

摘要

随着全球通信产业的飞速发展及用户需求的日益增长,为了实现更低的延迟、更高的用户数据率、更大的系统容量、更广的覆盖和更低的成本,3GPP开始了对长期演进(LTE)系统的研究和标准化的工作。本文基于国家科技重大专项“TD-LTE无线综合测试仪表开发”的科研背景,重点研究了TD-LTE网络端MAC层数据传输流程,并结合Telelogic Tau公司提供的SDL平台对LTE网络端MAC层连接模式进行了设计与实现。

本文首先介绍TD-LTE的研究背景和技术指标,简要阐述了LTE系统接入网的优越性。其次从LTE无线接口协议栈的角度对各层的功能和架构进行描述,MAC子层作为LTE协议栈的重要组成部分,其MAC PDU格式的正确处理与数据传输纠错能力是影响系统性能的重要因素。

然后通过对3GPP协议与相关文档的研究,详细分析了网络端MAC层的功能、数据处理过程及调度等过程。网络端MAC层协议流程大致分为三个过程:调度系统信息、随机接入过程、数据传输与纠错。对应于状态划分可以分成四个子状态:空状态(NULL)、空闲状态(IDLE)、接入状态(ACC)与连接状态(CON)。根据MAC层与PHY层、RLC层、RRC层之间的联系,本文设计了网络端MAC层的层间接口原语和相关参数,并在状态跃迁转移图及跃迁条件的基础上设计了MAC层连接状态下的上下行数据传输的正常过程、重建、MAC PDU处理及异常处理流程MSC图。

最后,为了验证设计方案的合理性与可行性,本文对网络端MAC层进行了SDL实现,针对Telelogic Tau公司提供的产品TTCN suites详细构造TTCN典型测试例。通过TTCN与SDL协仿真,将仿真得到的信号流图与设计阶段设计的信号流图进行比较,发现两者信号交互一致,TTCN产生的MSC图中的数据与预期设置的一致。初步验证了软件设计的正确性,仿真结果达到了预期的目的,并对下一阶段研究工作的进行了阐述。

关键词: TD-LTE, 媒介接入控制, 混合自动重传请求, 调度, 消息序列图

Abstract

With the rapid development of communications industry and the growing demand by the user up, in order to achieve lower latency, higher user data rates, greater system capacity, wider coverage and lower costs, 3GPP started the research and standardization work of Long-term Evolution (LTE) system. Based on national science and technology major projects “TD-LTE Wireless Integrated Test Instrument Development” scientific background, the paper especially studied the realization of MAC data transmission process on TD-LTE network side, designed and implemented the MAC layer connection state under SDL platform provided by Telelogic Tau.

The paper introduced the research background and technical capacity of TD-LTE, briefly introduced the advantages of LTE radio access systems in the beginning. Secondly, This article described the structure and function of LTE radio interface protocol stack. MAC layer protocol is an important component of LTE, and its data transmission capacity and MAC PDU format correctly handle plays an important role in system performance.

Then according to 3GPP protocol and related technical documents, detailed analysis of the network side MAC layer functions, data processing and scheduling process. MAC layer protocol for network-side process can be divided into three processes: scheduling system information, random access process, data transmission and error correction. Corresponds to the state can be divided into four sub-state: NULL state (NUL), Idle state (IDLE), Access status (ACC) and Connection state (CON). According to the relationship between MAC layer and other layers, the paper designed the interface primitives and related parameters between MAC layer and other layers, designed the normal process of data transfer, RRCConnectionReestablishment, MAC PDU processing and exception handling MSC diagram based on the the state transition diagram and transition conditions design of the MAC layer.

Finally, in order to verify the design of the rationality and feasibility, the paper realized MAC_CON state on LTE network side and constructed TTCN test cases based on TTCN Suites Details provided by Telelogic Tau. By comparing the signal flow diagram created by simulation and the previous design chart, it was found that the signals interaction is identical, the data of MSC generated by TTCN is also consistent with our expectations, preliminary verified the correctness of software design, and showing that

simulation results had achieve the desired results, In the end the future research directions are described.

Key words: TD-LTE, MAC, HARQ, scheduling, MSC

缩略表

3GPP	3 rd Generation Partnership Project	第 3 代合作伙伴计划
BCCH	Broadcast Control Channel	广播控制信道
BCH	Broadcast Channel	广播信道
BSR	Buffer Status Reports	缓存状态报告
CCCH	Common Control Channel	公共控制信道
CRC	Cyclic Redundancy Check	循环冗余校验
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identity	小区无线网络临时标识
CQI	Channel Quality Indicator	信道服务质量
DCCH	Dedicated Control Channel	专用控制信道
DL-SCH	Downlink Shared Channel	下行共享信道
DRX	Discontinuous Reception	非连续接收
DTCH	Dedicated Traffic Channel	专用业务信道
eNB	E-UTRAN NodeB	演进型 NodeB
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network	演进型陆地无线接入网
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FSM	Finite State Machine	有限状态机
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	混合自动重传请求
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	电气和电子工程师学会
ITU	International Telecommunications Union	国际电信联盟
IUT	Implementation Under Test	被测实体
L3	Layer3	第三层（网络层）
LTE	Long Term Evolution	长期演进
MAC	Medium Access Control	媒介接入控制
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service	多播和广播业务
MCCH	Multicast Control Channel	多播控制信道
MCH	Multicast Channel	多播信道
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制编码方式
MO	Mobile Originated	移动台发起
MSC	Message Sequence Charts	消息序列图

NDI	New Data Indicator	新数据指示
NAS	Non-Access Stratum	非接入层
PCCH	Paging Control Channel	寻呼控制信道
PCH	Paging Channel	寻呼信道
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PDU	Protocol Data Unit	协议数据单元
PHY	Physical layer	物理层
PRACH	Physical Random Access Channel	物理随机接入信道
QoS	Quality of Service	服务质量
RACH	Random Access Channel	随机接入信道
RAR	Random Access Response	随机接入响应
RA-RNTI	Random Access RNTI	随机接入 RNTI
RLC	Radio Link Control	无线链路控制
RNTI	Radio Network Temporary Identifier	无线网络临时标识
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制
RV	Redundancy Version	冗余版本
SAE	System Architecture Evolution	系统架构演进
SAP	Service Access Point	业务接入点
SDL	Specification Description Language	规范描述语言
SDU	Service Data Unit	服务数据单元
SI	System Information	系统信息
SRB	Signalling Radio Bearer	信令无线承载
TB	Transport Block	传输块
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TD-SCDMA	Time Division Synchronous CDMA	时分同步码分多址
TTCN	Tree and Tabular Combined Notation	树表结合表示法
TTI	Transmission Time Interval	传输时间间隔
UE	User Equipment	用户设备
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	通用移动通信系统
UL-SCH	Uplink Shared Channel	下行共享信道
VoIP	Voice over Internet Phone	网络语音电话业务
WCDMA	Wideband CDMA	宽带码分多址
WiMAX	World Interoperability for Microwave Access	全球微波接入互操作

第一章 绪论

1.1 研究背景

2004年，基于OFDM技术的WiMAX标准的横空出世与迅速崛起，为了应对WiMAX标准的市场竞争，保证3GPP在国际移动通信标准领域的竞争力，3GPP开始了UMTS技术的长期演进项目^[1]。UMTS演进包括SAE和无线接口的长期演进LTE。LTE作为高速分组接入（HSPA、HSPDA和HSUPA统称）与IMT-Advanced之间的过渡技术，因为采用了OFDM/FDMA等具有4G通信技术特征的关键技术^[2]，它与UMB、WiMAX、IEEE的802.20移动宽带频分双工/移动宽带时分双工等技术被业内人士称为“3.9G”或“准4G”技术。在LTE无线接入网结构方面，为了降低用户面延迟，LTE系统取消了重要的网元——无线网络控制器RNC^[3]。在E-UTRAN网络中，eNodeB使用S1接口直接连接到核心网络，因此RNC支持的功能分别由eNodeB、核心网络MME或服务网关S-GW等实体来实现。如图1.1所示，UTRAN与E-UTRAN网络的总体架构示意图。

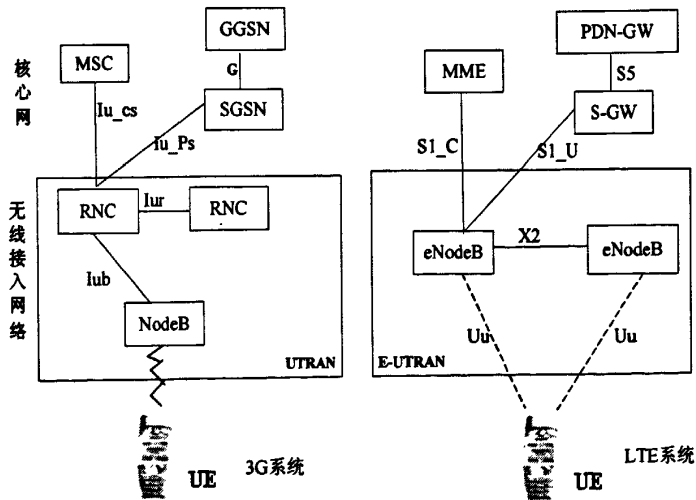


图 1.1 UTRAN 与 E-UTRAN 接入技术的比较

1.2 LTE 关键技术

据Pyramid Research公司调查，LTE将以前所未有的速度在全球范围内部署，2010年到2014年，全球范围内LTE用户数将以400%的速度增长^[4]。截至2009年11月，华为与全球顶级运营商部署的LTE商用网络和试验网已经超过25个，在各

种标准组织中贡献了超过 3300 篇 LTE/SAE 标准提案,与业界分享在 LTE 专利方面取得的领先成就^[5]。这些关键的里程碑大大地推进了 LTE 产业的进步与成熟,促进 LTE 价值链上的生态环境日益和谐繁盛,最终必将推动人们沟通和生活方式的进步。虽然大部分早期 LTE 用户都在美国、日本等发达地区,但据调查公司预测,这项技术在以中国为首的新兴市场中也将赢来爆炸性增长^[6]。目前欧洲、北美和亚洲的 LTE 网络正在积极部署之中。

LTE 系统网络能提供的技术指标^[7]:

- 显著提高峰值数据率:上行 50Mbit/s,下行 100Mbit/s;
- 提高小区边缘的比特率;
- 支持 1.4MHz-20MHz 带宽;
- 用户面延迟(单向)小于 5ms,控制面延迟小于 100ms;
- 支持与现有 3GPP 和非 3GPP 系统的互操作性;
- 支持增强型的广播多播业务;
- 将系统和终端的复杂度、成本和耗电控制在合理的水平;
- 有效支持各种业务,尤其是 PS 域业务(如 VoIP),追求后向兼容性;
- 支持对称和非对称频谱中的操作。

目前,绝大部分企业及研发机构对 LTE 的研究与开发工作主要是基于 3GPP 所制定的协议而进行的,随着协议规范的逐步完善与冻结,3GPP 于 2008 年 3 月开始 LTE 演进系统 LTE-Advanced 的协议制定和研究工作。

1.3 LTE 选题及结构

2008 年,为了推动我国移动通信事业的跨越式发展,提升在该领域的竞争力和创新力,国家启动了“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项。在专项中除进一步支持我国自主标准 TD-SCDMA 的发展之外,其下一代演进 LTE-TDD 的研发和产业化也是专项支持的重要内容之一。在整个 LTE 产业链中,除了基站、终端、基带芯片、天线外,测试仪表的开发也有着非常重要的意义。本课题在重大专项的子项目“TD-LTE 无线综合测试仪表开发”的支撑下,主要研究协议栈 MAC 子层连接模式的传输技术,希望能给项目开发和测试提供有意义的参考。

本文的内容结构安排如下:

第一章首先对论文的研究背景进行概述,介绍了 LTE 要求达到的性能指标以及未来 LTE 的研究趋势。

第二章为 LTE 系统控制平面协议栈模型,介绍了准 4G 系统的协议栈及功能实

体划分、协议构架图，同时对于层 2 部分在 TD-SCDMA 与 LTE 系统中的异同点进行简单比较，以便更清晰了解移动通信系统中协议栈功能上的区别。

第三章为 MAC 子层协议分析，从 MAC 层的总体模型和功能展开描述，详细分析了 MAC 实现的功能和数据处理过程，为状态划分及流程设计做准备。

第四章主要对 MAC 层进行接口设计、状态划分以及终端与网络端在通信情况下的 MSC 图，其中重点对连接模式进行分析与设计，包括有 HARQ 异常状况，半持续调度与动态调度等，在接口与流程的基础上撰写开发代码。

第五章为本文另一重点部分，利用 SDL 仿真实现功能协议，主要实现了初始随机接入、连接建立、上行与下行 HARQ 进程以及 MAC 头处理等功能，并利用 SDL 与 TTCN 协仿真对流程设计进行验证测试。

