的一对一关系。

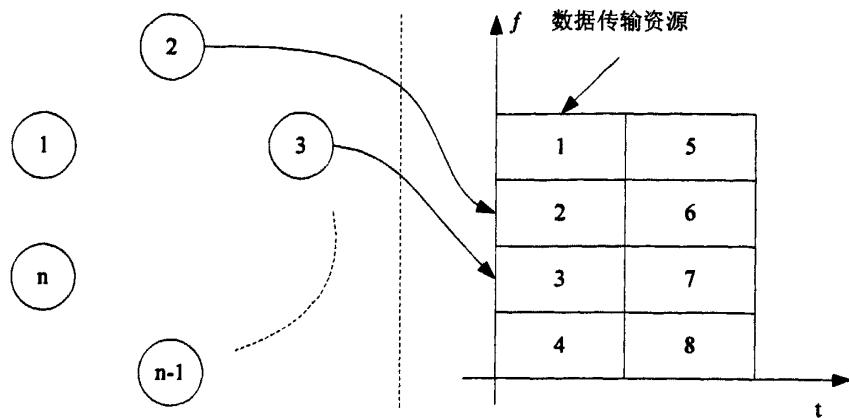


图 2.5 签名集与有效资源间的一一对应

2.2 LTE-Advanced 随机接入信道

2.2.1 随机接入信道时频结构

在LTE-Advanced系统中，对于接入信道来说，应该保持正交的竞争和可调性。关于如何分配资源给随机接入信道和上行已调度信道，有两种可能的方案^[9]。第一种方案是在特定的子帧内将整个系统带宽分配给随机接入信道。第二种方案是仅将给定系统带宽的一部分分配给RACH接入。两种方案的示意图如下：

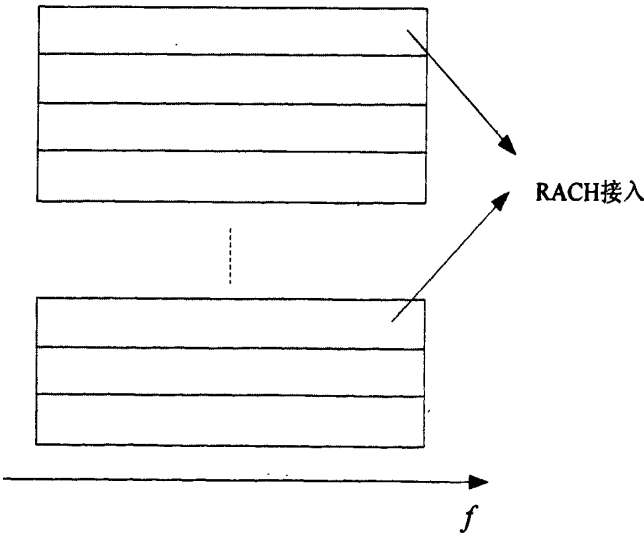


图 2.6 随机接入带宽分配方案 1

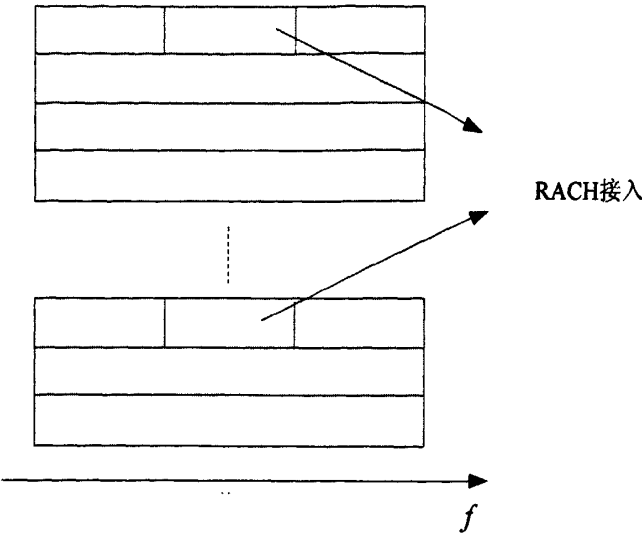


图 2.7 随机接入带宽分配方案 2

无论是哪种分配方法，随机接入都不应超过一个传输时间间隔 TTI(Transmission Time Interval)^[10]。在选择分配机制时应考虑给定UE的带宽。当分配的带宽是5MHz或者更窄时，可以选用第二种方案。如果系统带宽足够大，例如 LTE-Advanced中可以支持超过20MHz以上的带宽，考虑选择第一种方案。

传输带宽的大小可以影响系统的分集增益效果和检测成功率。传输带宽越小，获得的分集增益越小，用户碰撞的概率越大，反之，系统能提供更多分集增益和达到更好的检测成功率。由于信道负载与用户碰撞概率成正比的关系，考虑到 LTE-Advanced系统可以提供20M以上的带宽，所以可以通过自适应的分配带宽的方式来减少碰撞概率的发生，提高随机接入的性能。但是这种方法的缺点在于系统复杂性的增加。eNode B应当在估计业务负载后向UE广播随机接入传输带宽的分配方式。比如，如果给定UE 20MHz的系统带宽。基站可以有以下分配方式：

- ①如果业务负载较低，那么每个随机接入可以分配10MHz的带宽。
- ②如果业务负载较高，那么每个随机接入可以分配1.25MHz的带宽

为了实现准确的定时估计，信号带宽应该得尽量宽。为了恢复UE所发送的信号，所以其精度要低于CP。一个CP对应的周期的量级约为1μs,所以所需的信号带宽的量级应为1MHz。随机接入信号在一个特定的子帧中进行发送，即一个RACH子帧，为了避免对下一个子帧的干扰，两个子帧之间需要有一个保护时间间隔^[11]。保护时间的长度由小区大小确定。越大的小区意味着下行广播信号和上行传输之间存在较大的往返时间。需要计算RTT时间来确定保护时间的长度。保护时间间隔如图 2.8所示。

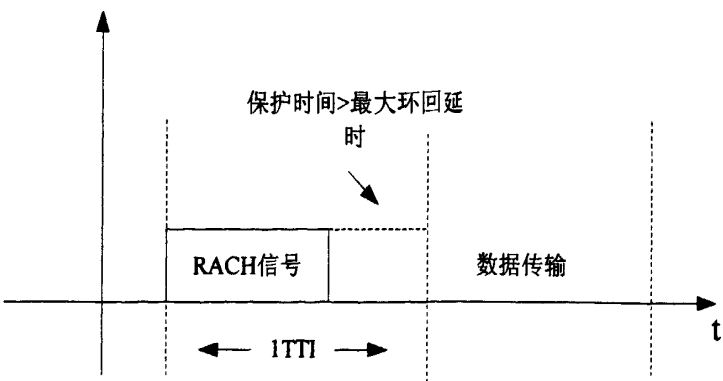


图2.8 RACH信号所需的保护时间间隔

2.2.2 随机接入信道复用方式

一个随机接入信号通常都承载在一个随机接入突发（Burst）中。PRACH 占用的时频资源是由系统的 RRM 算法控制的^[12]。LTE-Advanced 中上行和下行数据组成以无线帧的形式传输。有两种帧格式分别支持 FDD 和 TDD 双工模式下的 LTE-Advanced 系统。针对 LTE-Advanced 系统可以支持多种带宽的特性，在实际的系统运用中，可以考虑在每个上行无线帧中根据用户的负载情况采用多个接入时隙，接入时隙的周期时间会随着系统带宽的变化而不同。为了尽量简化采样方式，缩短等待时间，同时降低基站在用户接入检测的实现复杂度，根据 3GPP 的讨论，在 LTE-Advanced 系统中尽量采用在时域上复用多个接入时隙以达到简化采样方式，缩短等待时间和降低基站在用户接入检测的现实复杂度。LTE-Advanced 随机接入信道的复用方式有三种：时分复用、码分复用、频分复用。

FDD 模式下，随机接入信道可能被配置在无线帧的任何一个子帧内，随机信道最大的配置数可以占满整个无线帧。

TDD 模式下，随机接入信道的配置限制在特殊时隙的上行导频信道或它紧挨着的下一个子帧中。由于 TDD 帧中上行时隙的数目有限，所以 TDD 不得不在频域上进行随机接入时隙的复用。

基于 FDM/TDM 的 PRACH 结构如图 2.9 所示，图中 PRACH 信道配置在每个无线帧的第一个 RA（随机接入）时隙中，系统在系统带宽内划分了 4 个频带用于 PRACH 传输，UE 可以在 4 个频带中选择一个进行随机接入。在图中，一个 UE 在前一帧中使用第一个频带发送 PRACH，在后一个帧中使用了第三个频带发送。TDD 帧结构下随机接入信道的频分复用和时分复用如图 2.10 所示。

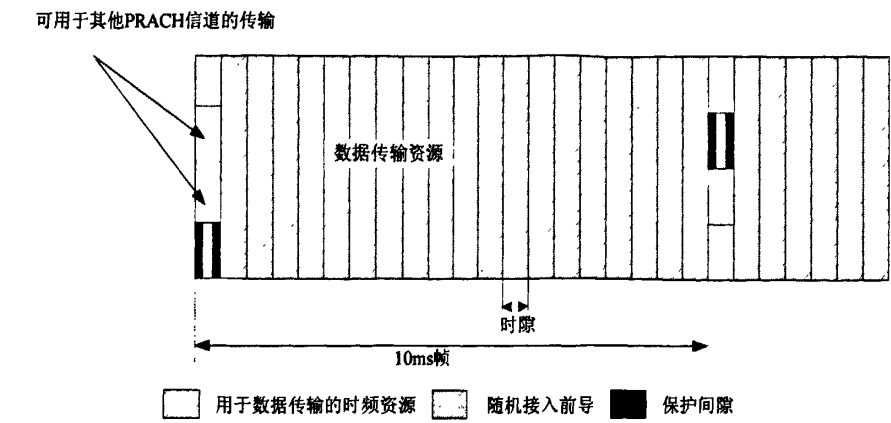


图 2.9 基于 FDM/TDM 的 PRACH 结构

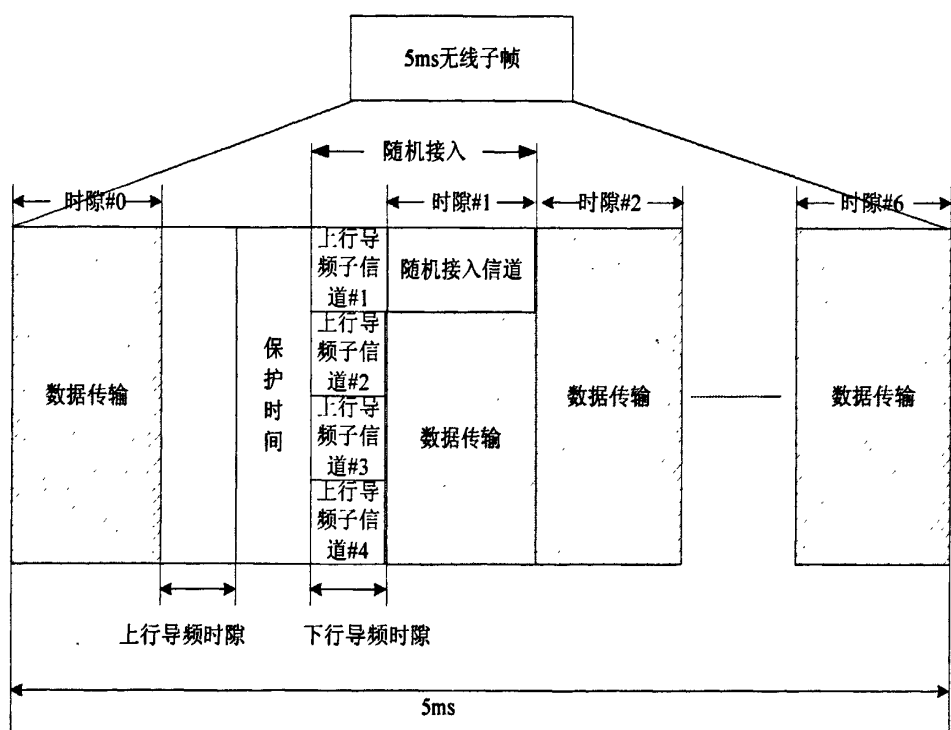


图 2.10 TDD 帧结构下随机接入信道的频分复用和时分复用

2.3 LTE-advanced 随机接入场景

随机接入过程目的是使UE与网络建立连接或是使UE获得上行同步。因此在LTE-Advanced系统中，UE在以下几种场景下将发起随机接入过程^[13]。

①空闲模式下的随机接入

在LTE-Advanced系统中，处于空闲模式下的UE通过在LTE-Advanced系统中收到含有与其标识符相匹配的寻呼消息时，发起随机接入过程。目的是发送小区更新

信息，获得在当前接入eNode B中的唯一的标识符C-RNTI，同时为发送无线资源管理RRC（Radio Resource Control）层连接建立请求消息的上行资源做准备。

②无线链路故障RLF（Radio Link Failure）后的接入

在LTE-Advanced系统中，处于连接状态下的UE与基站间的无线链路故障后时，UE的RRC层负责对无线链路故障进行检测判决，若在一定的检测检测内仍没有恢复，则UE将发起随机接入过程，以完成UE到eNode B的重新接入。

③切换中的随机接入

当移动的UE从一个小区切换到另一个小区时，UE的RRC层根据收到的切换命令进行重新配置，在切换过程中UE与源小区之间不进行连接释放过程，而是直接通过随机接入与目标小区建立连接。

④上行同步丢失的随机接入

当UE尚未和系统取得或丢失上行同步时，UE发起随机接入过程来估计、调整UE上行发送时钟，将同步误差控制在CP长度以内，从而获得与eNode B时间同步。

⑤上行同步的随机接入

当UE与系统取得上行同步后，这时需要进行同步随机接入过程。同步随机接入的最大目的就是获得资源调度权限。

综上所述，无论是处于空闲模式下的UE，无线链路故障的UE，进行小区切换的UE，还是上行同步丢失下的UE与已经于系统建立了同步的UE都需要进行随机接入。因此，随机接入过程是UE接入到基站的首要步骤，是保证UE与eNode B保持同步的关键，也是MAC层众多过程中最主要的过程之一。