最后一章对全文工作进行总结，并指出继续进行的研究工作和未来可能的研究方向。

第二章 LTE 无线接口协议栈研究

2.1 无线接口协议总架构

无线接口协议是移动通信的关键技术。E-UTRAN 系统由 eNB、MME 及 UE 组成，提供了控制平面和用户平面的协议，eNB 通过 S1 接口与 EPC 相连，更细地划分，与移动管理实体 MME 相连的接口成为 S1-MME 接口，与 SAE 网管相连的接口成为 S1-U 接口。在设计时可要求 S1 接口支持多个 eNB 和多个 SAE/MME 之间的连接，E-UTRAN 的总体架构如图 2.1 所示^[8]。

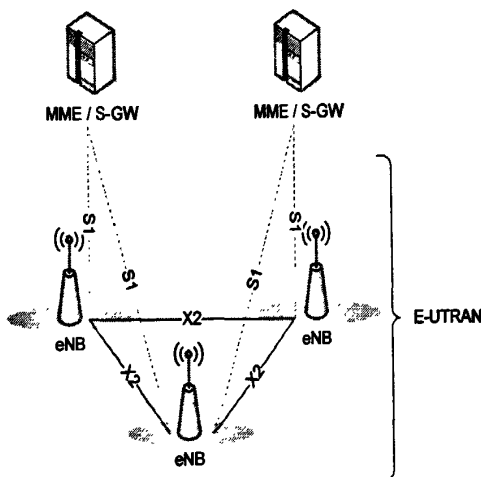


图 2.1 E-UTRAN 总体架构图

空中接口是指终端与网络端之间的接口，简称为 Uu 接口，该协议主要用于建立、重配置和释放各种无线承载业务。一般来说，空中接口协议包括控制平面和用户平面的协议，两者的区别主要在于网络层。

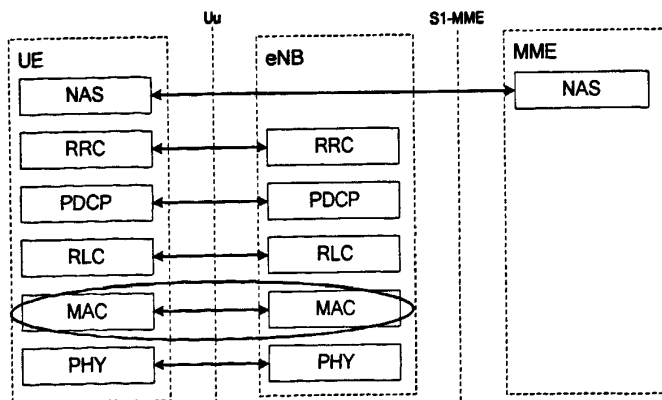


图 2.2 控制平面协议接口示意图

LTE 系统控制面协议栈的结构如图 2.2 所示^[9]，在研究与应用过程中可根据控制和软件的需要添加一些模块，每个模块分别完成不同的功能。不同模块之间的信息交换由系统接口完成，这些信息的交换通过原语（信号）来实现。

2.2 控制平面协议框架

2.2.1 PHY 物理层协议

LTE 系统的主要无线传输技术在物理层，差异在于描述物理层信道相关的信息和消息元素方面，在设计协议栈高层时会尽量考虑不同的标准之间的兼容性，而高层的区别并不明显，所以本节简要介绍物理层的传输信道的类型、定义和传输信道与物理信道的映射关系^[10]。

① 下行传输信道类型

1) 广播信道 BCH: 预定义的固定传输格式。例如具有固定的大小，固定发送周期，调制编码方式等。除了 MIB 消息在专属的物理信道上传输外，其他的广播消息 SIB1-SIB13 均是在物理共享信道上传输，能够在整个小区覆盖区域内广播。

2) 下行共享信道 DL-SCH: 使用 HARQ; 能够通过各种调制模式、编码、发送功率来实现链路适应; 能够使用波束赋形; 能够在整个小区内发送; 支持动态或半静态资源分配; 支持终端 DRX 以达到省电模式; 支持 MBMS 业务传输。

3) 寻呼信道 PCH: 支持终端 DRX 以达到省电模式(DRX 周期由网络端配置给终端); 要能在整个小区覆盖区域发送; 映射到用于业务或其他动态控制信道使用的物理资源上。

4) 多播信道 MBCH: 要求能在整个小区覆盖区域内发送; 对于单频点网络支持多小区的 MBMS 传输的合并; 使用半静态资源分配。

② 上行传输信道类型

1) 上行共享信道 UL-SCH: 能够使用波束赋形; 有通过调整发射功率, 编码和潜在的调制模式应用链路适应的能力; 使用 HARQ; 动态或半静态资源调度。

2) 随机接入信道 RACH: 用于指定传输随机接入前导, 承载有限的控制、发射功率等信息; 冲突碰撞, 同时也能依赖于物理层结果进行开环控制。

3) 传输信道与物理信道的映射

传输信道与物理信道的映射关系如图 2.3 和图 2.4 所示。

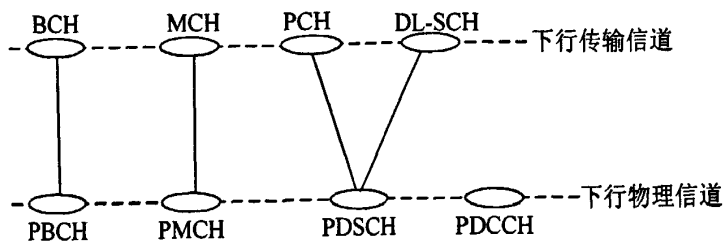


图 2.3 传输信道与物理信道的映射关系图（下行）

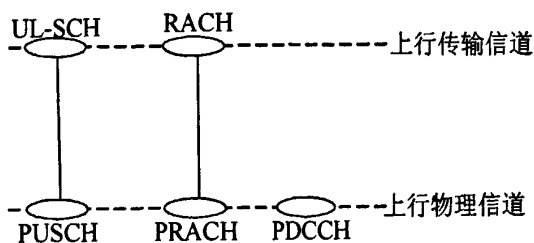


图 2.4 传输信道与物理信道映射关系图（上行）

LTE 系统协议栈数据链路层 L2 部分包含有三个子层：媒体接入控制层、无线链路控制层、分组数据汇聚协议层。上行与下行的层 2 结构分别如图 2.5 及 2.6 所示，位于物理层与 MAC 层之间的 SAP 提供传输信道，位于 MAC 层与 RLC 层间的 SAP 提供逻辑信道。

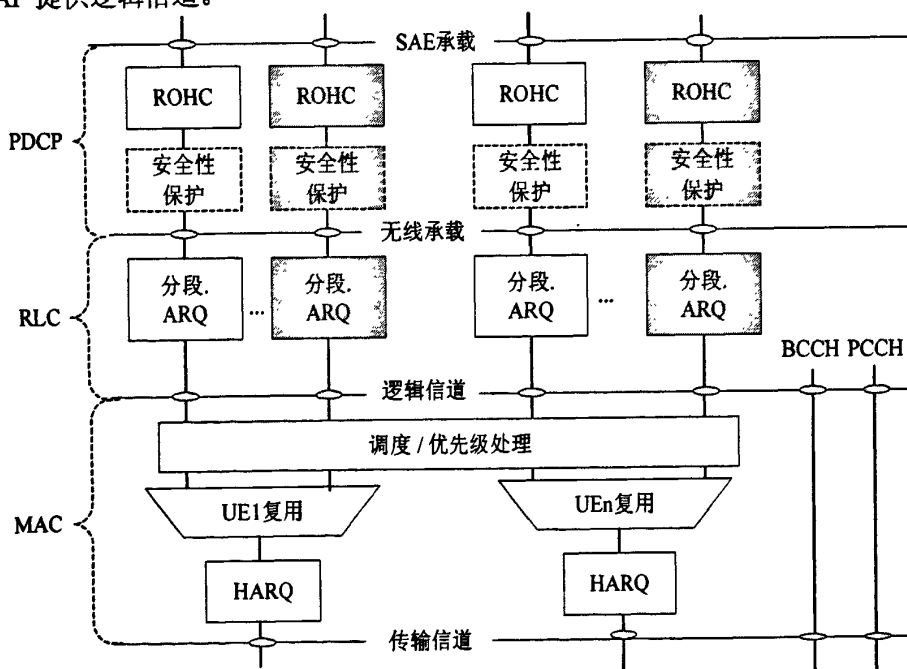


图 2.5 层 2 协议栈的下行结构

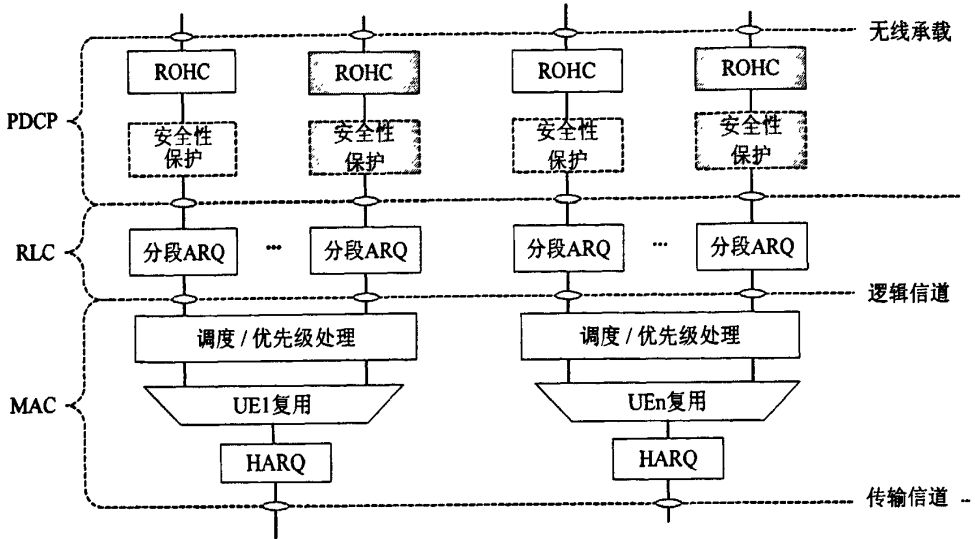


图 2.6 层 2 协议栈的上行结构

MAC 层执行逻辑信道到传输信道的复用与解复用功能。从图中可看出，上下行结构的不同点在于下行，MAC 子层除了处理单个 UE 的逻辑信道优先级外还包括多个 UEs 优先级处理。RLC 子层提供的主要服务和功能包括分段和组合、ARQ 错误检测、复位和协议的错误发现/恢复机制等。PDCP 层位于无线接口协议架构层 2 的最上层，通过其上层 RRC 来配置该层参数，PDCP 提供的服务和功能包括：头压缩和解压缩(使用 ROHC 协议的 IP 数据流)、用户平面和控制平面数据的加密/解密、下层 SDU 的复制检测等，各层具体的功能与服务在随后介绍。

2.2.2 媒介接入控制层协议

MAC 层主要实现和调度、HARQ 相关的功能，具体包括以下内容：

- ① 实现逻辑信道映射到传输信道；
- ② 分组数据单元的复用与解复用；
- ③ 调度信息的报告，UE 向 eNodeB 请求传输资源等；
- ④ 基于 HARQ 机制的错误纠正功能；
- ⑤ 通过动态调度的方式，处理不同用户的优先级；以及对同一用户的不同逻辑信道的优先级处理，主要在 UE 端实现；
- ⑥ 传输格式的选择，通过物理层上报的测量信息，用户能力等，选择相应的传输格式，从而达到最有效的资源利用；
- ⑦ 填充；

MAC 子层提供逻辑信道上的数据传输服务，为不同类型的数据传输业务定义一系列的逻辑信道类型，数据传输服务是通过使用传输信道获得的，传输信道提供

的服务由传输格式（或传输格式集）进行定义，比如：信道编码、交叉和速率匹配等。每个逻辑信道是根据传输什么样类型的信息来定义的^[11]。

2.2.3 无线链路控制层协议

RLC 功能主要有以下几点^[12]：

- ① 对上层 PDU 的传输支持 TM、AM 或 UM 模式；
- ② 通过 ARQ 机制进行错误修正(CRC 校验由物理层完成)；
- ③ 根据传输块大小进行动态分段，分段产生的 RLC PDU 不包含任何填充；
- ④ 重传时对 PDU 进行重分段，且重分段的数目没有限制；
- ⑤ 顺序传送上层的 PDU(切换时除外)；
- ⑥ 重复检测与重建；
- ⑦ 底层协议错误检测与恢复；
- ⑧ eNodeB 和 UE 间的流量控制；

与 TD-SCDMA 系统的 RLC 功能实体相比，LTE 系统中的 RLC 子层主要有如下特点：

- UM 模式与 TM 模式承载的信道较少，功能实现简单。
- AM 模式支持 RLC SDU 的动态分段，现有系统只支持固定分段。
- AM 模式支持二次分段，现有系统都支持。
- 不再支持加密功能。
- 可能需要支持流量控制功能。

2.2.4 分组数据汇聚层协议

PDPCP 提供服务给 UE 侧的 NAS/RRC，或者 eNB 侧的转发，PDPCP 子层的主要功能包括以下几个方面^[13]：

- 头压缩与解压缩，支持 ROHC 压缩算法；
- 用户平面数据传输，包括从 NAS 层接收数据转发给 RLC 层；
- 对上层 PDU 的顺序提交，下层 SDU 的复制检测；
- 用户平面数据和控制平面数据加密/解密；