2.4 随机接入过程

随机接入过程是按照随机接入过程的初始化、随机接入资源的选择、随机接入前导码的传输、随机接入响应的接收、碰撞解决和随机接入过程的完成这个六个步骤来分别描述的^[14]。

所以按照应用方式的不同，随机接入过程可分为竞争随机接入和非竞争随机接入。

2.4.1 竞争随机接入

竞争随机接入主要用于：

- ①在 RRC-IDLE 状态的初始接入；
- ②在无线链路失败后的初始接入；
- ③终端在小区切换期间的随机接入；

④在 RRC-CONNECTED 模式中上行或下行分组到达时的随机接入。
竞争随机接入过程如图 2.11 所示。

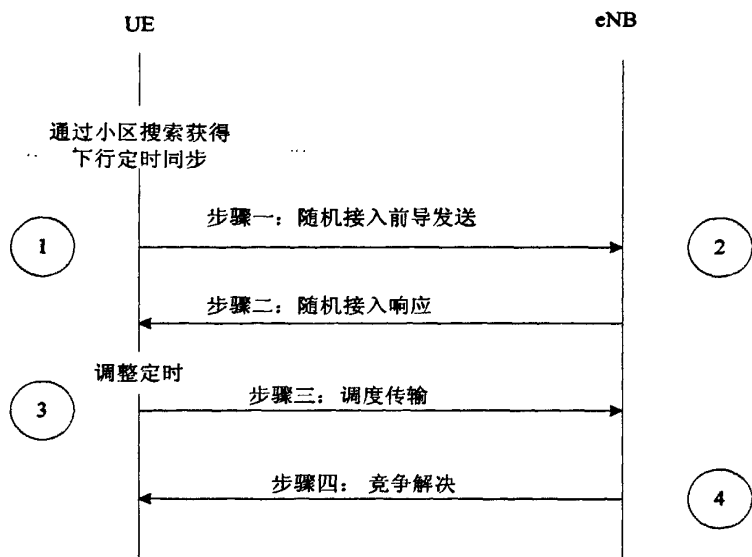


图 2.11 竞争随机接入过程

竞争随机接入过程可以分为 4 个步骤进行。

①UE 在上行随机接入信道传输随机接入前导码，同时可以在前导码中携带少量的比特信息，这些信息可以用于承载诸如随机 ID，资源请求等。

②网络所返回的随机接入响应消息在前导序列中包含终端所提供的随机身份识别，临时 C-RNTI (Cell RNTI) 以及一个初始上行资源准许，终端使用该准许在上行共享传输信道上发送“调度传输”消息。随机接入响应的主要目的是为发出请求的终端提供早期资源分配，从而将 RRC 连接的建立时间缩到最短。设计该规程的目的是为了满足对终端状态改变的苛刻要求。

③当 UE 通过下行信道接收检测到步骤 2 中的前导码识别结果和自己的相吻合后，即执行步骤 3。向 eNode B 发送上行传输的调度信息。eNode B 所分配的 C-RNTI 是一个位于小区级上的无线网络临时标识。它用于唯一标识在接入网络中拥有 RRC 连接的一台终端。“调度的传输”通过使用最简单的 RLC TM (透明) 模式进行发送的“调度的传输”实际上是一条 RRC Connection Request 消息。如果早期资源分配的大小允许，初始消息可以包含第一条 NAS 消息，例如一条 Service Request、一条初始附着消息或一条 Tracking Area 更新消息。

④eNode B 通过下行信道向 UE 传输竞争解决信息，竞争解决消息与调度的传输不相关联。它旨在提供真正的竞争结果，同时在多个终端同时请求接入相同的情况下识别胜出的终端。该消息在初始接入过程的一开始进行发送，以便最大限度缩短

因落选需要重试的终端的延迟。

2.4.2 非竞争随机接入

非竞争随机接入主要用于

- ①终端跨 eNode B 所需的切换随机接入;
- ②终端在 RRC-CONNECTED 模式下重启下行传输所需的随机接入。

非竞争随机接入流程:

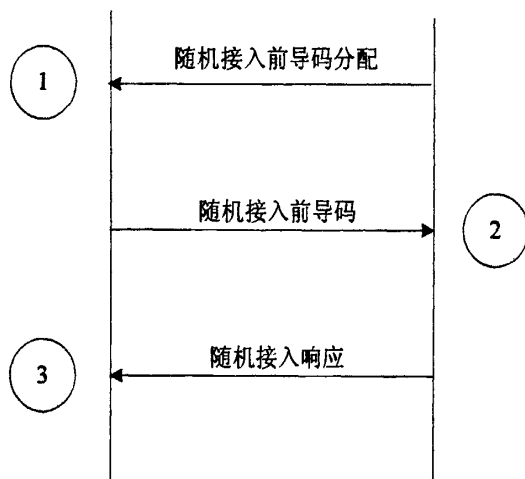


图 2.12 非竞争随机接入过程

非竞争随机接入可以分为 3 个步骤进行, 如图 2.12 所示:

①当 UE 进行小区切换或在 RRC-CONNECTED 模式下重启下行传输时, eNode B 通过下行链路信道中的专用信令给 UE 分配一个随机接入前导码。该专用信令存在于:

- 1)切换时由目标 eNode B 传向源 eNode B 的切换命令中。
- 2)下行数据到达情况下物理下行控制信道中。

②UE 在上行的随机接入信道中传输由 eNode B 在步骤一中所分配的随机接入前导码。

③eNode B 检测到随机接入信道中的前导码之后, 通过物理下行共享控制信道向 UE 发送随机接入响应信息。响应信息的内容包括^[15]:

- 1)用于切换的定时调整信息
- 2)初始上行准许
- 3)用于下行数据到达的定时调整和随机接入前导码的识别结果。

随机接入从本质上来说是一种“竞争随机接入”的方式。在非同步随机接入情况下, 由于 UE 尚未与系统取得上行同步, 所以必须采用随机接入。而在同步接入情况下, 由于 UE 已经与系统取得上行同步。所以可以采用调度的方式传送上行接入

信息。不一定非要“竞争接入”。而且根据3GPP在LTE中随机接入的深入研究过程中，已逐渐由仿真结果说明采用调度的信道进行同步接入比同步随机接入的系统开销更低。

2.5 LTE-Advanced 中的检测分析

在LTE-Advanced中，在eNode B侧为了检测出在某一TTI中发送的是哪个签名序列，并对定时偏差进行估计，可以采用两种方法来进行分析：时域检测和频域检测。

2.5.1 时域检测

时域检测就是在时域中对每个签名序列进行相关操作，签名序列定义为一个码字和一个频带。如图 2.13 所示。

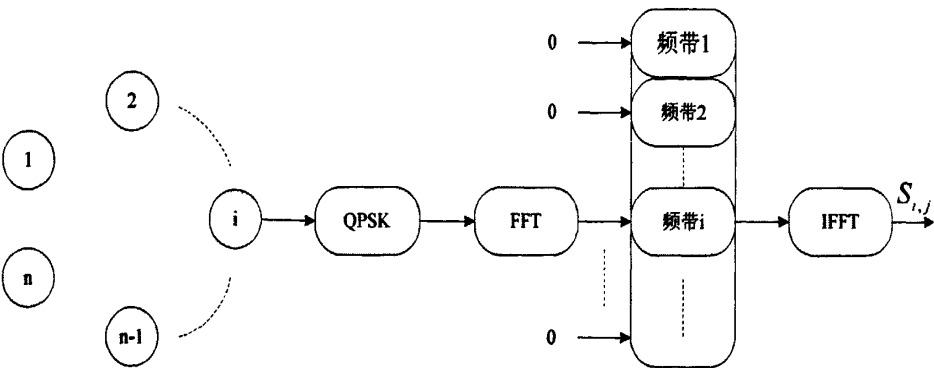


图2.13 签名定义为一个码字和一个频带

在每个随机接入子帧中，eNode B执行多个相关操作并计算检测变量，如图2.14所示。如果检测变量对应的签名 $S_{i,j}$ 超过了特定的门限，那么eNode B将认为UE使用签名 $S_{i,j}$ 进行网络接入。在这，可以看出eNode B在相同的TTI内可以对多个签名序列进行检测。一旦检测出一个签名序列后，从互相关函数峰值的位置便可以计算出定时偏差。

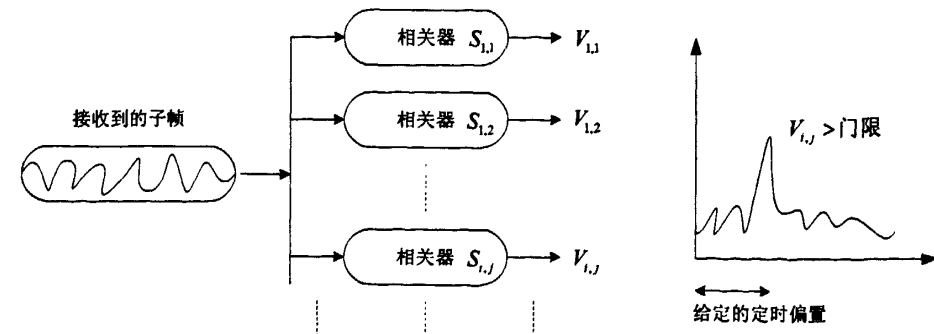


图2.14 eNode B侧的相关操作

在此，对于该检测方法而言循环前缀是没有用处的。因为该检测的目的不是译码并恢复发送的数据，而是仅仅对时域信号进行分析，找出是哪个签名序列而已。

2.5.2 频域检测

频域检测的过程如图2.15所示。

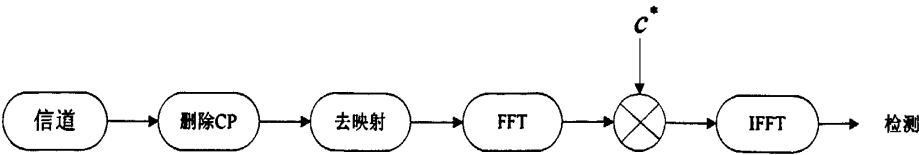


图2.15 eNode B的频域检测过程

在eNode B的频域检测中，UE的发送端没有任何改变，而频域检测过程与时域检测是完成不同的。首先，eNode B要进行FFT变换，其大小对应于给定的系统带宽，随后，对于每个RACH签名，将其使用的子载波提取出来并乘以码字的复共轭。接着进行IFFT变换并在时域进行检测估计。FFT/IFFT操作数对应于随机接入信号中的OFDM符号数。假设消息中包含4个OFDM符号，与符号 k 相关的码字用 c_k 表示，那么该检测过程的详细过程如图2.14所示。

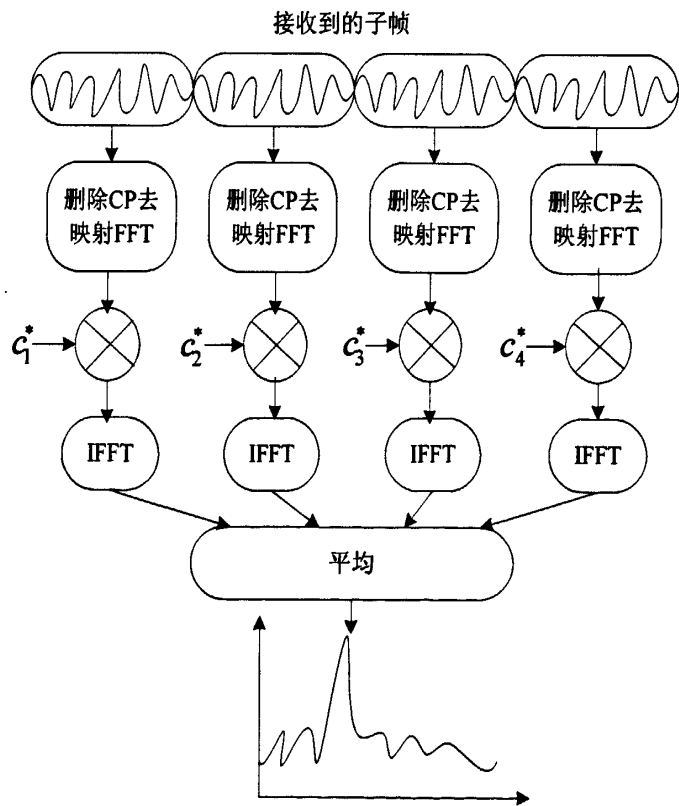


图2.15 检测中的平均过程

在频域检测过程中，为了在RACH子帧中检测出签名序列，可以使用不同的FFT/IFFT集合。因为检测的目的是在CP（Cyclic Prefix 循环前缀）内估计出定时偏差，所以可以形成由CP间隔的多个集合，对这些不同的集合进行检测，直到在一个CP间隔内检测出峰值，如图2.16所示。

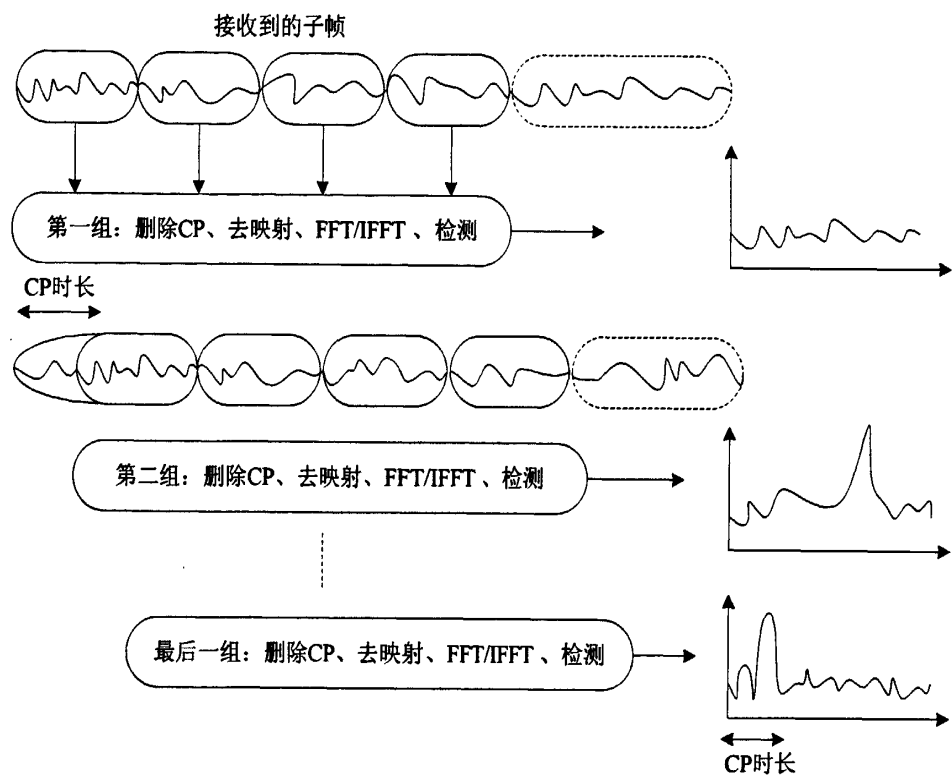


图2.16 对不同FFT/IFFT集合的签名检测

当峰值位于第一个CP内时，此时分析的信号就对应于发射的RACH信号，需要考虑的就是，该方法与时域检测不同，需要插入CP。

2.6 本章小结

本章主要介绍了随机接入的目的，作用，同时对 LTE-Advanced 随机接入信道的时频结构域复用方式，随机接入的场景与接入过程中竞争接入过程和非竞争接入过程进行了详细介绍。最后对随机接入中的时域检测方法和频域检测方法进行了分析介绍。

第三章 随机多址接入技术

随机接入协议作为 MAC 层协议的一部分,是通信网中应用最广泛、最重要的协议之一。多址接入协议可分为非竞争和竞争协议两大类。非竞争协议通过 TDMA、FDMA 和 CDMA 等方式给随机接入的用户分配专用的信道资源(时间、频率或码道等)以避免用户在传输过程中发生碰撞。而竞争协议中由于多个用户同时在同一信道中进行传输,如果没有为接入的用户分配指定的信道资源,由于随机接入信道资源的有限,随机接入的用户就有可能发生碰撞,对于碰撞的用户需要重传,这将导致系统的吞吐率下降和时延的增加,从而影响系统性能。因此竞争协议必须采取某种机制以避免用户的发生碰撞,保证用户传输成功。随机接入信道是一个竞争的接入信道,随机接入的退避算法也是基于竞争协议演变而来的。目前在 MAC 层广泛采用随机接入协议主要包括 ALOHA、CSMA、树形多址协议、预约时隙协议等 [16]。

3.1 ALOHA 协议

ALOHA 协议或称 ALOHA 技术、ALOHA 网,是世界上最早的无线电计算机通信网,也是最早提出的随机接入协议^[17],其工作原理为:在随机接入过程中,每个用户均可以自由地发送数据帧,如果不同用户之间的数据帧有部分的重复,则发生碰撞,发生碰撞的数据需要用户等待一段时间之后重新发送。ALOHA 协议可以分为纯 ALOHA 协议、时隙 ALOHA 协议和扩展 ALOHA 协议。

3.1.1 纯 ALOHA 协议

纯 ALOHA 协议是 ALOHA 协议中最基本的协议,它是思想是只要用户有数据要发送,就立刻发送数据,用户之间发生碰撞就随机等待一段时间重发数据。由于广播信道具有反馈性,因此发送方可以在发送数据的过程中进行碰撞检测,将接收到的数据与缓冲区的数据进行比较,就可以知道数据帧是否遭到破坏,如果发送方检测到冲突,那么它可以等待一段随机长的时间后重发该帧。纯 ALOHA 的工作原理如图 3.1 所示。因为纯 ALOHA 协议可能发生碰撞的时期为两个帧长,因此碰撞很容易发生。在稳定状态下,纯 ALOHA 协议吞吐率与网络负载 G 的关系为:

$$S = G \cdot e^{-2G} \quad (3-1)$$

从式 3-1 中可以看出当负载 $G=0.5$ 时,纯 ALOHA 协议可以达到的理论最大吞吐

率 $S=0.18$ 。

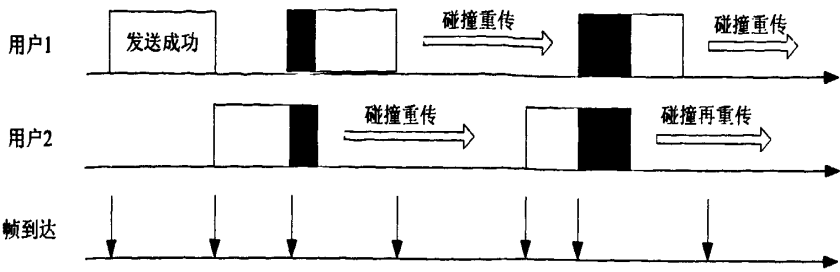


图3.1 纯ALOHA协议原理图

3.1.2 时隙 ALOHA 协议

时隙ALOHA协议是对纯ALOHA协议的改进，它在时域上将时间分为离散的时隙，每个用户的数据限制在时隙开始处发送。通过这种方式，可以避免如纯ALOHA协议随机发送数据的随意性，减少了数据发生碰撞的可能性，从而提高了信道的利用率。时隙ALOHA协议工作原理如图3.2所示。

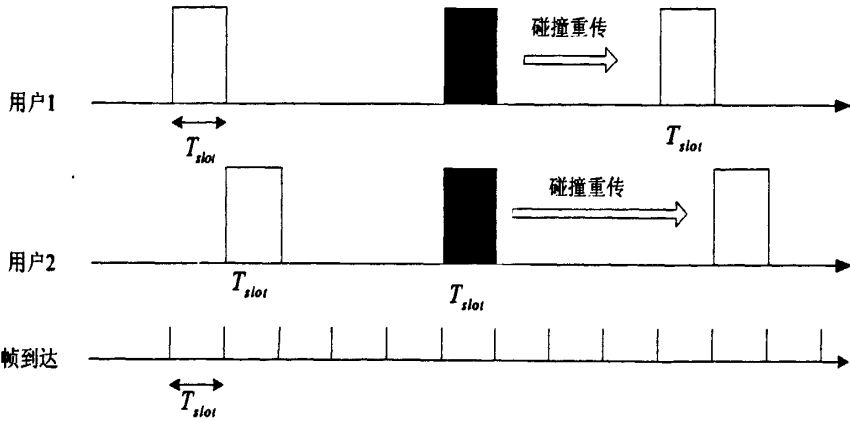


图3.2 时隙ALOHA协议工作原理图

由于时隙ALOHA协议的碰撞发生区比纯ALOHA协议减少了一半，所以时隙ALOHA协议的吞吐率提高了将近一倍。时隙ALOHA协议的吞吐率和负载的关系为：

$$S = G \cdot e^{-G}$$

(3-2)

由式3-2可以看出，当负载为 $G=1$ 时，时隙ALOHA可以达到理论最大吞吐率 $S=0.36$ 。

3.1.3 扩展 ALOHA 协议

扩展ALOHA (Spread ALOHA) 是N.Abramson为使传统ALOHA能适用于VSAT网及PCN网，在原ALOHA基础上提出的一种结合ALOHA和扩频多址技术的新型的随机多址技术。它是由ALOHA信号在时间和频率上进行扩展而生成的，在

系统中,所有用户共用一个扩频码。扩频时仍采用纯(或分隙)ALOHA信道,且保持原来的信息包格式,扩展ALOHA目前主要使用的方法有比特扩展法和切普扩展法^[18]。

由于扩展ALOHA在传输过程中仍采用ALOHA竞争协议,因此在传输的过程中用户就有可能发生碰撞。在接收端,所有用户共用一个扩频码,接收端的匹配滤波器就可以利用一个相同的扩展序列对接收序列进行相关运算,在相应的扩展比特位上采样,从而恢复出原来的信息包。因此在扩展ALOHA中,利用优良自相关特性的扩展序列,在接收端解扩后仍然可以对原有的信息包保持较高的恢复概率,从而提高信道的使用率。

ALOHA类协议是通过采取了控制发送概率、随机延迟等方法,将竞争在时间上向后分散开来,这种策略对在负载率较低时,可以取得很好的接入成功率和延时效果。但是如果负载率长时间的保持一个较高的值,发生碰撞的用户在随后的接入过程进行发送,随着重传用户的增多,冲突将更加频繁,系统状态将变得不稳定,从而导致系统吞吐量急剧下降和接入延时增加。

3.2 CSMA 协议

CSMA 协议(Carrier Sense Multiple Access 载波侦听)是应用于以太网、无线局域网等网络的多址技术。它的工作原理是用户在进行传输之前通过监听信道状况来决定是否传输,当用户监听到信道处于空闲状况时,则进行数据发送,当监听到信道处于忙碌状态,则向后延迟一段时间后再进行传输,但如果当多个用户同时监听到信道处于空闲状态时进行数据传输,则在信道中将有可能发生碰撞。载波侦听协议包括以下三个要点:

- ①载波侦听——用户在发送信息之前,必须监听信道是否处于空闲状态;
- ②多路访问——可以表示为多个用户同时访问信道;
- ③冲突检测——用户在发出信息的同时,必须监听信道状态,判断是否发生碰撞(同一时刻,有无其他用户也在同一信道上发送数据)。

在 CSMA 中,根据应用方式的不同,CSMA 分为持续 CSMA(persistent CSMA),非持续 CSMA, p-持续 CSMA。根据应用环境、传输媒质和碰撞解决的方法不同,CSMA 分为 CSMA-CD (Collision Detection) 和 CSMA-CA (Collision Avoidance)。

① 持续 CSMA (persistent CSMA): 在随机接入等待过程中,要进行数据发送的用户,首先要持续监听信道状况,一旦监听到信道处于空闲状态,便进行数

据发送；当监听到信道处于忙碌状态时，则一直监听信道状态直到监听到信道处于空闲状态为止，然后进行数据发送；当监听到信道发生冲突，则随机等待一段时间后再进行监听。在持续 CSMA 协议中，如果用户长时间监听到信道状态处于忙碌或碰撞，则该用户在长时间内将不能进行数据发送，同时，如果多个用户监听到信道处于空闲状态而进行数据发送，则在信道中将可能导致碰撞的发生，从而导致系统吞吐率的下降，延时的增加。

②非持续 CSMA：用户不持续监听信道状态，而是在监听到信道处于忙碌或有冲突发生时，随机等待的一段时间之后再开始监听信道，一旦监听到信道空闲就立刻发送数据，非持续 CSMA 协议通过这种随机监听的方法来进行发送数据，从而减小用户在传输过程中发生碰撞的概率。因此非持续 CSMA 可以获得更好的信道利用率，但由于采用的是随机的监听方式，如果用户一直监听到忙碌或冲突状态，则一直不能发送数据，将导致用户在传输数据时更长的平均延迟。

③ p -持续 CSMA：它主要应用于时隙信道^[11]，其工作原理就是用户在每次进行数据发送之前，首先监听信道状态，当信道空闲时，以概率 p 在当前时隙发送数据，以概率 $1-p$ 推迟到下一时隙，并在下一时隙继续监听信道状态，并通过监听的信道状态决定是否发送数据。从 p -持续 CSMA 的工作原理我们可以看出，影响 p -持续 CSMA 协议的性能关键就是发送概率 p 的选取。

④带碰撞检测的 CSMA (CSMA/CD:CSMA with Collision Detection)

广泛用于 LAN(Local Area Network)中 MAC 子层，是当前以太网 LAN 的基础，IEEE 802.3 或者 ISO 8802/3 就定义了 CSMA/CD 的标准^[19]。带碰撞检测的 CSMA 的思想就是用户在发送数据时一旦检测到碰撞发生，则立即停止当前发送的数据，并随机等待一段时间后重新尝试发送数据。从而为其他用户的传输节约了信道资源。CSMA/CD 控制方式的优点是网络中进行随机接入的各用户处于平等地位，不需要集中控制和优先级控制原理比较简单，技术上易实现。缺点在于当网络负载增大时，由于碰撞的概率增加，导致用户发送时延增加，系统效率将急剧下降。

3.3 树型多址协议

树形算法 (Tree Based Algorithms) 是针对 ALOHA 协议的不稳定性而提出的一种被广泛采用的冲突分解算法模型。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 3.3 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3-4是有5个站点冲突的完整搜索时序示意图。