与现有系统中的 PDPCP 相比较，LTE 系统中的 PDPCP 子层有以下特点：

- 压缩算法较简单，只支持一种；
- 不支持无损重定位；
- 支持加密；
- 不再需要无损下行 RLC PDU 大小的改变；

2.2.5 网络层协议框架

层 3 协议主要是由属于 AS 层的 RRC 和 NAS 层构成, LTE 系统控制平面与用户平面的区别在于 eNB 端不存在 NAS 层, 本文主要介绍与研究设计时关系较为密切的 RRC 层协议功能^[4]:

① RRC 层提供的服务与功能

LTE 系统中, RRC 层提供的服务主要包括以下几种:

- 广播 AS 层的系统消息和传送 NAS 的消息;
- 寻呼;
- RRC 连接建立、保持和释放, 包括临时标识的分配、信令 RB(SRB)的配置 (低优先级和高优先级 SRB);
- 安全功能, RRC 消息的完整性保护;
- 点对点无线承载的建立、修改和释放;
- 移动性管理功能, 为了小区间和 RAT 间移动性进行的报告控制, 小区间切换, UE 小区选择和重选, eNodeB 间的通信上下文传输;
- QoS 管理;
- UE 测量上报及测量控制;

② RRC 协议状态以及状态跃迁

在 LTE 中保留了 RRC 的两种状态: 空闲状态和连接状态。

空闲状态(RRC_IDLE)的状态描述如下:

- NAS 配置特定 UE (UE-specific)的 DRX;
- 系统消息广播;
- 寻呼;
- 小区选择和重选;
- UE 已经有一个可以在跟踪区域范围内唯一的标识, 在 eNodeB 中没有保存 RRC 通信上下文。

连接状态(RRC_CONNECTED)的状态描述如下:

- UE 有 E-UTRAN-RRC 连接;
- UE 在 E-UTRAN 中有通信上下文;
- E-UTRAN 知道 UE 属于哪个小区;
- 网络可以发送/接收数据;
- 网络控制的移动性;
- 邻小区测量。

从 PDCP/RLC/MAC 层可看出以下几点:

- UE 可以发送数据给网络，也可以接收从网络发来的数据；
- UE 监听与共享数据信道相关的控制信令来查看在共享数据信道上是否有分配给此 UE 的传输；
- UE 也要上报信道质量消息和反馈消息给 eNodeB。

DRX/DTX 周期可以根据 UE 的活动水平来配置以达到终端节电和提高资源利用率的目的，这个功能由 eNodeB 进行控制。

与 UTRAN 系统中 UE 的 5 种 RRC 状态(空闲状态, CELL_DCH 状态, CELL_FACH 状态, CELL_PCH 状态和 URA_PCH 状态)相比, LTE 系统中的状态数目大大的减少了。这意味着 LTE 系统中 RRC 的有限状态机更为简单, 复杂度也有了很大的改善。

和 UTRAN 系统相似, 终端开机后将会从 PLMN 中选择合适的小区驻留。当 UE 驻留在某个小区后, 就可以接收系统信息和小区广播信息。一般情况下 UE 首次开机需要进行注册过程, 一方面可以互相认证鉴权, 另一方面可以让网络获得此 UE 的基本信息, 之后 UE 可以一直处于空闲状态, 直到需要建立 RRC 连接。UE 通过建立 RRC 连接才能进入 RRC_CONNECTED 状态。在 RRC_CONNECTED 状态下, UE 可以跟网络进行数据的交互, 当 UE 释放了 RRC 连接时, UE 就会从 RRC_CONNECTED 状态跃迁到 RRC_IDLE 状态。

2.3 本章小结

本章简单介绍了空中接口协议的架构, 物理层、层 2 和层 3 的主要服务和功能。可以看出在 LTE 阶段, 对于空中接口协议的主要优化体现在协议状态的简化, 这对设计过程中状态机的划分、跃迁条件的设计具有很重要的意义。

第三章 MAC 子层协议分析

3.1 MAC 子层总体模型

MAC 子层与物理层之间通信使用传输信道，与 RLC 层之间使用逻辑信道。因此，在 MAC 子层将完成逻辑信道与传输信道之间的映射功能，并根据逻辑信道的资源速率为传输信道选择合适的传输格式，同时实现调度和 HARQ 相关的功能，MAC 子层在网络侧与终端实现的功能与服务上有所区别，网络侧还需实现不同 UE 逻辑信道的优先级处理等，MAC 层网络侧总体架构如图 3.1 所示。

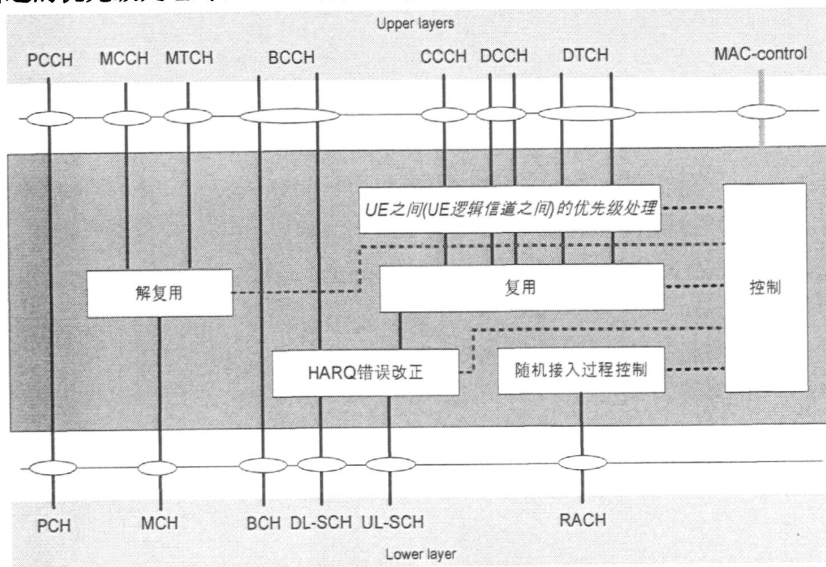


图 3.1 eNB 端 MAC 层实体结构图

3.2 MAC 层功能描述

3.2.1 服务与功能

LTE 系统中定义了两个 MAC 层实体，分别位于终端与网络端，MAC 层提供以下服务：数据传输（加 MAC 头、控制元素，SDU-PDU 复用与解复用），无线资源分配，HARQ 信令反馈，调度请求，测量（CQI 上报），上述服务主要通过 MAC 层模块实现的功能来完成：

- 逻辑信道与传输信道的映射；
- 从一个或多个逻辑信道将 MAC SDU 复用并传至传输信道上的物理层传

输模块;

- 从一个或多个逻辑信道将 MAC SDU 解复用到传输信道上的物理层传输模块;
- 调度信息报告;
- 通过 HARQ 进行数据错误修正;
- 通过动态调度进行的不同 UE 之间的优先级处理;
- 逻辑信道的优先级处理;
- 多个 UE 的逻辑信道优先级处理;

3.2.2 信道结构与映射

DL-SCH 上的共享信道数据传输是 LTE 无线接入的一个基本过程, 共享信道传输也就是上行信道和下行信道动态的共享时间、频率资源。上行信道和下行信道资源的分配主要是由 MAC 层进行调度。在 LTE 中, 上行信道和下行信道的调度是分开进行的。

LTE 方案中没有专用信道的概念, 取而代之的是共享信道。在共享信道中, 用户之间动态地分配时频资源, 使用共享信道能很好地匹配了分组数据对快速资源分配的要求, 也体现了 LTE 的优越性。MAC 以逻辑信道的形式为 RLC 提供服务, LTE 中逻辑信道的类型包括有:

BCCH: 广播控制信道, 用于系统控制信息在一个小区中从网络端到移动终端的传输。在接入系统之前, 一个移动终端需要读取 BCCH 上传输的信息来找出系统是怎么配置的, 例如系统的带宽;

PCCH: 寻呼控制信道, 用于寻呼不被网络所识别的小区上的终端, 寻呼信息需要被传送到多个小区;

CCCH: 公共控制信道, 用于传输上下行控制信令, 如 RRCConnectionRequest, RRCConnectionReject 消息等, 该信道与 RLC TM 实体相对应;

DCCH: 专用控制信道, 用于进行移动终端控制信息的传输, 传输专用控制信息的双向信道。该信道用于移动终端的个人配置例如不同的切换信息;

DTCH: 专用传输信道, 用于终端的连接数据传输, 这是用于所有上行信道和非 MBMS 的下行信道用户数据传输的逻辑信道类型;

MCCH: 多播控制信道, 用于被请求接收 MTCH 控制信息的传输;

MTCH: 多播流量, 用于 MBMS 服务的下行信道的传输;

LTE 传输信道的类型在 2.2.1 节已经介绍, MAC 子层上下行逻辑信道与传输信道的映射关系分别在图 3.2 和图 3.3 中给出。

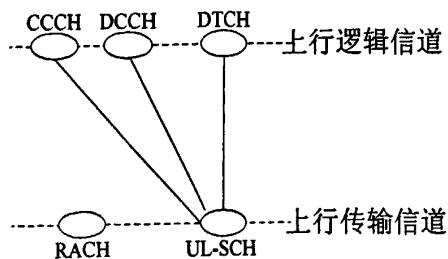


图 3.2 上行信道映射关系

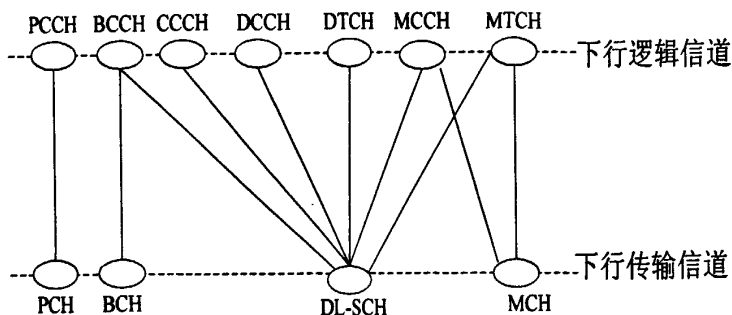


图 3.3 下行信道映射关系

3.3 MAC 层连接模式工作过程研究

3.3.1 混合自动重传请求过程

对 MAC 子层 HARQ 控制机制的研究,首先要明确进程中涉及到的一些参数及定时器的概念。HARQ 信息包括 NDI 和 TB 大小,对于 DL-SCH 传输, HARQ 信息还包括 HARQ 进程 ID 号,而 UL-SCH 传输 HARQ 信息则含有 RV。若物理层采用空分复用时, DL-SCH 的发送中 HARQ 信息由一组信息组成,分别对应于每一个传输块的 NDI 和 TBs 大小。HARQ RTT 定时器描述了 UE 端期望的 DL-HARQ 重传之前的最小子帧总数。

在 UE 端和网络端中都有一个 HARQ 实体,它维持一系列并行 HARQ 进程。每个 HARQ 进程都具有独立的一个 HARQ 进程 ID。HARQ 实体将 HARQ 信息和在 DL-SCH 收到的 TB 传至对应的 HARQ 进程^[15]。当物理层配置了空分复用,对于相同的 HARQ 进程,每个子帧接收一或两个 TB,否则接收一个 TBs,下行链路 HARQ 进程号由物理层进行管理。MAC 子层的 HARQ 具有以下功能: HARQ 传输/重传 TB,除此之外,下行链路包括非同步自适应 HARQ、PUCCH/PUSCH 中对下行传输/重传进行响应的 ACK/NACK、存在传输或重传时由 PDCCH 指明 HARQ 进程号以及经 PDCCH 调度的重传;在上行链路中还包括同步 HARQ、每个终端所配置的最

大重传次数、PHICH 信道中对上行新数据传输/重传进行响应的 ACK/NACK 标识以及遵循以下原则的 UL-HARQ 操作：

① 无论收到的 HARQ 反馈内容是 ACK 或 NACK, 当在 PDCCH 上能正确接收信息时, UE 端都需执行 PDCCH 中指定的任务, 例如: 执行新传输或重传 (如自适应重传请求)

② 当已被检测的 UE 端没有 C-RNTI 寻址的 PDCCH 时, 需由 HARQ 反馈来指示 UE 应如何进行重传

3.3.2.1 下行共享信道数据传输

在 LTE 系统中, HARQ 采用多个并行通道的处理过程, 当一个进程等待 ACK/NACK 反馈时, 别的进程仍然可以继续发送数据。下行链路 HARQ 采用自适应的异步重传机制, 上行链路 HARQ 采用同步重传机制。在异步重传机制中, 可在任意时刻发送重传数据, 需额外的信令指示每个 HARQ 进程所在的子帧, 确定子信道的信道号, 确定一个数据包属于哪一个 HARQ 进程^[17]。在同步机制中, HARQ 进程的时域位置被限制在预定义好的位置, 只能按照第一次发送时的子帧号进行重传, 子帧编号就是该 HARQ 进程号。