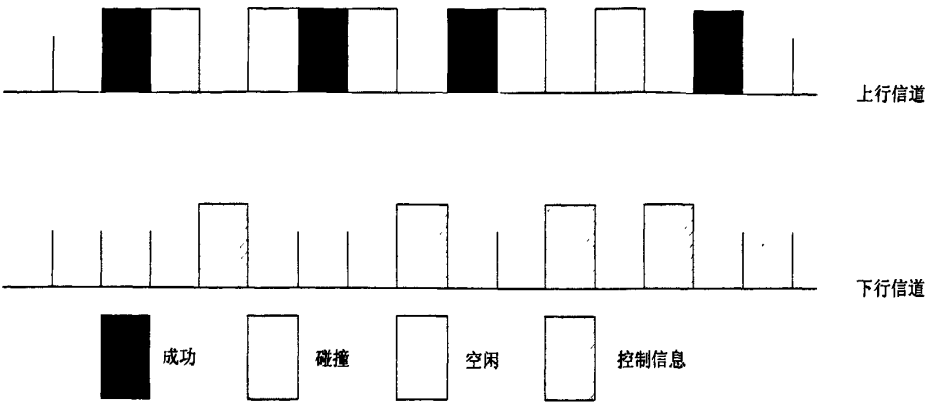


图3.3 树形算法信道时隙结构

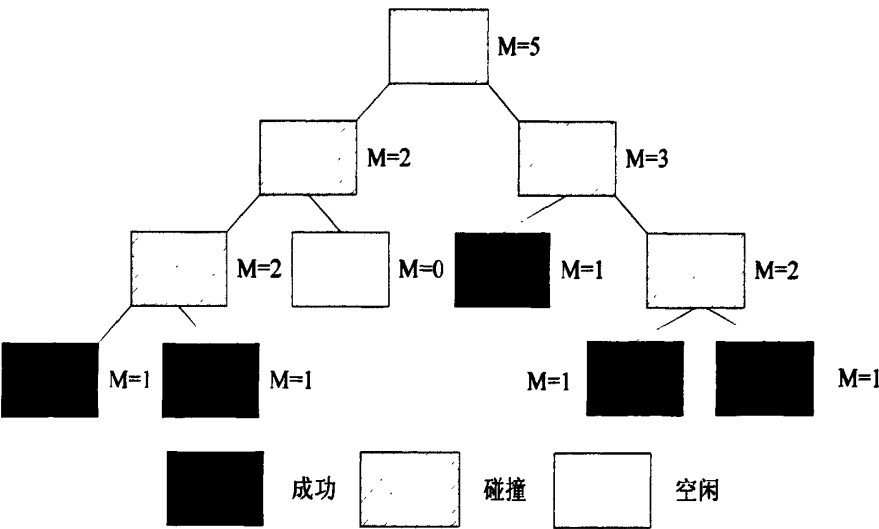


图3.4 5个用户冲突的树形算法分解图

树型算法的优点就是具有良好的稳定性。无论输入负载如何变化，系统总可保持一定的吞吐率。缺点在于由于用户发送数据的随机性，碰撞将导致分支数目的增加，延时增大。

3.4 预约时隙协议

预约时隙协议是为了在信道高负载情况下，更好地利用单个共享信道而提出的一种竞争多址接入协议，它按照时分多路复用的原理，对每个站点预定分配一个时间片，要允许它在相对应的时间片发送数据。预约时隙协议同时具有 ALOHA 和

TDMA 的优点,它要求连续的信息广播和不同站点之间具有良好的同步性,根据预约申请和释放的方法之不同有两种类型:直接预约和间接预约。

预约时隙 ALOHA 协议采用直接调度的方案。它的原理非常简单,包含了竞争和预约两个部分。因此,在时间上被分为两个阶段,竞争阶段和预约阶段。在竞争阶段,终端使用 ALOHA 协议进行竞争接入。预约阶段则包含了比较长的时隙。如果一个用户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。

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,eNode 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。

3.5 本章小结

本章主要介绍了几种常见的随机接入协议,包括 ALOHA、时隙 ALOHA、扩展 ALOHA、CSMA、树型多址协议、预约时隙 ALOHA 协议。并对以上协议进行了简单分析。ALOHA 类协议的特点是在负载较低时可以保持较好的系统性能,但是当负载较高时,系统的稳定性将得不到保障。CSMA 接入协议由于采用了监听机制,使其在信道利用率上比 ALOHA 类协议有很大的提高,但在系统延时方面其没有优势。树型多址协议解决了 ALOHA 类协议不能解决的公平性问题,虽然在系统吞吐率上具有一定优势,但由于其采用的分裂冲突的方法将导致系统复杂性增加。而预约时隙 ALOHA 协议同时具有 ALOHA 和 TDMA 的优点,在系统负载高时,性能突出。

第四章 LTE-Advanced 随机接入流程研究

3GPP关于LTE-Advanced随机接入流程的讨论，主要集中在随机接入的步骤，信令的大小和内容，采用的相关技术如HARQ是否使用。论文本章节将针对LTE-Advanced接入流程中由于前导码和信息部分的碰撞造成的重传时延问题进行研究。在对LTE的接入流程两种方案研究的基础上，根据eNode B对前导码和信息部分不同的检测情况采用不同的接入步骤，提出一种改进的随机接入流程方案，从而达到减小随机接入延时，满足LTE-Advanced提出的从IDLE状态到ACTIVE状态时延为50ms的需求目标。

4.1 随机接入前导码选择

在LTE-Advanced 随机接入过程中，对于一个 RACH 信号，其最少要包括一个签名序列，可用于标识随机接入尝试、时间校准和签名检测。RACH 信号还可以包含消息净荷，该消息净荷可以用于承载诸如资源请求、接入目的、路径损耗信息以及是否请求 C-RNTI（小区无线网络临时标识）等^[20]。随机接入突发的内容就是一个随机接入前导序列。如图 4.1 所示。

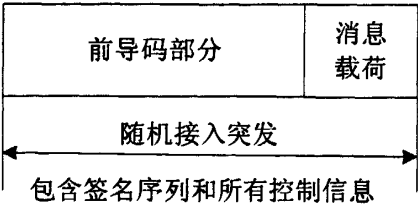


图 4.1 随机接入突发

在LTE-Advanced的随机接入过程中，为了提高前导信号的检测概率和降低用户接入网络的时间，要求用户的初始发送功率要大一些，具体的初始发送功率设定是在MAC层进行的，MAC层把初始发送的功率参数发送给物理层，由物理层进行前导信号的发送。另一个可以降低用户接入延时的有效方法就是当有多个用户在一个随机接入信道进行同时接入时，eNode B通过相关的检测算法正确快速地检测出这些用户的前导序列，并对发送前导的用户进行上行时钟调整。因此前导序列的设计一般需要遵循以下几条准则：

- ①良好的检测性能，包括较高的检测概率和较低的误解概率。

②为了利于小区的规划设计及保证足够低的用户碰撞概率需要足够多的序列数量。

③具有良好的相关特性，能够检测定时信息。

④序列具有较低的峰均比特性。

本文在此选用CAZAC序列作为LTE-Advanced系统的前导序列，CAZAC序列可以用如下公式表示：

$$c_k(n) = \begin{cases} \exp\left[\frac{j2\pi k}{L}\left(n + n\frac{n+1}{2}\right)\right] & L \text{ 为奇数} \\ \exp\left[\frac{j2\pi k}{L}\left(n + \frac{n^2}{2}\right)\right] & L \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (4-1)$$

CAZAC 序列具有如下特性：

- ①良好的自相关性（循环移位特性）。即对于任意 CAZAC 原始序列与其移动循环移动 n 位后所得的序列互不相关，自相关峰值尖锐；
- ②良好的互相关性，即互相关和部分相关值接近于零，便于接收端准确的把所需信号检测出来，并减小检测差错；
- ③横幅特性，即任意 CAZAC 序列的幅值恒定，这一特性可以保证相应带宽内的每个频点经历相同的激励，便于实现相干检测中的无偏估计；
- ④低峰均比（PAPR/CM）特性，即任意 CAZAC 序列组成的时域信号的峰值与其均值的比值较低，从而便于功率放大器的实现；
- ⑤任意 CAZAC 序列通过傅立叶变换/反傅立叶变换（FFT/IFFT）后仍然为 CAZAC 序列，具有 CAZAC 序列的所有性质。

4.2 LTE-Advanced 随机接入过程概述

随机接入（Random Access）是UE在开始与网络通信之前的接入过程，需要基站和终端的协作共同完成。基站的主要工作就是接收来自不同终端的前导信息和接入信息，终端的主要工作就是发送前导信息和随机接入信息。终端需要不断的发送前导直到收到基站的确认信息为止，在发送前导的过程中，终端需要定时增加发送功率来提高接入成功的可能性。基站对来自终端的在目标SIR（信号干扰比）门限以上的信号发送确认信息，目标SIR主要通过系统消息获得。进行一次前导码发送和对该前导码应答接收（或者接收失败）的整个接入尝试过程，包含了多次的接入试探。在每次接入试探中，移动台都发送前导码消息。每个接入试探序列的第一次试探总是采用与开环功率水平相应的功率水平进行发送，接下来的每一次试探，都采用比前一次高出一定量的功率水平进行发送。关于接入试探和接入试探序列的定

时，是基于接入信道时隙的概念的。每一个接入试探，都是在一个接入信道时隙的开始时发送。在接入信道上发送的有两类消息：一类是响应消息，这是对一条基站消息的响应；而另一类是请求消息（这是由移动台主动发送的）。对于不同类的消息（响应类或是请求类），发送时需要采用不同的过程。在LTE-Advanced系统中，随机接入的主要目的为：上行同步建立与唯一终端标识的建立，这里所谓的唯一标识是指C-RNTI。因此，随机接入不仅应用在初始接入中，同时也将应用在用户上行同步丢失的情况下。整个随机接入过程如图4.2所示。

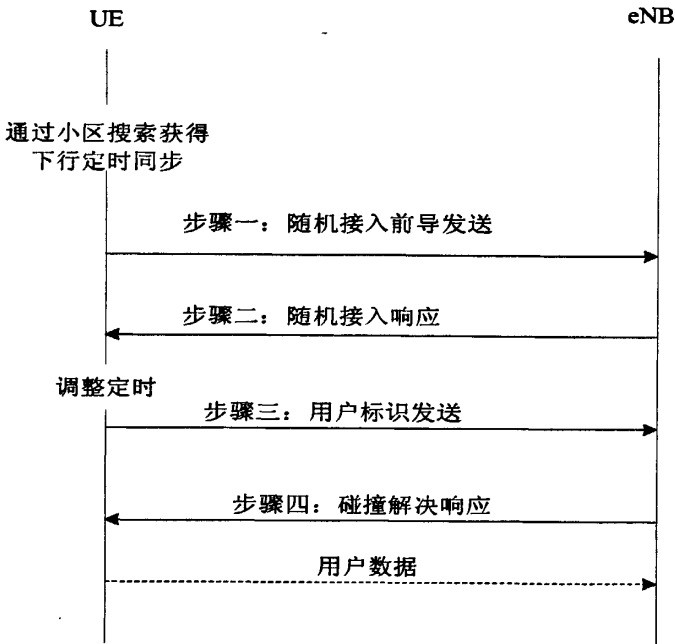


图 4.2 随机接入过程

- ①第一步包括随机接入前导的发送。从而使eNode B可以对传输定时进行估计。上行同步是必须的，否则终端将不能在上行链路发送任何数据。
- ②第二步网络根据第一步的定时测量，网络发送定时的提前命令从而调整终端传输定时。除了建立上行同步外，第二步还为终端分配上行资源，该资源将被随机接入过程的第三步所使用。
- ③第三步与正常的调度数据相似，终端会通过上行信道向网络发送移动终端标识。该信令的确切内容取决于终端的状态，部分取决于它之前是否已知该网络。
- ④第四步中网络通过下行信道向终端发送连接建立消息。该步还用于解决多个移动终端在随机接入信道中的资源竞争问题。

4.2.1 一步法和两步法随机接入流程方案

LTE-Advanced 随机接入分为两种类型：同步随机接入和非同步随机接入。当 UE 已经和系统取得上行同步时，UE 的随机接入过程称为同步随机接入。当 UE 尚

未和系统取得或丢失上行同步时, UE 的随机接入过程称为非同步随机接入。由于 UE 在进行非同步随机接入时, UE 需取得精确的上行同步, 因此非同步随机区别于同步接入的一个主要特点就是估计、调整 UE 上行发射时钟, 将同步误差控制在 CP 长度以内。也就是说, 非同步随机接入区别于同步随机接入的主要方面就是多了一个建立 eNode B 和 UE 上行同步的过程。

在 LTE 随机接入流程的讨论中, 曾出现了两种备选方案, 分别是“一步法”方案和“两步法”方案。3GPP 在对上述两种可能的非同步接入流程进行深入研究的基础上, 经过多次讨论, 决定在 LTE 中采用“一步法”接入。因为同步随机过程与非同步随机过程是类似的。因此下面的讨论将以非同步随机接入为例。

在“一步法”接入方案中, 接入流程只包含一个接入步骤。如图 4.3 所示, UE 首先发送一个接入前导, 在接入前导中携带消息载荷, 该消息载荷可用于承载资源请求(包括需要的资源数量)。然后, 当 eNode B 收到接入前导码后, eNode B 一次性地对 UE 的非同步随机接入尝试做出反馈, 包括 UE 上行时钟调整信息(供 UE 调整上行发送时钟), 以及上行数据和控制信令传输所用的资源分配信息。随后 UE 可以根据上行时钟调整信息和资源分配信息进行上行数据发送。而且, 根据 3GPP 的讨论, 上行时钟调整信息和上行资源数据分配信息也可能合并传输。可以说, 整个流程只包括一个上/下行往返步骤即可实现上行接入。

在“两步法”接入方案中, 接入步骤由两步完成, UE 首先发送随机接入前导, eNode B 反馈 UE 的上行时钟调整信息, 以及供 UE 发送上行调度请求的资源分配信息, 然后 UE 在指定的资源内发送调度请求。最后 eNode B 对 UE 的调度请求做出反馈, 为 UE 的上行数据发送分配资源, 这样 UE 就可以在分配的资源内开始上行数据发送。