在下行方向上, 数据缓冲区位于网络端, 网络可以准确地知道每个 UE、每个 RB 对应的 buffer 数量, 网络端在分配终端的下行资源的调度方式包括动态调度、半持续调度及在随机接入过程中的下行资源分配。网络端需要为终端的 HARQ 进程的初始传输分配预定义下行资源, 重传则通过 PDCCH 调度。在有与预定义资源的子帧内, UE 如果没有监听到通过 C-RNTI 寻址的 PDCCH 调度信令, 则按照预定义资源分配来接收数据; 否则, 按 PDCCH 下行指示接收下行数据。

对于每一个子帧来说, 如果有属于 HARQ 进程的传输时, 进程能从 HARQ 实体 TB 和相关的 HARQ 信息。

对于收到的 TB 和相关的 HARQ 信息, HARQ 进程首先根据 NDI 判断当前发送的数据是新数据还是重传数据:

① 如果 HARQ 信息中提供的 NDI 值相对于上一次针对该 TB 对应的 NDI 值发生了翻转; 或者这个 TB 是发送到广播 HARQ 进程并且依据 RRC 系统消息调度指示这个 TB 是首次接收; 或者如果这是在此之前没有收到关于这个 TB 的 HARQ 信息, 即这是第一个收到的 TB, 则认为当前数据传输是一个新传输;

② 否则, 其他情况都认为是重传数据过程。

网络端先根据上述条件 NDI 值判断 TB 是一个新数据传输还是重传, 然后根据结果进行下面新数据传输或重传的处理:

① 如果这是一个新的传输，那么将接收到的这个 TB 数据代替当前 soft buffer 里的数据，即清除缓存数据并存入新接收到的数据。

② 如果这是一个重传，需预先知道该数据是否已解码成功。若未成功解码，MAC 层指示物理层将这个 TB 合并到 soft buffer 中已存储的数据；如果 HARQ 信息中指示的 TB 大小和上一次有效指示的 TB 大小不一样，则把这个 TB 的数据代替当前 soft buffer 中的数据。

经过对 buffer 缓存器中数据的合并和更新后，仍需要对当前的缓存数据进行解码，有以下几种情况：

① 解码成功时，针对该 TB 产生成功接收确认 ACK 指示

- 如果这个 HARQ 进程是广播 HARQ 进程，把解码后的 MAC PDU 送给上层；
- 如果本次解码是该 buffer 数据的第一次成功解码，则把解码成功的 MAC PDU 送到拆分与解复用实体。

② 解码失败时，对这个 TB 的数据产生一个否定确认 NACK

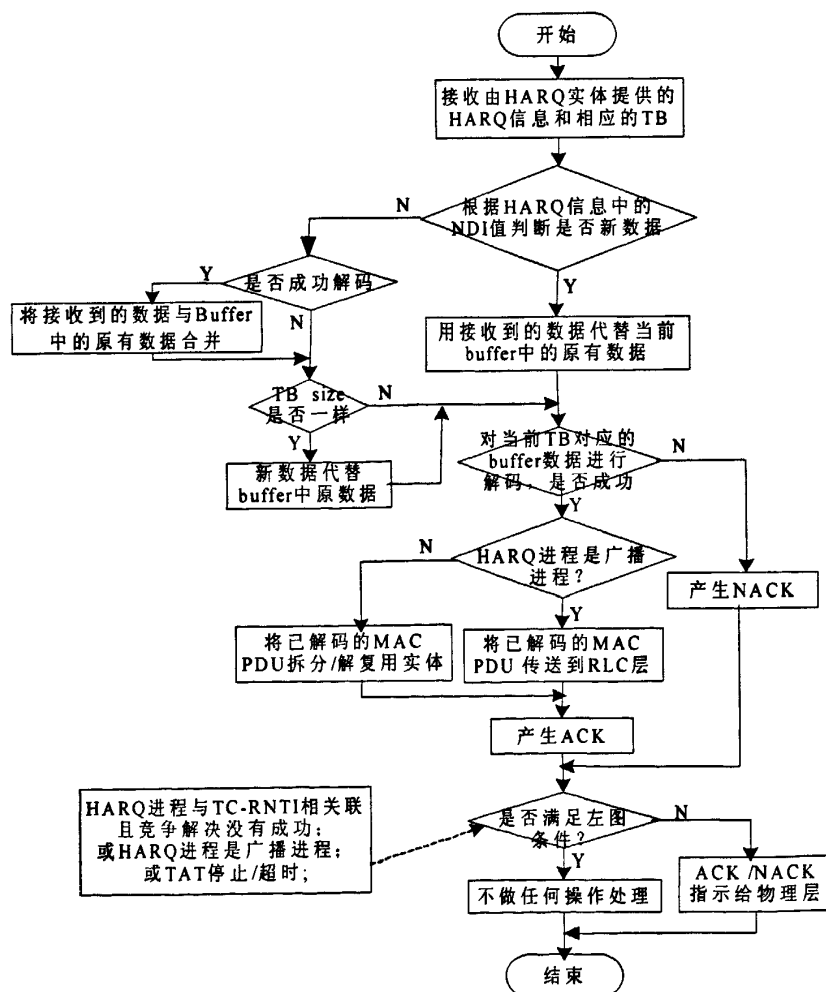


图 3.4 eNB 端的 HARQ 进程工作流程示意图

不管是 ACK 或 NACK, MAC 层都要依据判断条件决定是否要把 ACK/NACK 指示给物理层:

① 如果这是一个临时 C-RNTI 寻址后指示接收的 HARQ 进程, 并且竞争解决没有成功; 或者接收该 TB 的 HARQ 进程是一个广播 HARQ 进程; 又或者 timeAlignmentTimer 超时或停止, 则产生的 ACK/NACK 不指示给物理层发送数据。

② 其他情况都将产生的 ACK/NACK 指示给物理层。对应的流程如图 3.4 所示。

在终端与网络端建立连接后, 如果检测到终端的 E-UTRAN 移动性失败、切换失败、RLC 失败、RRC 连接重配置失败、完整性校验失败这 5 种情况之一时, 触发 RRC 连接重建过程。在终端启动这一过程前, 需要确定 UE 端 AS 安全性已经被激活, 即 RRC 已完成 SMC 过程, 重建才可以初始化; 如果 AS 安全性没有激活, 则 RRC 则直接进入 RRC-IDLE 状态。重建过程的目的除了恢复 SRB1 外, 还重新激活 UE 端 AS 安全性, 并恢复重建之初挂起的 DRB。

初始化重建过程时, RRC 层挂起除了 SRB0 以外的 RBs, 重置 MAC 并激活 MAC 应用 MAC 缺省配置, RRC 对低层基本配置完成后, 要想进行下一步的连接, 首先要选择合适的小区驻留。

3.3.2.2 上行共享信道数据传输

网络端 MAC 进行上行资源预定义分配, 可以对 HARQ 的初始传输和重传都进行上行资源的预定义, 在有预定义的子帧上, 如果没有监听到针对它的上行调度信令, 就在预定义的资源分配上发送上行数据, 否则按照控制信道的指示发送上行数据, 不管是 DL-HARQ 还是 UL-HARQ, 调度信令的优先级都比预定义高。在网络端与终端分别存在一个 HARQ 实体, 控制一系列并行的 HARQ 进程, 从而实现在等待之前发送数据的反馈期间能连续发送其他数据。

在每一个给定的 TTI, HARQ 实体执行以下的操作:

首先确定一个与该 TTI 对应的 HARQ 进程, 再判断当前 TTI 是否已经获得了上行资源授权来进行相应的操作。如果没有获得上行授权, 且针对这个 TTI 的 HARQ 进程缓存中存在待发送数据, 则触发 HARQ 进程产生非自适应重传; 若 TTI 内已获得上行资源调度, 则有如下三种情况:

① UL-grant 不是在通过 C-RNTI 寻址的 PDCCH 上获得且 HARQ 信息中提供的 NDI 表明有新数据需传输;

② UL-grant 是从 C-RNTI 寻址的 PDCCH 中获得且指示的 HARQ buffer 为空;

③ UL-grant 是从 RAR 中接收获得;

当满足以上任意一个条件时, 那么进行如下操作: 如果满足条件③并且 Msg3

缓存中有 MAC PDU, 则由 Msg3 缓存获得该 MAC PDU 进行传输; 否则将由复用&集合实体获得该 MAC PDU 传输。不论是 Msg3 缓存还是从复用&集合实体获得 MAC PDU, 将 MAC PDU、UL-grant 和 HARQ 信息指示给相应的 HARQ 进程, 并触发 HARQ 进程产生非自适应重传。

如果 HARQ 实体不满足以上三种情况, 将已经获得的 UL-grant 和 HARQ 信息 (也即冗余版本 RV) 发送至指定的 HARQ 进程, 并触发 HARQ 进程产生自适应重传。

对于通过临时 C-RNTI 进行寻址的 PDCCH 获得的上行资源授权, 在判决 NDI 是否是新数据时, 均认为是对 Msg3 的调度重传, 忽略 UL-grant 中包含的 NDI 值。上行链路 HARQ 实体的工作流程如图 3.5 所示。

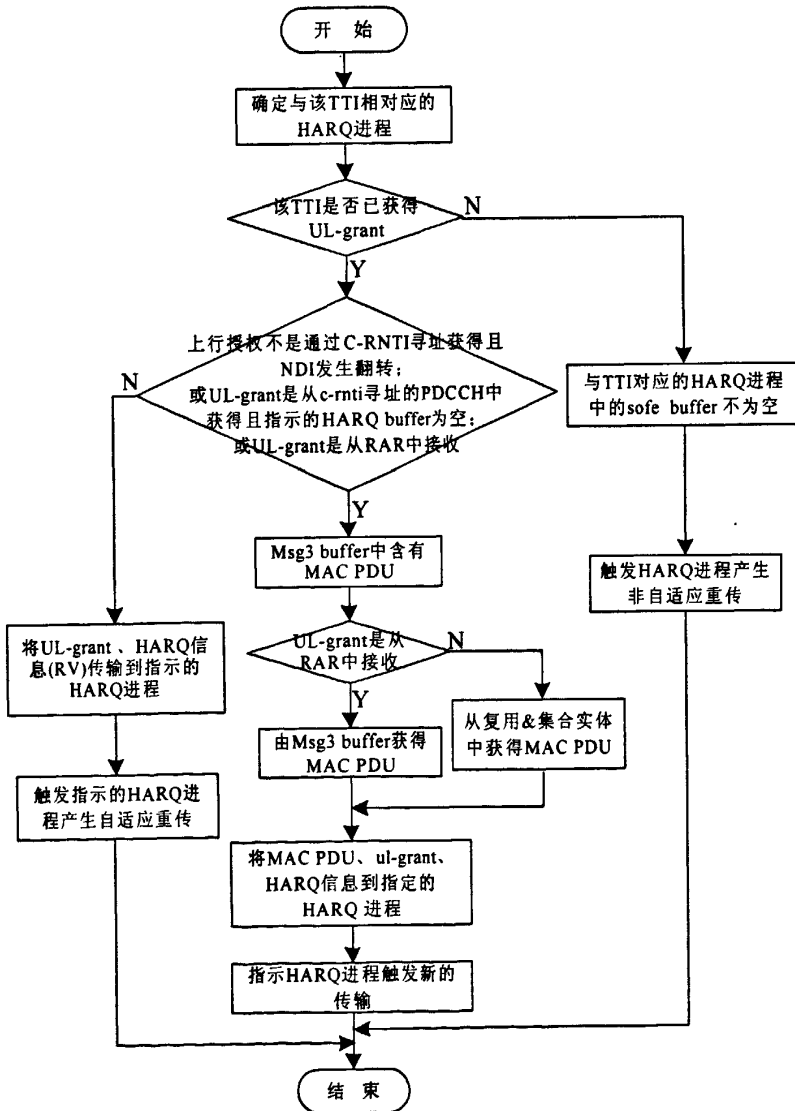


图 3.5 上行链路 HARQ 实体工作流程图

每一个 HARQ buffer 都由一个 HARQ 进程控制, HARQ 进程管理三个状态变量, 数据处理流程如图 3.6 所示:

1) CURRENT_TX_NB: 当前 buffer 中已经发送的 MAC PDU 次数, HARQ 进程建立时, 该参数初始定义为 0。

2) HARQ_FEEDBACK: 当前 buffer 中 MAC PDU 的 HARQ 反馈状态。

3) CURRENT_IRV: 冗余版本序号索引 RV, 序号分别为 0、1、2、3、, 该变量按 4 取模。

RRC 层为网络端和终端分别配置两个与上行 HARQ 进程重传相关的参数变量:

maxHARQ-Tx: HARQ 传输的最大次数, 取值有 n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, n8, n10, n12, n16, n20, n24, n28

maxHARQ-Msg3Tx: 随机接入过程中 Msg3 的最大 HARQ 重传次数。取值为整形(1..8)。

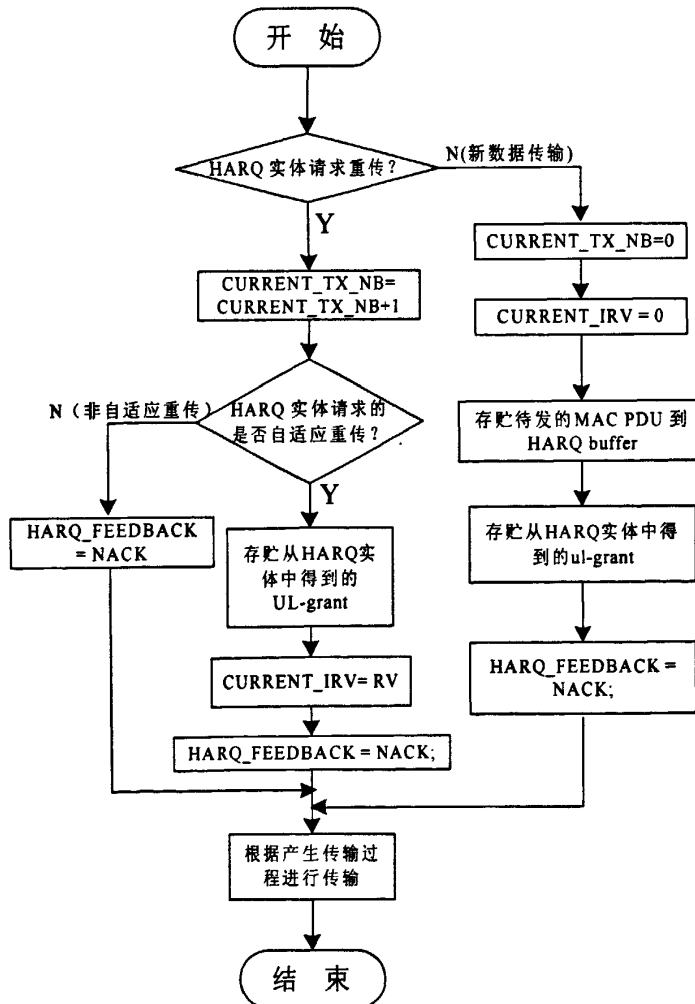


图 3.6 上行信道 HARQ 工作流程

当接收到一个已经发送的数据块的 HARQ 反馈时, 应将接收的反馈赋值给对

应的 HARQ 进程变量 HARQ_FEEDBACK。如果上行 HARQ 实体请求的是新数据发送，则需将下列参数设置后触发物理层发送数据：CURRENT_TX_NB=0；CURRENT_IRV=0；将 MAC PDU 储存到相应的 HARQ buffer；储存从 HARQ 获得的上行授权；HARQ_FEEDBACK=NACK 并按照 UL-HARQ 产生传输流程发送数据。

如果 HARQ 实体请求的是数据重传，对应的 HARQ 进程需要将参数 CURRENT_TX_NB 加 1 后判断重传属于自适应重传还是非自适应重传。当重传数据是自适应重传请求时：储存从 HARQ 实体得到的上行授权，设置参数 CURRENT_IRV 值为 HARQ 信息中获得的冗余版本索引值 RV，HARQ_FEEDBACK=NACK 并按照 UL-HARQ 产生传输流程发送数据；当重传数据是非自适应重传时，如果 HARQ_FEEDBACK=NACK 则按照 UL-HARQ 产生传输流程发送数据。

HARQ 进程要进行如下操作，才能产生数据传输过程，如图 3.7 所示：

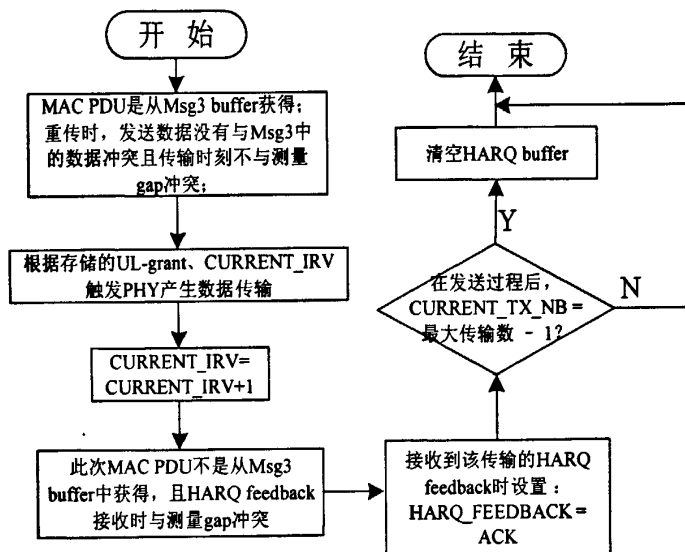


图 3.7 HARQ 产生传输流程

如果 MAC PDU 是在 Msg3 buffer 中获得，或发送时没有与测量 Gap 发生冲突，并且在重传时，数据重传没有与 Msg3 buffer 获得的 MAC PDU 发生冲突，那么进行如下操作：指示物理层根据存储的上行资源授权以及 RV 生成一次数据传输发送；CURRENT_IRV+1；如果本次发送的 MAC PDU 不是由 Msg3 获得且在接收针对本次发送的 HARQ，当进行 HARQ 反馈时，若与测量 Gap 发生冲突，那么进行以下操作：在本次发送的 HARQ 反馈接收子帧中，设置 HARQ_FEEDBACK=ACK。在以上发送过程之后，如果针对该 TTI 的变量 CURRENT_TX_NB= maximum number of transmissions-1，则清空本次 HARQ 进程对应的缓存数据；如若 CURRENT_TX_NB= maximum number of transmissions-1 后上次传输数据的反馈为

NACK 时，告知 RLC 层 ARQ 实体 RLC PDU 发送失败。

3.3.2 资源调度

3.3.2.1 调度模式

在前面我们提到的 LTE 系统 MAC 信道结构和信道映射中，除了很少的几个信道有专门对应的传输信道，例如寻呼信道和广播信道，而且 BCH 传输的主要也是 MIB 消息，而其余的 SIB 消息依然使用共享信道传输，很显然，资源是以共享的方式存在。MAC 层对同一个 UE 不同逻辑信道之间的优先级处理和通过动态调度进行的 UE 优先级处理，调度的好坏对于系统的性能影响很大，由于各个业务与应用对 QoS 的要求是不同的，因此调度的好坏直接影响的就是 QoS 是否可以满足，也就是用户的使用体验是否比较好^[20]。在 LTE 系统中，位于网络侧的调度器应具有以下特征和功能：

- (1)负责上行/下行共享信道的动态资源分配；
- (2)QoS 控制，针对不同业务，需要保证业务质量；
- (3)针对用户的信道条件，对多用户的优先级、同一用户的业务逻辑信道优先级进行优先级处理，考虑因素包括公平性、吞吐量和时延等；

① 动态调度

动态调度是 LTE 系统默认的调度方式^[21]，由 MAC 层实时、动态地根据信道条件、终端数据量分配时频资源和传输速率，控制信令开销明显但灵活性高，比较适用于突发特征明显的业务，是 UL-SCH 和 DL-SCH 最基本的调度方式。

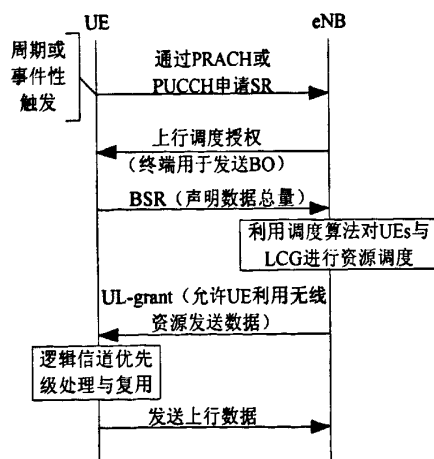


图 3.8 上行动态调度示意图

图 3.8 描述了一个上行动态调度流程图^[22]。首先在 UE 端有一个事件产生，一般是上行有数据发送，已经放在了缓冲区里了，那么它需要为这些数据申请上行资

源用于发送。它可以通过 SR-PUCCH 上行 SR 控制信道来发送调度请求，或者通过 PRACH，此时是采用竞争的方式发送调度请求；

eNB 按照调度算法分配无线资源用于发送 BO 信息，通过上行调度授权 (UL grant) 告诉 UE；

UE 发送 BSR 告诉 eNB 对应的逻辑信道组有多少数据要发送，对于上行 eNB 调度是针对逻辑信道组而不是一个无线承载；

然后 eNB 对用户请求的资源情况，分配相应的资源，通过 UL grant 通知 UE；
UE 在自己的逻辑信道根据一定的优先级原则，发送上行数据。

② 半静态调度

半静态调度是动态调度的一种优化方式，由 RRC 层在建立连接后分配时频资源和传输速率，并负责半静态调度参数(周期)的配置，当 UE 识别是半静态调度，则保存当前的调度信息，在之后的传输过程中，数据的发送与接收都在每隔固定的周期在相同的时频位置上进行，由 PDCCH 信令负责激活/去激活半静态调度资源。当通过 RRC 消息激活 SPS 调度时，RRC 层需要提供以下信息：

SPS C-RNTI: 半持续调度 C-RNTI；

semiPersistSchedIntervalUL: 上行调度间隔。对于 FDD 模式，RRC 层配置的该参数为子帧号，在 TDD 模式该值向下取整 (10 子帧的整数倍)，例如 RRC 配置 semiPersistSchedIntervalUL 参数为 sf128 时，FDD 模式为 128#子帧，则 TDD 模式为 120#子帧。

implicitReleaseAfter (n): 为了增强资源释放的可靠性，隐含指示 n 个空传输后释放半持续调度，如果网络端对半持续调度的显式释放命令 UE 没收到，但其已经连续进行了 n 次空传输，则 UE 自动放弃半静态调度配置的资源，停止 SPS 数据发送/接收。

twoIntrvalsConfig: 支持 TDD 模式，上行两个 SPS 间隔的触发，当配置为 1 时，上行 SPS 间隔可用，否则失效。

semiPersistSchedIntervalDL : 下行调度间隔，参数配置如同 semiPersistSchedIntervalUL。

numberOfConfSPS-Processes: 适用于半静态调度的 HARQ 进程个数。

当上行配置了半持续调度配置时，网络端认为下行分配发生在以下公式中标出的子帧号上：

$$(10 * SFN + subframe) = [(10 * SFN_{start\ time} + subframe_{start\ time}) + N * semiPersistSchedIntervalDL] \text{ modulo } 10240, N > 0$$

其中 $SFN_{start\ time}$ 与 $subframe_{start\ time}$ 分别代表 SFN 号与 subframe 子帧号，此时终端认为下行资源重分配。

当半静态调度上行授权已经配置时，终端与网络将在上行相应的资源上发送与接收数据。

$$(10 * SFN + subframe) = [(10 * SFN_{start\ time} + subframe_{start\ time}) + N * semiPersistSchedIntervalUL + Subframe_Offset * (N \text{ modulo } 2)] \text{ modulo } 10240,$$

RRC层配置的参数twoIntervalsConfig无效时，设置Subframe_Offset=0.

如果 RRC 去激活上行或下行连接，那么相应的配置授权与配置的资源要丢弃，半静态调度具有一次配置，周期性、在固定的资源位置上发送/接收数据的特点，如果无线资源在半静态调度完成之后没有成功释放，这可能会对其他用户造成严重的干扰，从而导致网络无法解调、系统性能的下降。网络端通过 SPS C-RNTI 寻址的 PDCCH 释放半静态调度资源，为了达到更加可靠的释放效果，还对 PDCCH 的格式作出规定，且 UE 如果释放成功，需要向网络进行 ACK/NACK 反馈。

③ 静态调度

静态调度，顾名思义是有周期性，可配置性的。这种调度模式主要针对广播消息，也就是 SIB 消息映射到共享信道，然后周期性的发送，基本上一旦系统启动起来，它占用的资源就是按照静态分配的形式来使用^[24]。除此之外还有呼叫，总是周期性的获得调度资源，虽然呼叫不是什么时候都有的，不过考虑到它的周期性，也可以看成静态调度。

3.3.2.2 调度信令

① 调度请求

SR 用于请求上行共享信道资源用于发送上行数据所用，当触发了 SR 时，就会一直处于待应答状态直到它被取消为止，也就是要么当这次请求得到满足要么请求取消。由于必须有上行资源，UE 才能够发送上行的数据，UE 要求被调度的缓冲区状态报告 (BSR)，它是 MAC 控制信息单元，在共享信道上发送的，也是需要资源来发送的，那么如何获得用于发送 BSR 的上行资源呢？这就要先在 PUCCH 上发送 SR 或者通过 PRACH 发送。由于分配给 UE 的 PUCCH 是周期性的独占式的资源，UE 应该总是有资源的；但是如果在 PUCCH 上发送的 SR 总是失败，那么也就需要通过 PRACH 的竞争方式来获得调度机会。

一旦触发了 SR，并且同时没有其它的 SR 待应答，那么 UE 把 SR_COUNTER 设置为 0，只要有一个 SR 正被等待应答，那么在每一个 TTI，UE 都要按照下面流程处理：