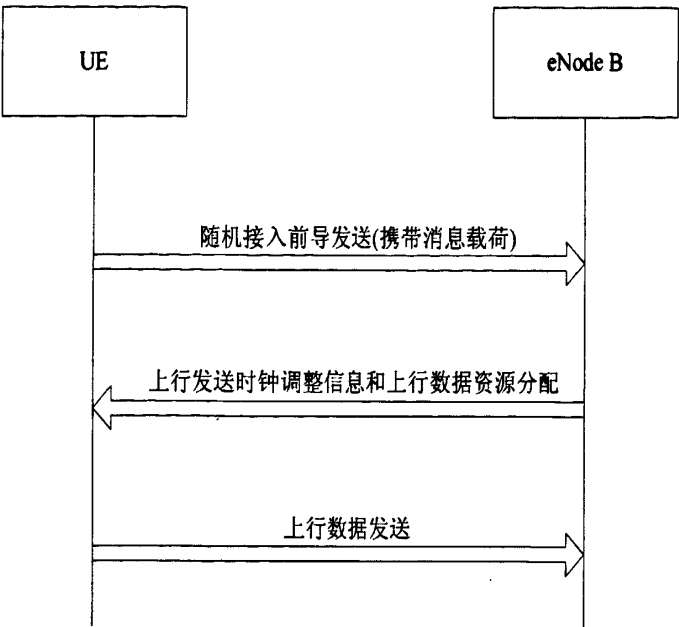


图 4.3 “一步法”随机接入流程

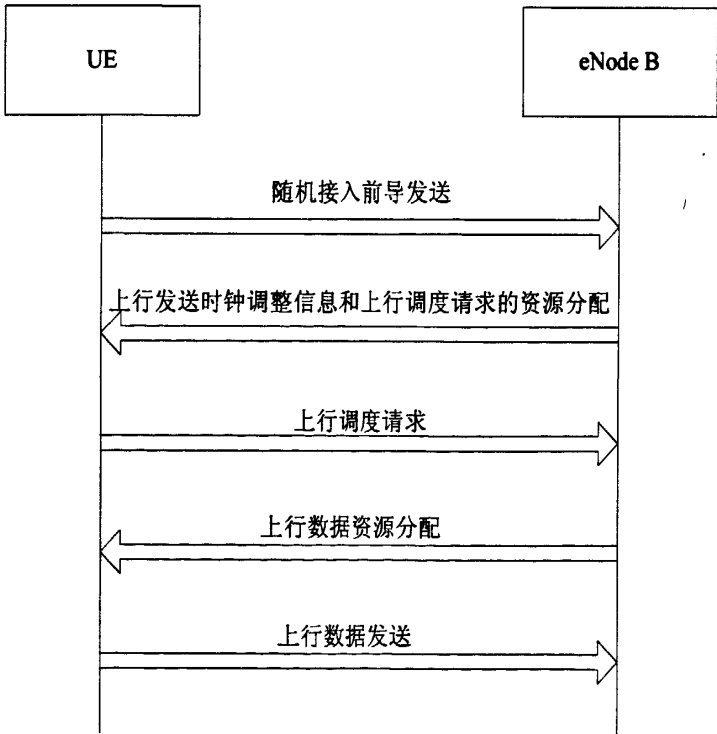


图 4.4 “两步法”随机接入流程

在 LTE 中使用 CAZAC 码作为随机接入的前导码。CAZAC 码具有良好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，但信息载荷部分的内容是不正交的。当信息载荷部分重叠在一起，eNode B 将无法识别信息载荷部分的内容。也就是说，在一步方案中，在多个 UE 同时接入

时, eNode B 将无法识别信息载荷部分的内容, 造成 UE 无法获得发送上行数据的资源, 因此 UE 必须进行退避重传前导码和信息载荷, 从而因重传问题造成了 UE 随机接入时延的增加。

一步方案和两步方案的区别在于, 前导码接入和资源请求是一步完成还是分两步完成, 前导码和信息部分是否一并传输。一步方案中前导码和信息部分都在竞争信道上进行接入。两步方案中, 前导码在竞争信道上进行接入, 而信息部分将随后在非竞争的信道资源上进行传输。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。

为了评估消息部分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:

- ①UE 随机选择一个时间频率资源。
- ②UE 随机选择一个前导码序列。
- ③UE 发送前导码。
- ④如果同时多个 UE 使用相同的时频资源进行传输, 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。

在一步方案中, 前导码和信息载荷部分一并在竞争信道上传输, 没有无谓的时延, 但是成功概率低, 增加因重传造成的时延, 进而影响了其在系统接入延时方面的性能。

在两步方案中, 前导码接入成功后才传输信息载荷部分, 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。

4.3 一种改进的随机接入流程方案

LTE-Advanced 作为 LTE 的平滑演进, 其接入过程与 LTE 类似, 但为了满足 LTE-Advanced 时延方面的特殊要求, 即从 IDLE 状态到 ACTIVE 状态时延为 50ms。本文针对接入流程中由于前导码和信息载荷部分的碰撞造成的重传时延增加问题, 提出了一种基于 LTE “一步法” 接入流程的改进方案, 以满足 LTE-Advanced 系统的时延需求。在改进的接入方案中, 首先执行与一步方案相同的步骤, 也就是同时发送前导码和信息载荷部分, 而随后的接入步骤则取决于 eNode B 对前导码和信息载荷部分的检测情况。如果前导码和信息部分被正确检测出来, 那么 eNode B 将利

用该信息通知 UE 上行时钟调整信息，以及上行数据和控制信令传输所用的资源分配信息。如果前导码被检测出来，但是信息部分发生了碰撞，那么 eNode B 将通知给 UE 上行时钟调整信息和用于资源请求的上行资源。UE 将随后重传资源请求（信息部分）分配在非竞争信道资源上。一个标识位和分配给 UE 的资源量可以同时用来决定信息部分是否被正确检测出来，如图 4.5 所示：



图 4.5 反馈信令格式

改进的接入方案的步骤如下图 4.6 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，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。

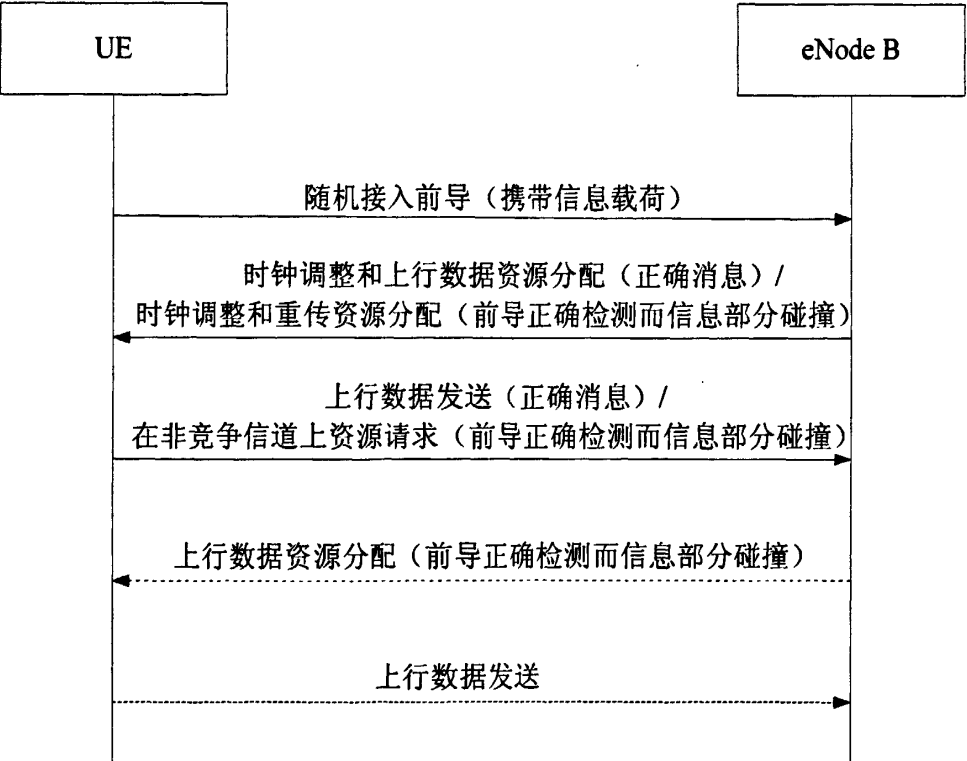


图 4.6 改进随机接入方案的流程图

4.3.1 改进方案仿真分析

为进一步分析改进方案的性能，可通过仿真的方法来进行评估，仿真设置如下：搭建 LTE-A 上下行仿真链路，随机接入带宽 1.4M，退避算法采用二进指数退避算法，初始窗口值为 2，最大重传次数 10，仿真次数 100 次。

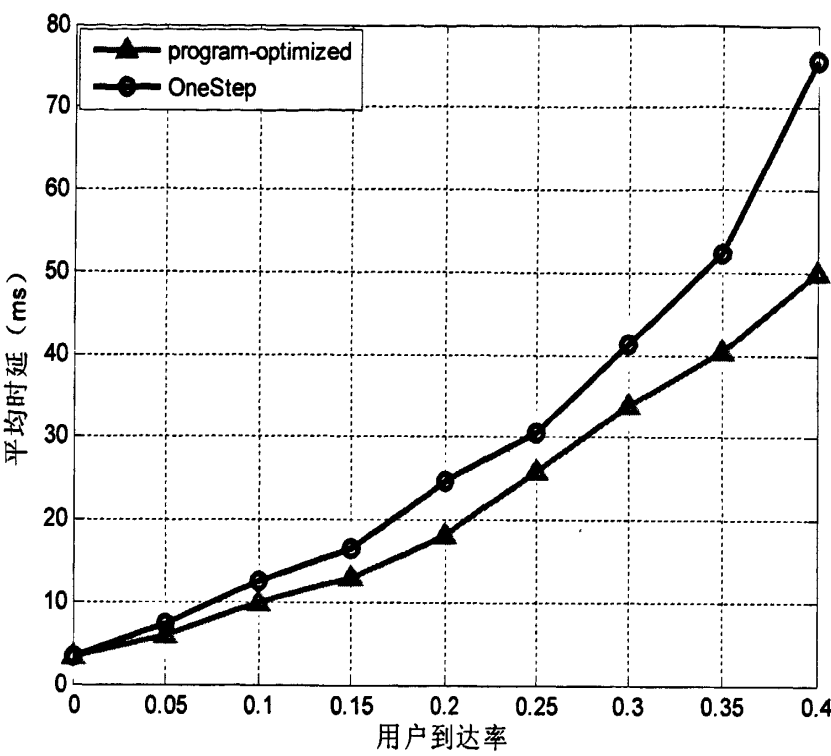


图 4.7 两种方案下 Idle 用户接入延时比较

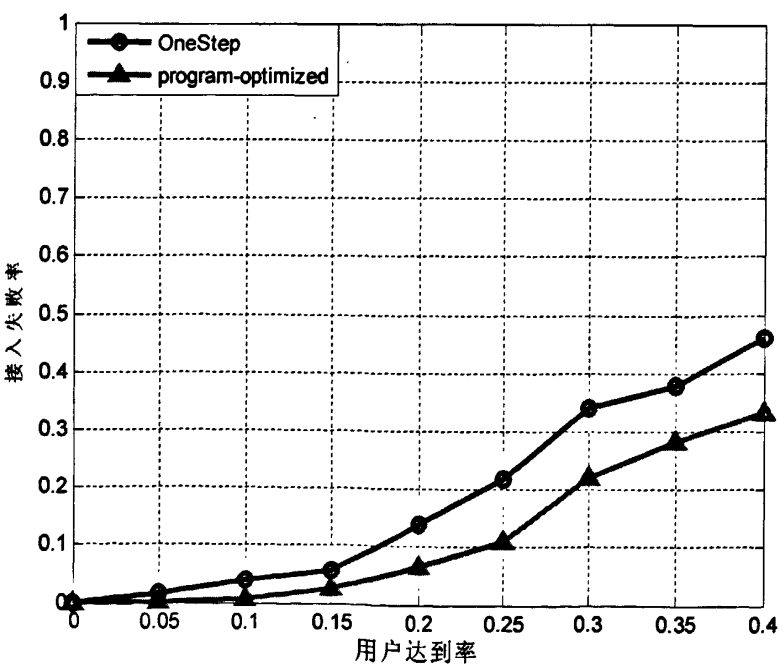


图 4.9 两种方案下 Idle 用户接入失败概率比较

由以上仿真图，我们可以得出以下结论：

①从平均时延来看,无论是在低负载还是高负载的情况下,改进方案的平均时延都要比一步方案的小,且满足 LTE-Advanced 从 IDLE 状态到 ACTIVE 状态时延为 50ms 的要求。

②从接入失败率来看,无论是在低负载还是高负载的情况下,改进方案传输的成功率都要比一步方案高,在负载比较小的区域 $[0, 0.2]$,改进方案的接入失败率保持在 0.1 以下。在负载比较大的区域,由于用户数的增多,接入用户之间碰撞的概率增大,当用户重传次数达到最大值,无法传输成功的用户将被丢弃,因此一步方案接入失败率达到了 40%。

4.4 本章小结

本章主要对 LTE-Advanced 随机接入中使用的前导码和接入流程进行了分析研究。在接入流程的研究中,提出了一种基于 LTE “一步法”接入流程的改进方案,该方案后通过在接入流程中增加一个反馈控制信令标识位来表示前导码和信息载荷部分在传输过程中的碰撞情况来决定后续的接入步骤,避免了不必要的重传时延,从而随机接入的平均时延和提高其随机接入的成功率,并通过仿真验证了此方案在 LTE-Advanced 的可行性。

第五章 LTE-Advanced 随机接入中的退避算法

退避算法是随机接入过程中的一个重要组成部分,是提高 UE 接入成功率和接入性能的一个有效手段。当多个用户在随机接入信道中使用相同的时频资源进行初始接入时,由于随机接入信道的资源的有限,将不可避免在随机接入信道中造成碰撞。为了数据的发送成功,用户端将等待一段时间再次进行数据重传。因此碰撞是导致系统性能下降的主要原因。根据 3GPP 的讨论,在 LTE-Advanced 系统的随机接入过程中,考虑采用基于 ALOHA 协议的退避算法。它的基本思想就是当碰撞发生时,在重传过程中,为了避免碰撞再次发生,需要一种机制来控制重传的时间及重传概率。在退避控制算法中,目前广泛使用的有均匀退避算法 UB (Uniform Backoff)、二进制指数退避算法 BEB (Binary Exponential 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^[22]。为了满足 LTE-Advanced 特殊的时延需求,本文提出一种基于贝叶斯准则的多信道改进退避算法,该算法利用贝叶斯准则对随机接入的用户数进行估计,同时利用多信道解决用户的碰撞问题,从而得到最大的传输概率,减小用户的随机接入延时。

5.1 随机接入退避算法

5.1.1 UB 算法

在 UB 算法中,当数据包在接入信道中传输产生碰撞后,需延迟一段时间之后再进行重传,延迟的时间称为退避延时。UE 算法中该退避延时的分布符合均匀分布,分布区间 $[1, B]$, B 为窗口的大小。UE 算法中 B 的值是固定不变的,与重传次数无关。UE 算法优点就是简单,缺点是无法实时地根据网络负载状况调整退避时延的大小。因此在 UB 退避算法中,当网络负载比较大的时候,将会导致碰撞概率增加,从而系统吞吐率下降用户接入延时增加,系统状态变得不稳定。