如果在这个 TTI，没有可用于发送数据的 UL-SCH 资源时，判断以下条件：

- 1) 若在任何 TTI 内，UE 都没有可用的 PUCCH 资源用于发送 SR，就要发起

随机接入过程并取消所有待应答的 SR；

2) 在这个 TTI 有可用的 PUCCH 资源用于发送调度请求 SR，并且这个 TTI 不属于测量间隔、定时器 *sr-ProhibitTimer* 停止时；

若 $SR_COUNTER < dsr-TransMax$ ，将 $SR_COUNTER$ 加 1；指示物理层在 PUCCH 上发送 SR 信号、开启定时器 *sr-ProhibitTimer*；若 $SR_COUNTER \geq dsr-TransMax$ ，上报 RRC 层释放 PUCCH/SRS 资源，丢弃关于下行分配和上行授权相关的配置，发起随机接入过程并取消所有待应答的 SR。

如果在这个 TTI 内有可用的上行资源，那么就取消所有待应答的 SR，此时请求已经得到 eNB 的确认并且被 eNB 调度了。图 3.9 是终端发送调度请求的流程。

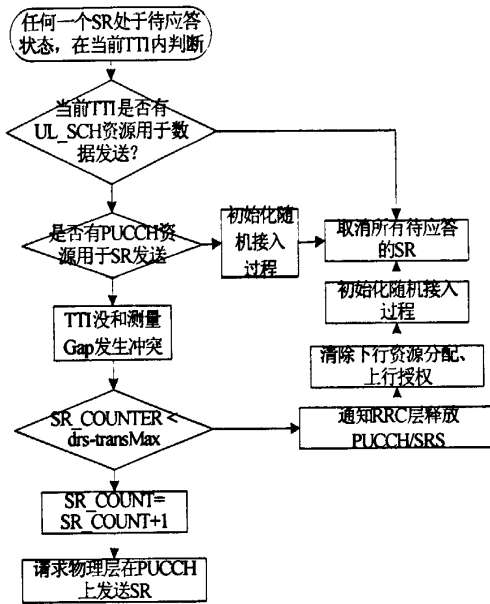


图 3.9 终端 SR 调度请求流程

② BSR 缓存状态报告

状态报告 BSR 是终端用于向网络端提供当前缓存中待发的数据量，RRC 通过在 *RRCConnectionSetup* 消息中配置定时器 *periodicBSR-Timer* 和 *retxBSR-Timer* 来控制终端发送 BSR 过程，终端会通过三种情形事件触发 BSR 上报网络，具体的上报类型如图 3.10 所示。

1) Periodic BSR 上报：当定时器 *periodicBSR-Timer* 超时，触发 Periodic BSR。

2) Padding BSR 上报：padding 比特数和分配的上行资源大于或等于 BSR 控制单元和 MAC 子头之和时触发；当 padding 比特数大于或等于短 BSR 和子头之和，小于长 BSR 和子头之和，且 TTI 内多个 LCG 有可用数据发送，此时上报截断 BSR；否则上报短 BSR；如果 padding 比特数等于或大于长 BSR 和子头比特数之和，则上报长 BSR。

3) Regular BSR 上报：两种情形下触发该 BSR 上报：当 *retxBSR-Timer* 超时，

LC 上有可用数据发送；当有属于更高优先级 LCG 的上行数据到达，或 LCG 中的 LC 都没有可用数据发送时新数据到达。如果当前 TTI 内有多个 LCG 有可用数据需要发送，上报长 BSR，否则上报短 BSR。

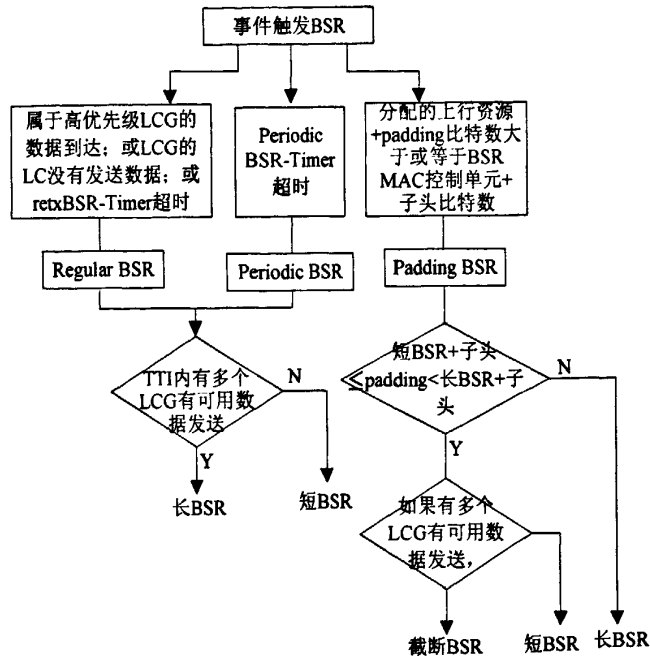


图 3.10 BSR 流程

3.3.3 MAC 协议数据单元

3.3.3.1 数据发送 MAC PDU

一个 MAC PDU 由 MAC 头、多个 MAC SDUs (或没有)、多个 MAC 控制元素 (或没有) 和选择性的填充位组成, MAC 头的大小、MAC SDU 大小都是可变化的。MAC PDU 包括一个或多个 MAC PDU 子头; 每一个子头对应于一个 MAC SDU、MAC 控制元素或填充位。图 3.11 所示为 MAC PDU 的结构, MAC PDU 子头的顺序和 MAC SDU、MAC 控制元素以及填充位出现的顺序是相应的, MAC 控制元素通常位于 MAC SDU 之前。除了一个字或两个字的填充之外, 填充位一般都位于 MAC PDU 格式的最后, 填充可以是任意值并且在接收端解码时会忽略, 对于一个 UE, 每次一个传输块只能携带一个 MAC PDU, 如果有两个传输块时, 物理层需要使用空间复用的传输方式才能携带两个 MAC PDU。

图 3.12 和图 3.13 所示为 MAC 头和子头格式的结构示意图^[25]。MAC PDU 子头域所代表的意义:

LCID: 逻辑信道指示域(5bit), 表示了与 MAC SDU 对应的逻辑信道实例。每一个 MAC SDU 有一个 LCID 域, 多个 MAC SDUs 可以与一个 LCID 值相对应。

MAC 的控制信息包含有多种类型，每种类型分别对应于不同的 LCID，上下行共享信道、多播信道的 LCID 域代表的信息意义如表 3.2、表 3.3、表 3.4 所示。

L: 长度域(7bit 或 15bit)，指示对应的 MAC SDU、MAC 控制单元的长度，除了最后一个子头以及固定长度的控制消息对应的子头，每一个子头都有一个 L 域，它的长度由 F 域指示。

F: 指示 L 域的长度(1bit)。若 MAC SDU 或 MAC 控制元素长度超过 128bytes，F 域的值设置为 1，否则设置为 0。通过 F 域的值，我们就可以知道对应的 L 值的大小了，也就是知道 MAC SDU 或者 MAC 控制单元的长度了，F 域与 L 域的对应关系如图表 3.5 所示。

E: 扩展域(1bit)，是一个标志位。当 E 为 1 时，意味着接下来存在另外一组 R/R/E/LCID 域，如果是 0，那么接下来就是 MAC payload 了。

R: 保留域，默认值为“0”。

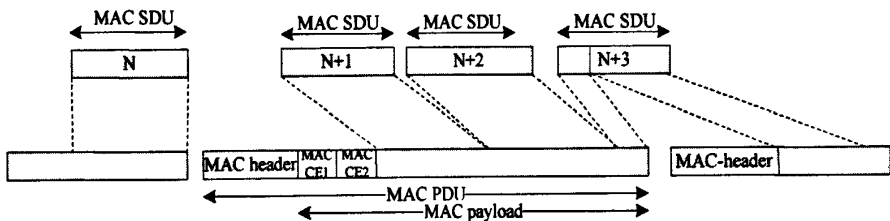


图 3.11 MAC SDU 复用成 MAC PDU 示意图

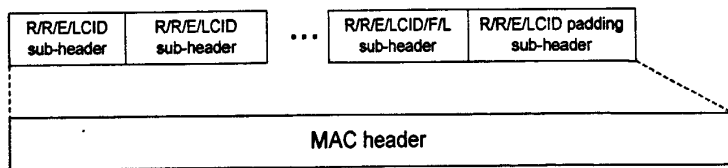
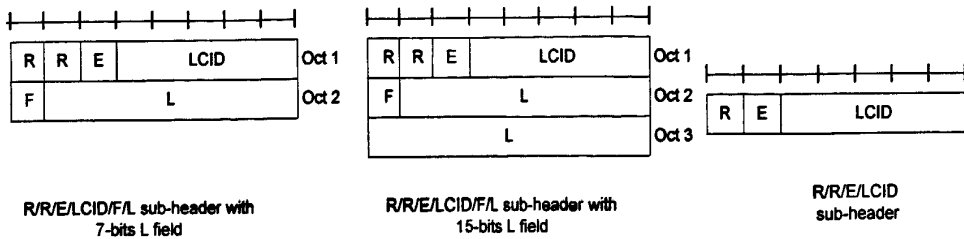


图 3.12 MAC PDU 的头格式

MAC PDU 子头由六个域 (R/R/E/LCID/F/L) 组成，但是对于最后一个子头、固定长度的 MAC 控制信息单元以及填充位对应的子头部，它们只包含四个域 (R/R/E/LCID)



3.13 R/R/E/LCID/F/L 及 R/R/E/LCID MAC 子头结构

表 3.2 DL-SCH 逻辑信道标识 LCID 信息

索引	LCID 域信息意义
----	------------

00000	CCCH
00001-01010	逻辑信道标识
01011-11011	保留
11100	UE 竞争解决标识
11101	时间提前量命令
11110	DRX 命令
11111	填充位

表 3.3 UL-SCH 逻辑信道标识 LCID 信息

索引	LCID 域信息意义
00000	CCCH
00001-01010	逻辑信道标识
01011-11001	保留
11010	功率余量上报 PHR
11011	C-RNTI
11100	截断 BSR
11101	短 BSR
11110	长 BSR
11111	填充位

表 3.4 MCH 逻辑信道 LCID 信息

索引	LCID 域信息意义
00000	MCCH (若没有 MCCH 映射到 MCH 信道上, 则 MTCH 使用该值)
FFS	MTCH
FFS	保留
11110	动态调度信息
11111	填充位

表 3.5 F 域标识信息

索引	F 域长度 (bits)
0	7
1	15

3.3.3.2 MAC 控制单元

① BSR MAC 控制单元

BSR MAC 控制单元包含短 BSR 与截断 BSR、长 BSR 两种。短 BSR 与截断 BSR 格式中包含逻辑信道组标识 LCG ID 和一个相应的缓存区大小指示域，如图 3.14 所示。长 BSR 包含有 4 个缓存区大小域，分别与编号为 0-3 的 LCG IDs 一一对应，如图 3.15 所示。

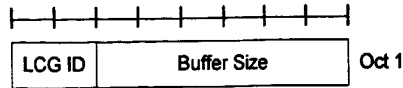


图 3.14 短 BSR 与截断 BSR 的 MAC 控制单元

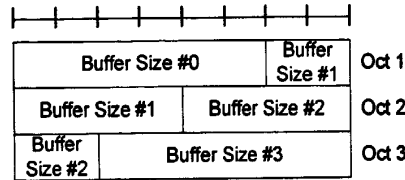


图 3.15 长 BSR 的 MAC 控制单元

LCG ID: 逻辑信道组标识，用于指示该 BSR 针对是哪一个逻辑信道组，2bit。

Buffer size: 缓存区大小指示域，用于指示 MAC PDU 数据封装完成后逻辑信道组中所有逻辑信道上的全部可用数据空间，数据量按字节 bytes 为单位上报。它包括在 RLC、PDCP 层进行传输的所有可用数据。RLC、MAC 头格式的大小不在 buffer size 数据空间考虑范围内。该字段长度为 6bits，指示了 64 种可能的缓存数据量取值范围。

② C-RNTI 控制单元

上行专用 MAC 控制单元，通过 MAC PDU 子头中的 LCID 进行标示，该控制单元较简单，占 16bits 只含有一个 C-RNTI 域且用于指示终端的 C-RNTI 值，如图 3.16 所示。

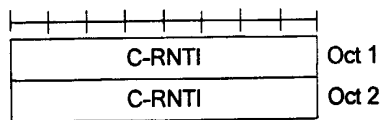


图 3.16 C-RNTI MAC 控制单元

③ UE 竞争解决标识 MAC 控制单元

当 MAC PDU 子头中的 LCID 域标识使用竞争解决 MAC 控制单元时，网络端包含该控制单元作为对 Msg3 消息的响应，该字段固定长度为 48bit，如图 3.17 所示。

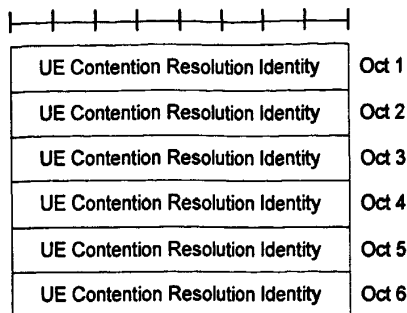


图 3.17 UE 竞争解决标识 MAC 控制单元

3.4 本章小结

上下行共享信道的数据传输过程 HARQ 错误改正、调度以及 MAC PDU 处理是 MAC 层连接状态下的重要过程。本章分别介绍了 HARQ 与资源调度过程，重点在于上下行链路的资源接收、HARQ 进程错误处理流程，除此之外，还分析协议中对 MAC PDU 信息格式组装与定义，为下一章的接口定义、流程设计做好理论知识储备。

第四章 MAC 层接口原语及流程设计

本章将重点对协议栈在实现过程中层间原语和 MAC 层状态划分的设计，这一部分内容是协议栈软件实现的重点及难点。状态划分和原语定义都是开发者根据协议进行设计，本文在精读 3GPP R8、R9 协议栈协议及 TD-SCDMA 系统开发设计原语的基础上，基于控制平面协议的分层结构、实现功能来定义层间通信原语，确定 MAC 层的状态划分和跃迁条件，画出状态跃迁图。

4.1 MAC 子层状态转移设计

根据 MAC 层提供的功能和服务，以及网络端与终端实现功能上的差别，可以将网络端 MAC 层分为以下几个状态：空状态 NUL、空闲状态 IDLE、接入状态 ACC 和连接状态 CON，其中 IDLE 和 ACC 状态统称为空闲模式，状态间的跃迁如图 4.1 所示。

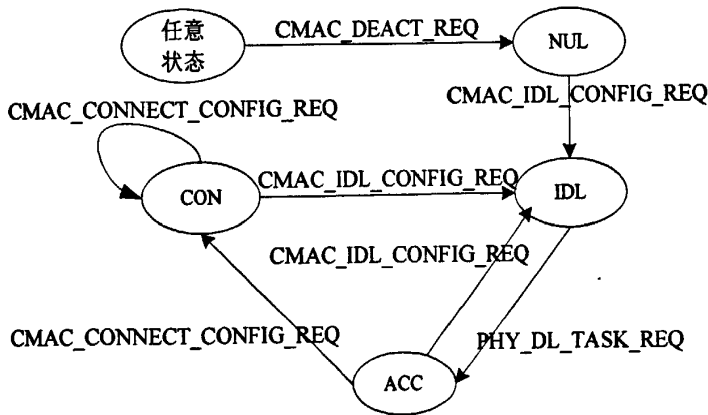


图 4.1 网络端 MAC 层状态跃迁总图

为了图形的清晰，图中只给出了引起状态跳转的信号，其他公共处理的信号没有在此图中反映出来。在任意状态下，当 MAC 子层收到 RRC 子层发出的 CMAC_DEACT_REQ 信号时清除当前 buffer 中的所有数据后跳转到 NUL 状态。在 NUL 状态下，MAC 层收到 RRC 层 CMAC_IDL_CONFIG_REQ 时，跳转到 IDL 状态，进行系统信息和寻呼消息的广播。在初始随机接入过程中，MAC 层接收到来自终端的前导请求上报 RRC 层后向 DSP 发送 PHY_DL_TASK_REQ 随机接入响应时，MAC 自动跳转到 ACC 状态，准备配合终端进行随机接入过程。随机接入成功完成以后，RRC 发送 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ，配置连接状态下的参数后 MAC 层进入 CON 状态，此后进行连接模式的数据接收与发送。

4.2 接口原语及子状态设计

4.2.1 层间接口原语设计

层间通信原语与层 3 消息 message 有相似的结构，但两者是不相同的。原语仅用于设备内部不同模块之间的通信，它所使用的接口是内部的；而消息则用于不同设备之间的信息传输，使用的接口/信道是外部的，其通信格式必须规范化，这也说明了原语及其参数的自定义性。进行原语接口定义时，根据 3GPP 协议结构图，向下层 MAC 存在与物理层的接口，向上层存在与 RRC 层的接口，在内部存在与 RLC 层接口，所以需要定义三个接口 MAC-RRC，MAC-RLC，MAC-PHY。

在实现时，为简化原语的定义，我们将 RLC 透明模式 TM 实体所完成的信息交互不经过 RLC 中转，而直接由 MAC 层来完成。在功能划分上，根据 3GPP 规范的层间功能划分体系，RRC 子层负责消息元素解析和管理无线资源，RLC 子层负责为上层提供确认和非确认模式的数据传输，MAC 子层负责传输信道与逻辑信道之间的映射及对物理层任务的调度。因此根据这种思想，对上行/下行链路由网络端发送的控制信息，RLC 子层完成 AM/UM 数据分段/重组上报 RRC，并由 RRC 对控制信息进行分析，实现对 RLC 和 MAC 子层的控制。基于此，MAC 与 RRC 的层间接口原语在表 4.1 示意出，MAC 与 RRC 层之间的接口模块如图 4.2 所示，基于篇幅关系，论文中无法将与 RRC 层相关的所有接口分别以成员名、参数取值的形式给出，只将与连接状态下关系较为密切的原语名作为代表举例说明，MAC-RRC 层的接口原语以 CMAC_RESET_REQ 进行参数设置说明，如表 4.2 所示。

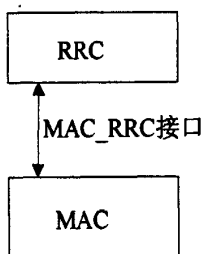


图 4.2 MAC-RRC 接口模块

表 4.1 网络端 MAC-RRC 接口原语定义

原语名	方向	主要参数	信号描述
CMAC_IDLE_CONFIG_REQ	RRC->MAC	系统信息个数、SI-window、SI[MAX_SI_NUM] (数组型)	RRC 请求 MAC 层向终端发送系统信息，同时 MAC 与 RRC 进入 IDLE 状态

CMAC_ACC_IND	MAC->RRC	终端能力 power	MAC 向 RRC 层指示接收到用户的随机接入请求。
CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ	RRC->MAC	Ue 优先级、驻留小区信息, C-RNTI、终端同步情况、SRB 与 DRB 信息	RRC 层配置低层进入连接状态, 请求建立 SRB2、SRB3 及 DRB 承载
CMAC_CCCH_INFO_REQ	RRC->MAC	事件原因, RRC 连接建立成功或 RRC 连接拒绝	网络端 RRC 请求 MAC 发送消息。(如 RRC 连接建立, Msg4)
CMAC_CCCH_INFO_IND	MAC->RRC	传输的数据块及其长度	MAC 层将透明模式传输的数据上报送给 RRC 层, 包括 RRC 连接建立请求消息等
CMAC_STATUS_IND	MAC->RRC	事件原因 (比如没有接收到 Msg3、HARQ 达到最大重传次数等)	状态指示, MAC 层向 RRC 报告一些特定事件发生的情况, 如随机接入失败、ACK/NACK 指示
CMAC_RESET_REQ	RRC->MAC	MAC 缺省配置: maxHARQ-tx=5 periodicBSR-Timer= 无穷大 retxBSR-Timer =sf2560 ttiBundling= false sr-ProhibitTimer=0 释放 DRX 和 PHR 配置	重建过程中确定重建原因后, 重置 MAC 层, MAC 层清除当前缓存器中数据及当前的进程, 释放资源, 利用缺省配置进行下一步骤
CMAC_DEACT_REQ	RRC->MAC	无 (单独信令, 无参数)	RRC 层请求 MAC 层去激活, 接收到该原语后进入 NULL 状态, 可以认为 MAC 进入一个非工作状态, 即非连接状态

CMAC_PCH_INFO_REQ	RRC->MAC	寻呼周期、寻呼时刻 (PCH 子帧时刻)、PCH 帧号偏移、RRC 层对 Paging 消息进行编码后的数据 bits	RRC 要求 MAC 层发送寻呼消息, 包括系统信息改变时也通过寻呼消息预先通知 MAC
-------------------	----------	---	--

在 MAC 与 RLC 层之间的接口模块, 如图 4.3 所示

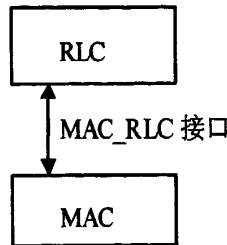


图 4.3 MAC 与 RLC 层之间的接口模块

MAC 与 RLC 之间接口原语定义见表 4.2:

表 4.2 MAC-RLC 层间接口原语

原语名	方向	参数	信号描述
MAC_DATA_IND	MAC->RLC	RB 标识 rbIdentity、PDU 数据块长度 pduSize、pduSize[MAX_PDU_SIZE]、保留位 reserved	MAC 向 RLC 上报接收到的 RLC PDU
MAC_DATA_REQ	RLC->MAC	RB 标识 rbIdentity、实际接收的数据块数 pduSize、数据块长度 DATA[MAX_PDU_SIZE]、	RLC 请求 MAC 发送 RLC PDU
MAC_STATUS_IND	MAC->RLC	buffer 剩余空间大小 spacelen、RB 标识、HARQ 反馈、保留位 reserved	指示 RLC 在下一个 TTI 可传送的数据块。RLC 通过该原语选择 RLC 实例与 RB 的映射关系

MAC 层与物理层之间可并行存在多条传输信道, 通过传输信道交换的内容多涉及对等层实体之间的通信, MAC 与物理层 PHY 之间的接口称为 DHI (Data High-speed Interface) 接口, DHI 接口模块如图 4.4 所示。

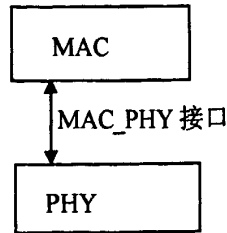


图 4.4 PHY 与 MAC 子层接口模块

DHI 接口原语定义如表 4.3 所示：

表 4.3 PHY 与 MAC 层接口原语

原语名	方向	参数	信号描述
PHY_IDLE_TASK_REQ	MAC->DSP	寻呼消息发送的 PCH 子帧, pcch-information、RRC 层已进行编码的消息数据等	MAC 层根据接收到的高层 idle 配置, 重配置物理层 IDLE 状态下的系统信息、寻呼消息的发送任务
PHY_RACH_RECE_IND	DSP->MAC	CRC 校验 (坏帧指示)、时间提前量 TA、前导索引、RN-RNTI 标识	通过该原语网络端 DSP 将收到的终端随机接入的请求指示给上层。
PHY_UL_RECE_IND	DSP->MAC	数据块数、数据块大小、CRC 校验指示、TTI 绑定、HARQ 信息、RNTI 标识等	物理层通知 MAC 在配置的传输信道上接收到了数据, CRC 校验结果指示数据是否已被正确接收。
PHY_DL_TASK_REQ	MAC->DSP	数据块数、数据块大小、传输格式选择 TF、发送子帧号、RNTI 标识、HARQ 信息	MAC 子层通过该原语请求物理层想对等层实体发送数据, 原语的发送基于每一个传输信道和传输时间间隔。
PHY_REDECODE_REQ	MAC->DSP	无	MAC 层请求物理

			层 DSP 模块对接收到的数据进行重新译码。
--	--	--	------------------------

4.2.2 MAC 层子状态设计

根据协议规范描述，可以将网络端的 MAC 模型分为四个子状态，本节将对 MAC 层状态跃迁总图 4.1 各个子状态的任务以及状态跃迁进行功能分析。

① 空状态 NULL

网络端在物理上电开机前处于 NULL 状态，在 NULL 状态下，网络不提供任何服务，当接收到 RRC 层发送 CMAC_IDLE_CONFIG_REQ 原语后，网络端将从 NULL 状态跃迁到 IDL 状态；无论 MAC 层处于哪一个状态，当高层使用 CMAC_DEACT_REQ 请求 MAC 释放层 2 连接时均返回到 NULL 状态。具体的跃迁图如图 4.5 所示。

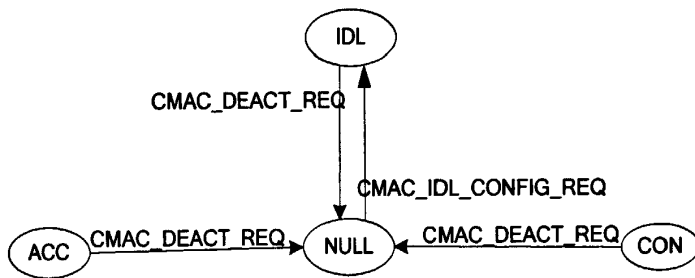


图 4.5 NULL 状态跃迁图

② 空闲状态 IDLE

IDLE 为 MAC 层的准备状态，在 IDLE 状态下网络端将主要完成以下任务：初始随机接入过程中前导信息的接收，上报 RRC 层指示接收到的前导参数值，向 PHY 层发送 RAR、控制定时器等。根据各种具体情况，MAC 层可以从 IDLE 状态跃迁到 ACC 状态、空状态 NULL。根据有限状态机原理，网络端处于 IDLE 状态下，将随机接入响应通过 PHY_DL_TASK_REQ 发送至物理层时自动跃迁到 ACC 状态。在 UE 端因为要考虑到随机接入过程失败存在 IDLE 跃迁到 IDLE 的情况，这与终端不同的处理过程相关，由于这种情形是网络支配的，所以在 IDL 状态下 MAC 就不用考虑被 RRC 重配置的情况。网络端进入连接模式 CON 时，当终端异常或无线链路失败，高层 CMAC_IDL_CONFIG_REQ 请求 MAC 层发送服务小区/邻近小区的系统信息时，MAC 层跃迁到 IDLE 状态。IDLE 状态跃迁如图 4.6 所示。