5.1.2 BEB 算法

在 BEB 算法中,退避时延的大小和重传次数密切相关。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 $[1, 2^{i-1} B]$ 。在 BEB 算法中,每个节点发生碰撞之后,碰撞用户的退避时延就会增加一倍,如果该用户在传输

过程中一直碰撞，它的退避时延将持续增加，经多次碰撞后退避时延达到最大值 B_{\max} ，如果用户成功传输，它的退避时延将减小到最小值 B_{\min} 。它可以用下列公式来表示：

$$\begin{cases} T \leftarrow \min(2T, B_{\max}), & \text{发生碰撞} \\ T \leftarrow B_{\min}, & \text{成功传输} \end{cases} \quad (5-1)$$

在式 5-1 中， T 表示退避时延， B_{\min} ， B_{\max} 分别表示最小退避时延和最大退避时延。在实际的系统运用中， B_{\min} ， B_{\max} 的值还可以根据网络中活跃节点数的可能范围和网络负载预先定义，如在以太网中 B_{\min} ， B_{\max} 的值通常定义为 2 和 1024^[23]。BEB 算法的优点是简单，执行效率高，目前已被广泛用于 MAC 层协议中。缺点就是公平性差，参与竞争的节点不能公平的使用信道资源。例如当有两个竞争节点在一个信道中同时竞争进行数据传输，当一个节点成功传输后，竞争成功节点的退避时延将减小到最小值 B_{\min} ，而竞争失败的节点由于碰撞传输失败，它的退避时延将增大一倍，在后续的竞争接入过程中，传输成功的节点由于退避时延短将以更大的几率重复使用信道传输数据，而传输失败的节点的时延将逐步增大到最大值。结果造成了传输成功的节点持续使用信道，而传输失败的节点一直处于等待重发的状态，接入的成功率一直很小。

5.1.3 GB 算法

在 GB 算法中，传输节点的随机接入不是由退避时间来决定，而是由概率来控制的。该算法的基本思想是每个节点进行竞争接入前，产生一个符合 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数，如果该随机数小于 q 就进行接入，随机数大于 q 进入等待状态。因此节点每次接入的概率为 q ，GB 算法的退避时延是符合参数为 q 的几何分布。

表 5.1 比较了这三种不同算法的均值、方差等统计情况。

表 5-1 不同退避算法的统计值

	UB	BEB	GB
$P\{B_i=k\}$	$\frac{1}{B}$	$\frac{1}{2^{i-1} B}$	$q(1-q)^{k-1}$
$E[B_i]$	$\frac{1+B}{2}$	$\frac{1+2^{i-1} B}{2}$	$\frac{1}{q}$
$Var(B_i)$	$\frac{B^2-1}{12}$	$\frac{4^{i-1} B^2-1}{12}$	$\frac{1-q}{q^2}$

5.1.4 MILD 算法

MILD 算法是为了针对 BEB 算法的不公平性问题而提出的一种新的退避算法。MILD 算法的基本思想就是无论传输成功或者传输失败的节点都有一个退避时延，退避窗口调节机制并不像 BEB 那样按照指数规律变化，而是采用如下的退避窗口调节机制：成功传输节点的退避时间减去 1，而碰撞节点的退避间隔为原来的 2 倍，并将已传输成功的节点的退避时间间隔值复制给下一个需要传输的节点，此时间间隔值与当地的网络负载情况有关。MILD 算法可以用如下公式表示：

$$\begin{cases} X \leftarrow \min(2X, B_{\max}) & \text{节点发生碰撞} \\ X \leftarrow X_{\text{packet}} & \text{节点监听到成功传输} \\ X \leftarrow \max(X - 1, B_{\min}) & \text{节点成功传输} \end{cases} \quad (5-2)$$

在式 5-2 中 X_{packet} 为监听到节点成功传输后的退避间隔值。MILD 算法退避时延的大小符合范围为 $[1, X]$ 的均匀分布。由于在该算法中采用了监听与拷贝的机制。如果节点监听到别的节点成功接入，那么就会拷贝该结点的退避时延 X_{packet} 。通过这种监听，拷贝的机制，MILD 算法相对于 BEB 算法在公平性方面有了很大的提高。

5.2 最优接入控制算法

最优接入控制算法是理想的接入控制算法，它能够达到最大的吞吐率和最小的时延，是其他退避算法性能的理论上限^[24]。在最优接入控制算法中，用户的接入概率是根据系统精确检测到的用户数来决定的，假设系统检测到的用户数为 N ，则接入概率为 $1/N$ ，在以退避窗口、概率控制重传时间为特点的一类冲突解决算法中，最优接入控制算法在吞吐率和平均时延方面所表现的性能是最佳的，可作为其他退避算法的参考。因为最优接入控制算法需要在基站端能准确的知道进行随机接入的用户数，而在现实中由于无线信道在传播过程中存在干扰并且用户接入的随机性，系统根本无法准确的知道发起接入的用户数，因此最优接入控制算法只能在理想的条件下实现。

5.2.1 系统模型

在最优接入控制算法中，假设系统采用的是单信道的时隙 ALOHA 协议，eNode B 能准确的知道进行随机接入的用户数。为便于分析，做如下假设：

- ①每个用户只有一个数据包发送。
- ②对于新包用户和重传用户不进行区分，并且 eNode B 能准确的知道每个时

隙进行尝试接入的用户数。

③每个尝试接入的用户以相同的概率进行数据包发送。

④新包用户的到达率符合均值为 λ 的泊松分布。

5.2.2 算法描述

假设系统采用的是 eNode B 控制的单信道系统，在接入过程中随机接入的用户使用时隙 ALOHA 协议进行随机竞争接入。在每个时隙，eNode B 能准确的知道每个时隙进行接入尝试的用户数 N ，每个用户在当前时隙都以相同的概率 P_e 进行接入，当多个用户在同一时隙进行接入时，就会发生碰撞，而碰撞的用户将与新到的用户在下一个时隙以相同的概率进行尝试接入。

5.2.3 最优控制接入算法性能分析

①吞吐率

根据以上分析，信道的吞吐率为成功传输的用户的概率，可表示为：

$$S = NP_e(1 - P_e)^{N-1} \quad (5-3)$$

从式 5-3 可以看出，当 $P_e = \frac{1}{N}$ 时， S 可以取得最大值：

$$S = (1 - \frac{1}{N})^{N-1} \quad (5-4)$$

从式 5-4 中可以看出， S 的值主要受到 N 的影响，当 N 趋向于无穷大时， S 的值为 e^{-1} ，这与在第三章中分析的时隙 ALOHA 的最大吞吐率理论值符合。同时也可以看出， N 值越大，接入的成功率越小，反之， N 越小，接入的成功率将越大。

从以上分析我们可以得出结论，当随机接入的用户以概率 $P_e = \frac{1}{N}$ 进行随机接入时，

系统可以达到最大的吞吐率。

②稳定性

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，系统吞吐率为常数 e^{-1} [28]。如公式 5-5 所示：

$$S = \begin{cases} \lambda & (\lambda < e^{-1}) \\ e^{-1} & (\lambda \geq e^{-1}) \end{cases} \quad (5-5)$$

当新包到达率 $\lambda < e^{-1}$ 时，系统处于稳定状态，平均时延为有限值，当 $\lambda \geq e^{-1}$ 时，系统吞吐率已达最大值 e^{-1} ，这个是系统的信道容量。由于新包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。由于新包到达率超过了信道容量，用户数的增加造成了碰撞的频繁发生，从而导致系统平均时延的增大。

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^[25];

当新包到达率 $\lambda \geq e^{-1}$ 的条件下, 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。

5.3 基于贝叶斯准则的一种改进退避算法

最优接入控制算法是一种理想化的退避接入算法, 它需要 eNode B 在每个发起接入的时隙能精确地知道尝试接入的用户数目, 但在实际系统中, 要想十分准确的知道每个时隙尝试接入的用户数是无法实现的。为了解决这一问题, 根据贝叶斯准则原理, 可以通过对信道状态的判断来估计接入用户的数目^[26]。

5.3.1 基于贝叶斯准则的信道状态描述

假设系统采用的是 eNode B 控制的单信道系统, 在接入过程中随机接入的用户使用时隙 ALOHA 协议进行随机竞争接入, 每个用户只进行一个数据包的发送, 当一个时隙开始时, 每个用户必须决定是传输数据包还是继续等待, 根据用户在信道中的状态, 可以把某个时隙的随机接入信道划分为三种状态:

K_1 : 信道处于空闲状态(此时信道中无用户进行传输);

K_2 : 信道处于成功传输状态(此时信道中只有一个用户进行传输);

K_3 : 信道中产生碰撞(此时信道中有多个用户进行传输);

在以贝叶斯估计为基础的退避算法中, 为了获得最优的吞吐率和最小的平均延时效果, 在每个时隙, 系统中的用户必须根据信道的状态来判断是进行数据发送还是处于等待状态, 对信道的状态的判断结果可以通过 eNode B 的检测来发送给每个用户, 当系统中的用户得知信道处于空闲状态时, 可以以概率 P_i 来决定是进行尝试接入还是继续等待。传输概率 P_i 可以由系统当前的负载量和信道状态计算得到。

假设某个时隙 t 进行随机接入的用户数 N_t 为 n , 传输概率为 P_i , 那么等待的概率为: $1 - P_i$ 。

则信道状态的概率可以表示为:

$$\begin{cases} P(K_1 | N_t = n) = A_p(n) = (1 - P_i)^n \\ P(K_2 | N_t = n) = B_p(n) = n \cdot P_i \cdot (1 - P_i)^{n-1} \\ P(K_3 | N_t = n) = C_p(n) = 1 - A_p(n) - B_p(n) \end{cases} \quad (5-6)$$

从式 5-6 可知, 当 $P_i = 1/N_t$ 时, 系统可以获得最大的传输成功率。同时从上式也可以看出, 为了获得准确的 P_i 值, 需要计算出当前时隙 t 系统中的用户数 N_t 。

这里, 我们假设用户数 N_t 服从均值为 v 的泊松分布, 可以表示为:

$$P_v(n) = \frac{v^n e^{-v}}{n!} \quad (5-7)$$

因此在 t 时刻, 结合式 5-6 和 5-7 信道状态的概率表示为:

$$\begin{cases} P_v(n)P(K_1|N_t=n) = e^{-vP_t} \bullet P_{v(1-P_t)}(n) \\ P_v(n)P(K_2|N_t=n) = vP_t \bullet e^{-vP_t} \bullet P_{v(1-P_t)}(n-1) \\ P_v(n)P(K_3|N_t=n) = \frac{v^n e^{-v}}{n!} (1 - A_{P_t}(n) - B_{P_t}(n)) \end{cases} \quad (5-8)$$

根据贝叶斯准则, 则在时刻 t 信道分别处于三种状态下的用户数概率 N_t 可以表示为:

$$\begin{cases} P(N_t=n|K_1) = P_{v(1-P_t)}(n) \\ P(N_t=n|K_2) = P_{v(1-P_t)}(n-1) \\ P(N_t=n|K_3) = \frac{\frac{v^n e^{-v}}{n!} (1 - A_{P_t}(n) - B_{P_t}(n))}{1 - e^{-vP_t} - vP_t \bullet e^{-vP_t}} \end{cases} \quad (5-9)$$

由式 5-9 可知, 在信道处于空闲状态时, 该时隙内的用户数服从均值为 $\max(v-1, 0)$ 泊松分布, 也就是说, 此时隙的接入用户数目比上一时隙的接入用户数目少 1。同理也可以得到在信道成功传输后, 此时隙的接入用户数目也比上一时隙的接入用户数目少 1。虽然在碰撞发生的情况下, 用户数的分布不是泊松分布, 但在这里将其近似的认为服从均值为 $v + (e-2)^{-1}$ 泊松分布, 即此时隙的接入用户数目比上一时隙的接入用户数目大 $(e-2)^{-1}$ 。

在基于贝叶斯估计的退避算法中, 为了求得 P_t 的值, 假设新包用户的到达数服从均值为 λ 泊松分布, 用 N_t 表示在 t 时隙利用贝叶斯准则估计的尝试接入用户数, 用 N_{t-1} 表示在 $t-1$ 时隙利用贝叶斯准则估计的尝试接入用户数, 根据以上的分析, N_t 与 N_{t-1} 的关系可以用下式表示:

$$\begin{cases} N_t = \max(\lambda, N_{t-1} + \lambda - 1) & \text{信道处于空闲} \\ N_t = \max(\lambda, N_{t-1} + \lambda - 1) & \text{信道处于成功传输} \\ N_t = N_{t-1} + \lambda + (e-2)^{-1} & \text{信道发生碰撞} \end{cases} \quad (5-10)$$

为了获得最优的吞吐率和最小的平均延时效果, 在 t 时隙, 进行随机接入尝试的用户数将以概率 $P_t = 1/N_t$ 进行数据发送, N_t 的值可由式 5-10 得到。下面将概率接入方式换算成窗口接入方式:

一个用户等待的平均时隙数为 W , 它是传输概率的倒数, 及 $W = 1/P_t$ 。按照窗

口接入方式，假设窗口的长度为 B ，用户在区间 $[1, B]$ 中随机地选择一个时隙进行传输，并且在此区间传输的概率服从均匀分布，其均值为 $B/2$ ，即 $W = B/2$ 。

则可以得到此时窗口的大小为： $B = 2 \bullet N_i$ 。

5.3.2 改进退避算法描述

在 LTE-Advanced 系统中，由于采用了具有非常好的自相关性与互相关性的序列作为随机接入前导序列，因此基站可以比较准确地检测出传播时延和使用的前导码，而且基站可以通过自相关运算检测出峰值的个数，从而可以得到发生碰撞包的个数^[27]。在改进算法中，把竞争接入的用户划分为两类，分为新发起接入的用户和在传输过程中发生碰撞需要重传的用户，同时把随机接入信道分为多个接入信道^[28]，其中一个信道作为主传信道，主要用于新发起接入的用户传输，其他多的个信道（重传信道）主要用于在传输在接入过程中发生碰撞需要重传的用户（包括在主传信道和重传信道上发生碰撞的用户），改进算法中随机接入信道的示意图如图 5.1 所示：

主传信道
重传信道1
重传信道2
重传信道3
重传信道4

图 5.1 改进算法信道结构

在改进算法中，假设可用的随机信道总数为 M ，则主传信道数为 1，重传信道数为 $M-1$ 。在主传信道上利用上一节提到的贝叶斯准则方法计算得到随机接入用户数 N_i ，从而进行随机接入尝试的用户以概率 $P_i = 1/N_i$ 进行传输，在重传信道上进行随机接入尝试的用户利用基站检测到得碰撞个数 n ，从而以概率 $p = \min(1, M - 1/n)$ 随机的选择一个重传信道进行传输。改进算法的流程图如图 5.2 所示。

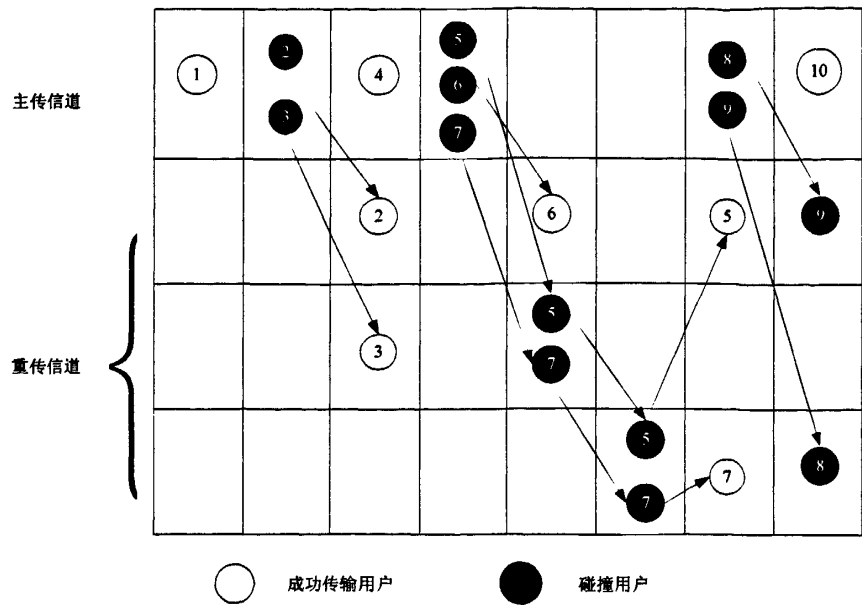


图 5.2 改进算法流程图

改进算法步骤:

①在某个时隙 t ，在主传信道上，准备进行随机接入尝试的新到用户根据利用贝叶斯准则计算得到传输概率 $P_t=1/N_t$ 进行传输。如果在该时隙内，在主传信道上只有一个用户进行随机接入尝试，则传输成功，如果该时隙内有多个用户进行随机接入尝试，那么用户在主传信道上将发生碰撞，发生碰撞的用户将在下一接入时隙随机的选择一个重传信道进行传输。

②在重传信道上，eNode B 通过对接受到前导进行自相关运算来检测峰值的个数，从而估计得到发生碰撞的前导个数 n ， n 值包括在主传信道和重传信道上发生碰撞的用户前导，eNode B 并把 n 值广播给需要重传的用户，从而碰撞重传的用户将随机选择一个重传信道以概率 $p=\min(1, M-1/n)$ 进行尝试接入。

③新到的用户和重传的用户将根据步骤一和步骤二的原理进行传输，直到传输成功为止。

改进算法的关键就是将接入信道分为一个主传信道和多个重传信道进行数据发送，在主传信道上利用贝叶斯准则对新到的接入用户数进行估计，从而得到最大的传输概率，在重传信道上利用基站对前导的检测估计得到碰撞用户数，从而以概率 $p=\min(1, M-1/n)$ 进行传输。这种多个信道划分的方法可以减少用户发生碰撞的概率，提高用户传输的成功率，减小接入用户的平均延时，从而改善系统的性能。

5.3.3 改进退避算法仿真分析

本节将对最常用的 BEB 算法和改进算法在性能方面与理想最优控制接入算法

做一些比较。

为进一步分析改进方案的性能，可通过仿真的方法来进行评估，仿真设置如下：信道划分为 1 个主传信道，3 个重传信道，每个接入带宽 1.4M，最大重传次数为 10，BEB 算法初始窗口为 2，仿真次数为 100 次。图 5.3 和图 5.4 分别显示了各种退避算法的吞吐率和时延比较。

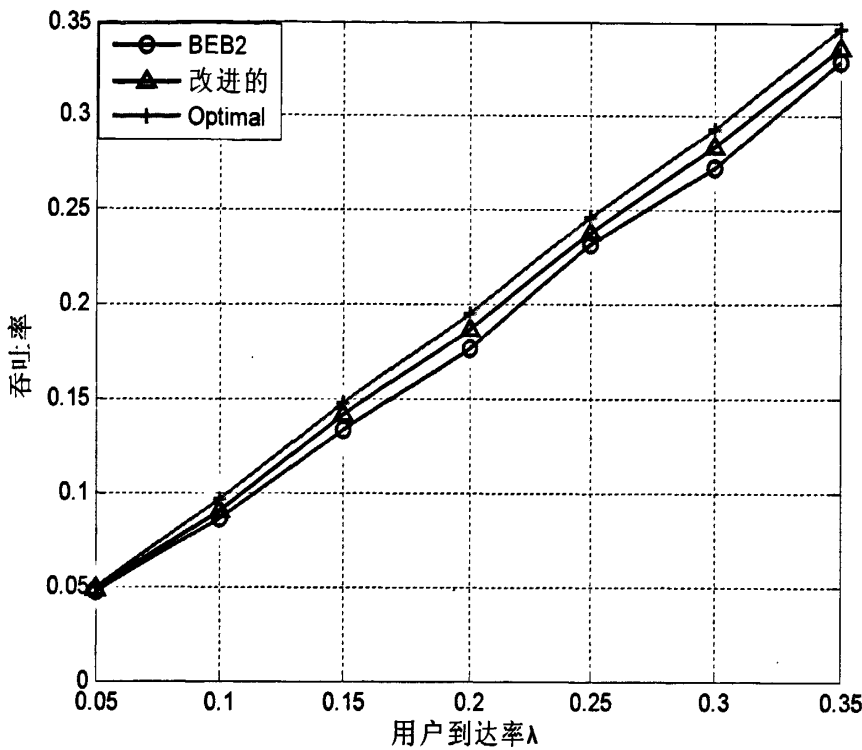


图 5.3 各种退避算法吞吐率比较

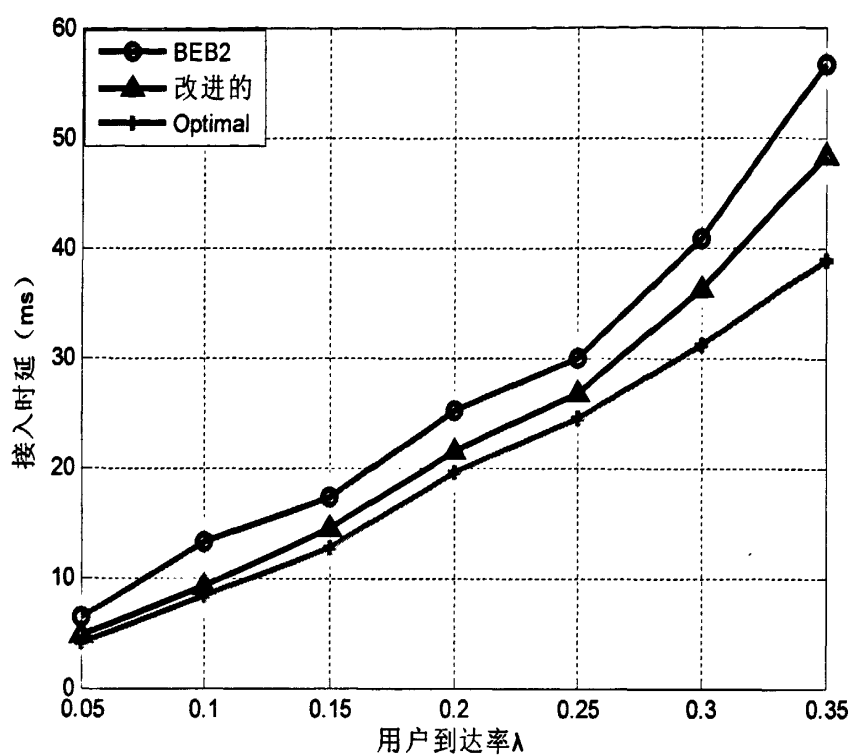


图 5.4 各种退避算法时延比较

从图 5.3 中可以看出，各种退避算法在吞吐率方面都可以取得较好的效果，在相同的用户到达率 λ 下，改进算法吞吐率几乎与最优控制接入法相等。但是在时延方面，从图 5.4 可以看出，不同算法的时延有明显的区别，在相同的用户到达率 λ 下，改进算法的时延更接近于理想的最优控制接入法，时延值要比 BEB2 算法的小。当 $\lambda < 0.3$ 时，改进算法在时延方面十分接近于最优控制接入算法，接入时延小于 7ms，但是当 $\lambda > 0.3$ 后，随着接入用户数的增多，用户之间碰撞的几率变大，改进算法变得不稳定，接入时延突然急剧增大。

5.3.4 LTE-Advanced 中退避算法的使用

根据 3GPP 的讨论，在 LTE-Advanced 中的退避算法采用的是中心控制的退避算法，退避参数由 eNode B 决定。UE 端使用窗口方式来重传前导码，其窗口的最小值固定，重传窗口的最大值作为退避参数由 eNode B 来通知。eNode B 在竞争随机接入的步骤 2 中将退避参数传递给 UE。其初始值设置为 0，即如果 eNode B 没有将退避参数传递给 UE，前导码将不做退避，在下一个有效的随机接入资源中传输。

用户是否发生碰撞由 eNode B 来检测，然后将检测结果通过竞争随机接入步

骤4传递给参与竞争的UE。如果UE在步骤4传递的信息中检测到与自己ID(RNTI)相符的ID信息,则认为接入成功,并继续进行下面的步骤。如果没有检测到ID或者检测到的ID与自己的不符合。则认为竞争失败,进行退避。为了对系统负载迅速地做出反应,及时调整退避参数适应负载变化,从而提高系统的性能。在LTE-Advanced中可以选择在竞争随机接入步骤2中而不是通过系统信息来传递退避参数。

为了满足LTE-Advanced随机接入过程时延尽量小的要求,在轻负载或非竞争随机接入过程,这种用户碰撞概率小或无碰撞的时候,不使用退避算法。也就是说,在LTE-Advanced中,退避算法只应用在负载高且用户使用竞争随机接入过程接入网络的情况下。

从图5.5可以看出当 $\lambda < 0.2$ 时,使用改进算法和不使用退避算法在吞吐率方面差别不大。但是随着负载的增加,改进算法的吞吐率一直处于递增状态,而不使用退避算法的吞吐率会随着负载量的增加而减少。而从图5.6中可以看出当 $\lambda < 0.25$ 时,使用改进算法和不使用退避算法在时延方面相差不大。但是随着负载的增加,不使用退避算法的时延会随之增加,当 $\lambda > 0.25$ 左右时,即高负载的情况下,因为系统无法解决冲突碰撞问题,由于重传次数的限制,一些一直没能成功接入网络的用户被丢弃,使得不使用退避算法的时延将会远远大于使用改进算法的时延。

因此在LTE-Advanced系统中,在低负载的情况下,不使用退避算法的接入时延和吞吐率与使用退避算法的时延和吞吐率差别不大,所以可以考虑为了尽量减少信令的开销可以不使用退避算法,而在高负载的情况下,使用退避算法可以使系统可以达到更好的性能效果。

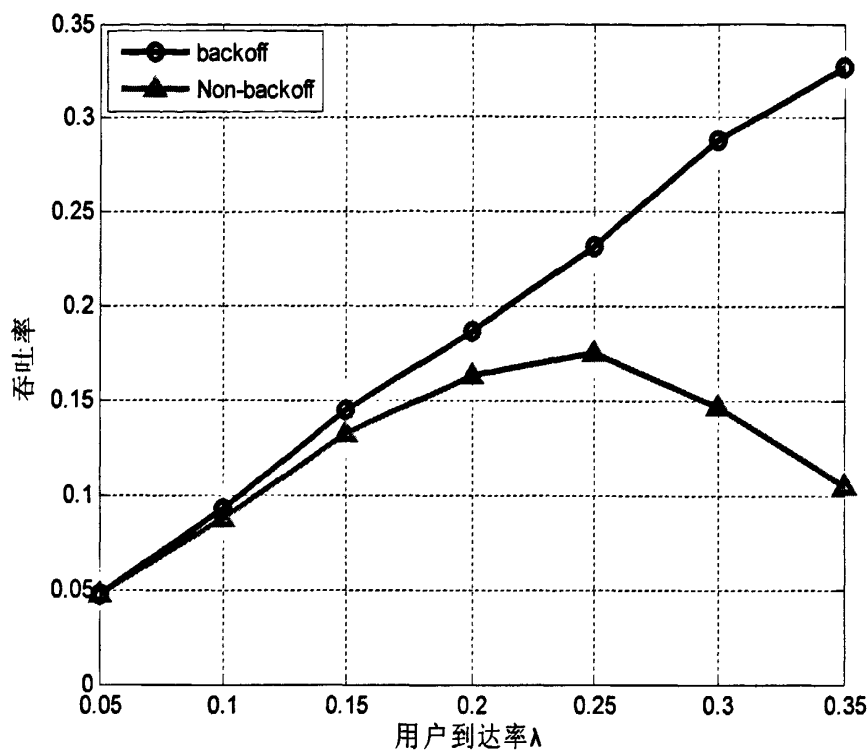


图 5.5 使用退避算法与不使用退避算法的吞吐率比较

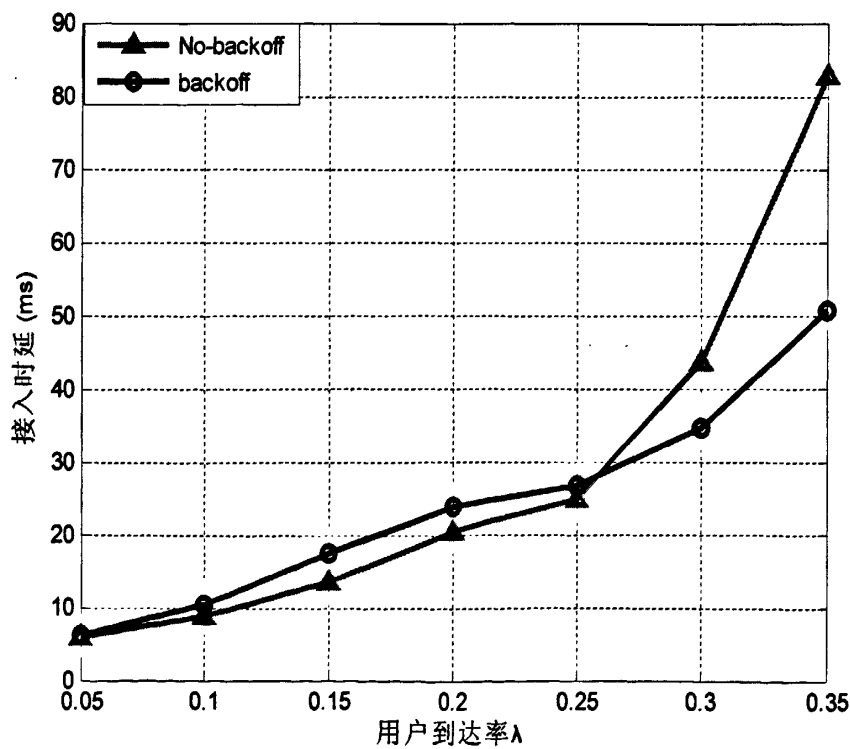


图 5.6 使用退避算法与不使用退避算法的时延比较

5.4 本章小结

本章重点研究了退避算法在 LTE-Advanced 中的应用。首先介绍了几种常用的退避算法 UB 退避算法、BEB 退避算法、GB 和 MILD 退避算法。接着对最优接入控制算法详细的分析,提出了一种利用贝叶斯原理进行信道状态估计的多信道退避算法,并通过仿真比较了上述几种算法的性能以验证改进算法的优越性。然后介绍了退避算法在 LTE-Advanced 中的应用方式和场景。在 LTE-Advanced 中,退避算法采用集中控制方式,退避参数由 eNB 传递给 UE。为了满足 LTE-Advanced 随机接入过程时延尽量小的要求,在轻负载或使用非竞争随机接入过程,这种接入用户碰撞概率小或无碰撞的时候,不使用退避算法。而在高负载的情况下,为了达到更好的系统性能使用退避算法。

第六章 结论与展望

LTE-Advanced 是 3GPP 为了满足 ITU IMT-Advanced(4G)的要求而推出的标准。3GPP 认为, LTE-Advanced 作为 LTE 的平滑演进, 并不需要改变 LTE 标准的核心, 而只需在 LTE 基础上采用一些关键技术, 如多载波聚合技术、中继技术、多点协作传输技术进行扩充、增强、完善, 就可以满足 IMT-Advanced 的要求。作为一项“4G”技术, LTE-Advanced 对系统速率和时延有较高的要求和目标。而随机接入过程是影响 LTE-Advanced 系统吞吐率和时延的主要方面之一。

6.1 论文总结

随机接入过程是一个基于竞争的接入过程, 当多个用户在同一信道中竞争使用同一时频资源进行尝试接入时, 就有可能发生碰撞。而碰撞是导致系统性能下降的主要原因。在 LTE-Advanced 系统中, 随机接入主要应用于: 用户空闲模式下的随机接入、无线链路故障后的随机接入、小区切换中的随机接入、上行同步丢失的随机接入与上行同步的随机接入。LTE-Advanced 的随机接入一直是 3GPP 讨论的热点之一, 讨论的焦点主要是随机接入信道, 随机接入流程, 随机接入过程中的信令内容与格式。本文根据 LTE-Advanced 的讨论进展, 对 LTE-Advanced 的随机接入过程的部分内容进行了研究, 取得了一些成果。本文的主要工作内容和成果总结如下:

①在论文的第一章, 对 LTE-Advanced 的背景, 进展及采用的关键技术进行了概述, 并根据 LTE-Advanced 中的随机接入发展现状, 研究热点进行了简单分析, 提出了论文的研究方向与内容。

②在论文的第二章, 总结了 LTE-Advanced 随机接入的功能, 随机接入信道的时频结构与复用方式, 随机接入的使用场景与接入过程, 并对 LTE-Advanced 中关于用户检测的使用方法进行了总结。

③在论文的第三章, 对随机接入过程中的基于竞争的多址协议的特点进行了分析总结, 主要包括: ALOHA 协议, CMSA 协议, 树形多址协议和预约时隙协议。

④在论文的第四章, 分析 LTE-Advanced 的随机接入过程与前导码的选择。重点研究 LTE-Advanced 随机接入过程中的随机接入流程, 针对前导码和信息载荷部分的碰撞从而造成的重传时延问题, 提出一种基于 LTE “一步法”接入流程的改进方案, 该方案首先执行前导码与信息载荷部分的发送, 然后通过接入流程中

增加一个反馈控制信令来表示前导码和信息载荷部分在传输过程中的碰撞情况来决定后续的接入步骤,避免了不必要的重传时延,从而减少 UE 随机接入的平均时延和提高其随机接入的成功率,最后通过仿真分析了改进方案在 LTE-Advanced 系统中的可行性。

⑤在论文的第五章,对现有的随机接入过程中的退避算法进行了分析,针对多用户的碰撞问题对现有的算法进行了改进,提出了一种基于贝叶斯准则的多信道改进退避算法。该退避算法通过把接入信道划分为一个主传信道和多个重传信道,在主传信道中利用贝叶斯原理进行随机接入用户数估计,在重传信道中利用前导序列良好的自相关性和互相关性及基站检测得到的碰撞用户数,从而得到最大的用户传输速率。最后通过仿真验证了该算法在吞吐量与时延方面所表现的良好性能,及分析了该退避算法在 LTE-Advanced 系统中的不同应用场景。

6.2 展望

目前,3GPP 关于 LTE-Advanced 随机接入的研究尚处于讨论阶段。具体的标准要到 2011 年初才有结论。由于时间有限,本文只研究了 LTE-Advanced 随机接入流程与退避算法的内容,尚有其他的相关内容未能深入研究,例如在随机接入过程中采用数字信号处理技术与根据负载的情况不同采用接纳控制办法进行处理。

随机接入过程是移动通信系统中 UE 与网络建立连接,进行通信的首要步骤。随机接入过程的优劣将直接关系到系统性能的好坏。随着无线通信技术的快速发展,新的系统需求与目标将对现有的技术提出挑战,如何优化现有的随机接入技术,将是下一步的工作重点。

参考文献

- [1] 沈嘉. LTE-Advanced关键技术演进趋势[J]. 移动通信 2008 (8) .
- [2] 林辉. LTE-Advanced 的标准化情况[J]. 电信科学 2009 (1) .
- [3] 3GPP TR 36.913. "Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)" .
- [4] 曹亘, 张欣. LTE-Advanced 系统中的多载波聚合技术[J]. 现代电信 2009 (2) .
- [5] 沈嘉. LTE-Advanced: 3GPP 向 IMT-Advanced 演进[J]. Technology & Application 技术应用 2009 (3) .
- [6] 3GPP TSG-RAN RP-040502. "Proposal for the RAN Evolution process" .
- [7] 3GPP TR 25.814. "Physical Layer Aspects for Evolved UTRA" .
- [8] 3GPP TSG-RAN R2-070645, "RACH access Procedure(s) in E-UTRAN.
- [9] Romain Masson. E-UTRA RACH within the LTE system[D]. Stockholm.Sweden 2006.
- [10] 3GPP TSG-RAN R2-052799. "Initial cell access in LTE" .
- [11] 3GPP TR 25.814.V7.1.0. Physical layer aspcts for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) . pp. 82-88.
- [12] 3GPP TS 36.321.v8.4.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA).Medium Access Control (MAC) protocol specification. pp. 8-16.
- [13] 王继高. 基于移动通信系统随机接入过程的研究: [工学硕士论文]. 南京: 南京理工大学. 2006.
- [14] 3GPP R1-061317. Samsung. Random access message transmission. 3GPP RAN WG1 Meeting #45. Shanghai, China. 2006-05-08.
- [15] 3GPP R1-060531. LG Electronics. Some considerations for LTE RACH. 3GPP RAN WG1 Meeting#44 Denver. USA. 2006-02-13.
- [16] 肖瑶, 周宗仪. 随机接入协议:研究综述[J]. 通信技术 2003 (1) :60-63.
- [17] 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.
- [18] 郑碧月, 赵广金. 姜辉扩展 ALOHA 随机多址通信技术.信息技术 2002(4).10-13.
- [19] TS HO.KC Chen. Performance analysis of IEEE802.11 CSMA/CA medium access control protoeol. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 1996.
- [20] 3GPP TSG-RAN. RZ-070891. Panasonic. Random Access Preamble signatures usage.

- [21] 3GPP R1-050672. Fujitsu. "Considerations of CAZAC Reference-Signal for E-UTRA Uplink" .
- [22] SONGN. KWAK B.SONG J.et al. Enhancement of IEEE802.11distributed coordination function with exponential increase exponential decrease backoff algorithm. Proceedings of IEEE VTC 2003. Orlando. Florida. USA. October 2003 .pp .2775-2778.
- [23] M.Natkaniec and A.R.Pach.Analysis of the backoff mechanism used in IEEE802.11networks. Proceedings of fifth IEEE symposium on Computers and Communications. Antibes Juan les Pins.France. July.2000. pp.444-449.
- [24] Y.C.Jenq. "Optimal retransmission control of slotted ALOHA systems" IEEE Trans.Communic. vol.COM-29. Jun.1981. pp.891-895.
- [25] Zygmunt J.Haas, JingDeng."On Optimizing the Backoff Interval for Random Access Schemes" .
- [26] Rivest. Network control by Bayesian broadcast[J]. IEEE Transactions on Information Theory. 1987.5.33(3):323-328.
- [27] 3GPP TSG-RAN.R2-071316. Siemens Networks. RACH back-off control
- [28] L.Kleinrock, S.S.Lam. "Packet Switching in a Multiaccess Broadcast. Channel: Performance Evaluation" . IEEE Trans. Commun. VOL.COM-23.NO.4.Apr.1975. pp .410-422.
- [29] 3GPP TSG-RAN. R2-074455. Motorola. Backoff for the First RACH Transmission.

致 谢

三年紧张而充实的研究生生涯即将结束，这段时光值得我留恋和回忆。因为这些日子里，我的每一点成长和收获都得益于老师及同学的帮助。

首先，衷心地感谢我的导师王琼老师，在王老师门下学习是我的幸运。她渊博的知识、深厚的学术造诣和严谨的治学精神及宽和诚恳的待人态度给我留下了深刻的印象。正是她的谆谆教诲，悉心指导，使我在课题研究过程中，培养了独立思考和求实创新的能力，也巩固加深了对专业知识的认识。这些为我今后的工作和生活打下了良好基础，使我受益匪浅。同时，感谢王似旭、董伟杰师兄引领我进入课题：感谢 C6310 项目组的唐靓、陈扬、赵伟杰、李静、刘欣、陈野等同学，每次探讨，都会使我对项目和课题有进一步的认识，每次合作，都会帮助我解决诸多所遇到的研究困难。还要感谢郭学文、陈娜、张敏、孟杰、王占秋、魏垚及实验室的其他同学给予我的热情帮助和卓有成效的交流。

感谢在重邮所有我所认识或认识我而没能提及的师长、同学和朋友，谢谢你们对我日常学习和生活大大小小常常让我倍感温暖的关心和帮助。特别感谢负责 07 级通信研究生日常工作的阎英老师对我各方面的关心和帮助。还要尤其感谢我的父母，是你们无时无刻从不倦怠的细致关怀和言传身教润物无声的培养、支持和鼓励才使我顺利成长，步履坚实和快乐的来到今天，走向明天。

附 录

攻读硕士学位期间从事的科研工作:

①从事的科研工作:参与信科公司 ASIC 部门芯片验证工作

②完成的学术论文: RFID 技术在手机支付领域中的应用, 电子测试, 2009(6)。 (已见刊)

作者：[施涛](#)
学位授予单位：[重庆邮电大学](#)

本文读者也读过(10条)

1. [戴翠琴, 蔚承英](#) 3GPP LTE系统随机接入过程研究[期刊论文]-[数字通信](#)2010, 37(6)
2. [杨亚西](#) 多层交织分复用空时编码系统分析和性能研究[学位论文]2010
3. [姜华](#) GSM和TD-SCDMA切换机制的研究[学位论文]2010
4. [王占秋](#) TD-SCDMA/GSM双模终端系统间测量的研究是实现[学位论文]2010
5. [屈刚](#) 抑制小区间干扰的自适应预编码研究[学位论文]2010
6. [李剑](#) LTE-TDD终端连接模式研究[学位论文]2010
7. [谭锋](#) EPON系统中OAM协议研究与开发[学位论文]2010
8. [周亮](#) HSPA+系统中增强随机接入过程分析[期刊论文]-[广东通信技术](#)2010, 30(10)
9. [魏垚](#) LTE-TDD终端协议无线链路控制子层的研究与实现[学位论文]2010
10. [江帆, 范九伦, JIANG Fan, FAN Jiu-lun](#) 中继蜂窝网络中增强型随机接入算法[期刊论文]-[无线电通信技术](#)2011, 37(3)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1989251.aspx