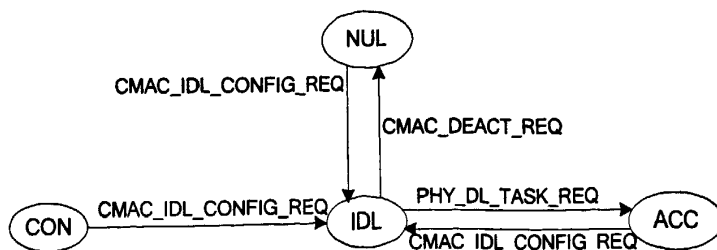


图 4.6 IDLE 状态跃迁图

③ 接入状态 ACC

在接入 ACC 状态下，MAC 子层需完成随机接入过程 Msg3、竞争解决的判决和操作。MAC 层处于该状态下，IDLE 态下开启的随机接入定时器时间内，如果无法接收来自终端的响应（Msg3）导致超时，则 MAC 层需通过原语 CMAC_STATUS_IND 上报 RRC 当前失败状态，通知 RRC 进行后续处理。当随机接入过程成功完成后，RRC 层立即通过 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ 原语指派低层建立 SRB2、SRB3 或 DRB，与此同时，RLC、PDCP 也被配置进入连接状态，进行连接数据的发送与接收。ACC 状态跃迁图如图 4.7 所示。

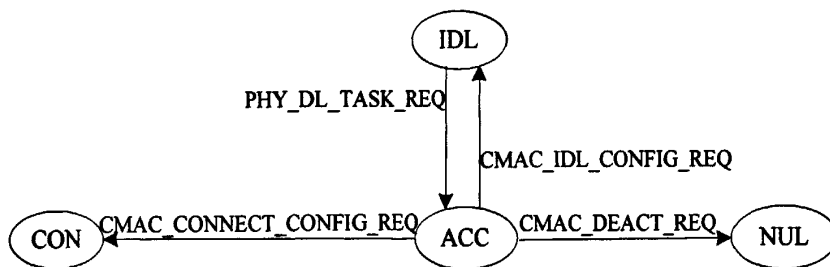


图 4.7 ACC 状态跃迁图

④ 连接状态 CON

若随机接入成功，LTE 系统的 UE 及 eNB 会进行正常的连接及数据传输，当 eNB 端 MAC 层处于 ACC 状态下，RRC 层 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ 配置无线承载参数后，MAC 层进入 CON 状态。LTE 系统中的切换属于硬切换，当终端需要切换到新小区或新跟踪区时，由网络直接配置新小区或跟踪区的参数从而实现 CON 到 CON 状态的跃迁。图 4.8 给出了 eNB 端 CON 状态转移图。如前所述，如果遇到非正常关机或其他特殊情况，MAC 层就会由 CON 状态跃迁到 NUL 状态，此次状态是由 RRC 通过原语 CMAC_DEACT_REQ 请求 MAC 进入到 NUL 状态，MAC 层状态的跃迁几乎都是由 RRC 控制的，只要收到 RRC 的状态转移请求原语，都会进行相应的状态跃迁。与 ACC 状态相似，MAC 层不会一直处于 CON 状态，当遇到两种情况时，MAC 层不会处于 CON 态，也无法直接跃迁到 ACC 状态，而是会由 CMAC_IDL_CONFIG_REQ 跃迁到 IDLE 状态。

(1)低层的无线链路失败时需要重建,此时 RRC 通过 CMAC_IDL_CONFIG_REQ

请求 MAC 从状态 CON 跃迁到 IDL。

(2)eNB 没有收到 UE 端发送的 RRCConnectionSetupComplete 消息, RRC 层发送 CMAC_IDLE_CONFIG_REQ 请求 MAC 跃迁到 IDL 状态。

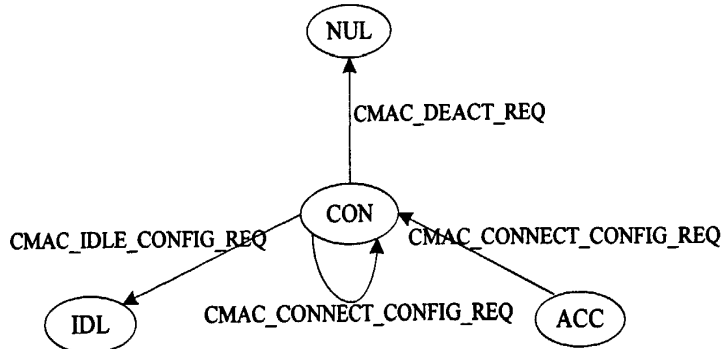


图 4.8 CON 状态跃迁图

4.3 MAC 层连接模式流程设计

4.3.1 MO 呼叫建立过程设计

① 发送系统信息过程

综测仪开机之前协议栈各层均处于 NULL 状态, 当非接入层通过 EMMAS_ACT_REQ 原语请求 RRC 层发送系统信息给终端, RRC 层接收到原语信号后, 负责主信息块 MIB、SIB 的调度帧号、周期调度, 通过规划表的形式对发送的 SIB 进行分块调度。

RRC 层通过 CMAC_IDLE_CONFIG_REQ 请求 MAC 层发送系统信息, MAC 层通过 PHY_IDLE_TASK_REQ 请求物理层发送层 3 消息到终端, MAC 层负责规划物理层发送系统信息的调度帧等。寻呼消息用于通知系统信息改变或通知处于 IDLE 状态的终端寻呼信息。

② 随机接入过程

根据基于竞争模式的随机接入过程, 物理层 PHY_UL_RECE_REQ 接收来自终端的随机接入前导, MAC 利用 CMAC_ACC_IND 向 RRC 层指示接收到用户的随机接入请求, 此时 RRC 层开启随机接入定时器 T400, 多个 UE 在同一个随机接入机会中发送不同的前导码都能够被 eNodeB 正确检测, 当网络端 RRC 层在接收到 RRCConnectionSetupComplete 消息后才会关闭 T400。eNodeB 根据前导码序列与 RA-RNTI 生成随机接入响应的 MAC PDU, PHY_DL_TASK_REQ 将含有 MAC PDU 的数据传送到终端并由 MAC 层进行解码。终端在分配的上行资源中发送含有 RRCConnectionRequest 消息的 MAC PDU 至网络, RRC 接收到来自 MAC 层的

CMAC_CCCH_INFO_IND 信号时停止 T400 并反馈 CMAC_CCCH_INFO_REQ 竞争解决信息, 当网络侧 MAC 层 CRC 校验成功、HARQ 反馈 ACK 时, 同时通过 PHY_DL_TASK_REQ 发送含有 RRCConnectionSetup 消息与 MAC 控制单元(UE 竞争解决标识)的 MAC PDU。随机接入过程完成后, MAC 根据 RRCConnectionSetup 消息中的内容配置 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ 进入连接状态。

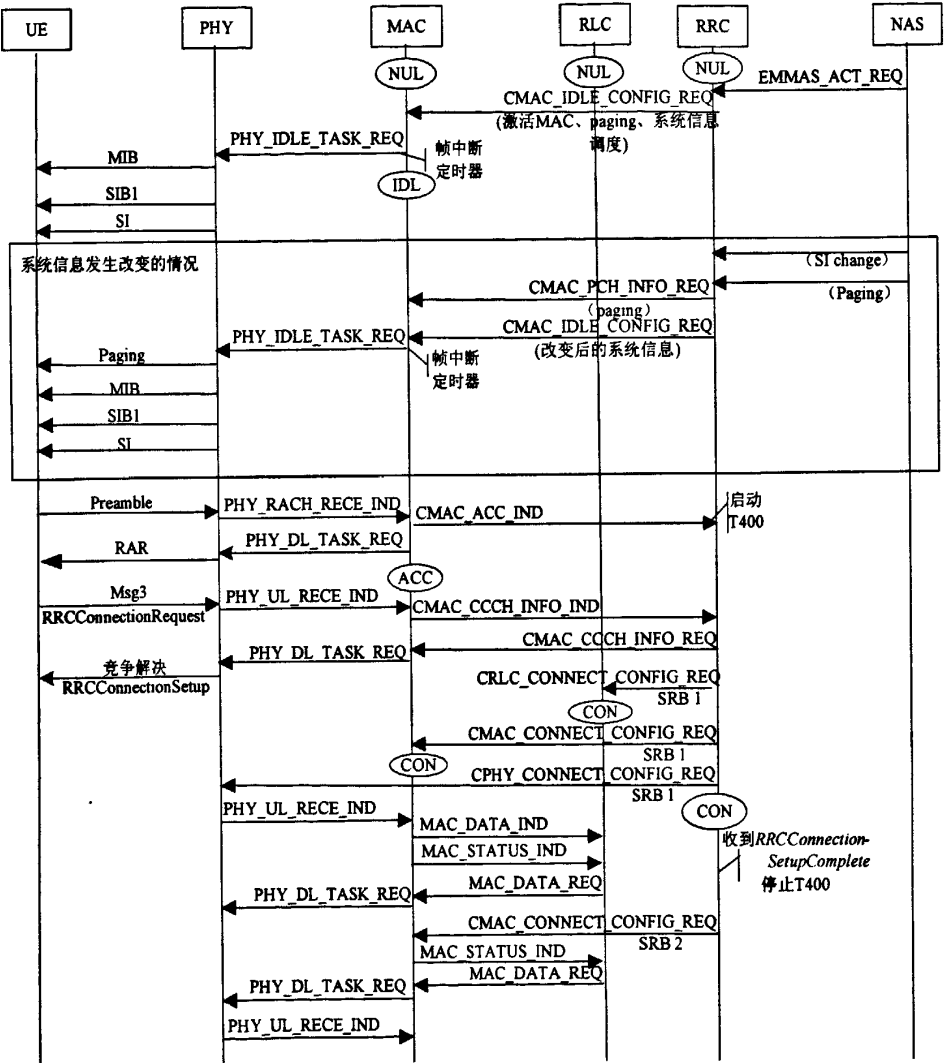


图 4.9 MO 的正常流程

③ 连接数据传输过程

在正常连接状态下, MAC 层只与 RLC、PHY 层进行数据交互, 这其中涉及到的重建、HARQ 异常过程将在随后设计介绍。

RRC 向 MAC 层发送 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ。其中包含有传输连接状态下所需要 RB, DRB 配置以及 DRX 参数设置。

RRC 向 PHY 层发送 CPHY_CONNECT_CONFIG_REQ 进行专用数据配置, 包括配置 PDSCH、PUSCH、PDCCH 的公共与专用传输所用到的参数。此后 RRC 层

状态跳变到 CON 状态。

MAC 接收来自终端的数据，进行 MAC SDU 与 MAC PDU 转换后 MAC_DATA_IND 传输给 RLC，同时向 RLC 发送 MAC_STATUS_IND 告知 MAC 当前的 buffer 数据存储状况以便 RLC 进行数据的组装。

RLC 根据 MAC 层上报的 buffer 参数设计数据传输格式并找出 RB 与逻辑信道、RLC 实例的对应关系，并将这些参数和专用数据一并发给 MAC 层。

- 1) MAC 将专用数据传输发送 PHY_DL_TASK_REQ 至物理层，包括 HARQ 反馈等。物理层通过 RRC 在第 2 步所传输的物理信道配置来发送数据。
- 2) MAC 等待终端的反馈。物理层通过 PHY_UL_RECE_IND 将终端的反馈上报给 MAC 层的 HARQ 实体。如果为 ACK，MAC 层清空下行数据的 buffer 并且进行上行数据的接收。如果为 NACK，则进行一次数据重传，如果重传次数超过了最大重传次数，则放弃本次传输同时向 RRC 上报错误。
- 3) MAC 层接收来自终端的上行数据，并通过 PHY_DL_TASK_REQ 向终端反馈数据接收情况。
- 4) MAC 将接收到的数据通过 MAC_DATA_IND 上报给 RLC。
- 5) RLC 通过 UM 或 AM 模式将数据上报给 RRC。

网络端 MAC 流程设计总图如图 4.9 所示。

4.3.2 连接重建过程设计

当终端与网络建立 RRC 连接后，两者各层都进入连接状态，此时若终端 AS 安全性已经激活，如果满足以下任意一种情况，网络端都将进入 RRC 重建过程：

- ① 接收到物理层的非同步指示；
- ② 切换失败；
- ④ 来自 E-UTRAN 的移动性失败（从 LTE 系统切换到其他系统）；
- ④ PDCP 层的完整性校验失败；
- ⑤ RRC 连接重配置失败。

当 RRC 进行 RRC 连接重建过程时，重置 MAC 层并进行缺省 MAC 参数配置。CMAC_RESET_REQ 接口中设置下列参数配置：maxHARQ-tx=5，periodicBSR-Timer=无穷大，retxBSR-Timer=sf2560，ttiBundling=不可用，参数 drx-Config 设置为释放 DRX，phr-Config 释放，sr-ProhibitTimer=0

在 RRC 连接重建过程中，终端需要进行小区重选择、随机接入过程、RRC 连接重建过程，重建情况下的消息流程图如图 4.10 所示。

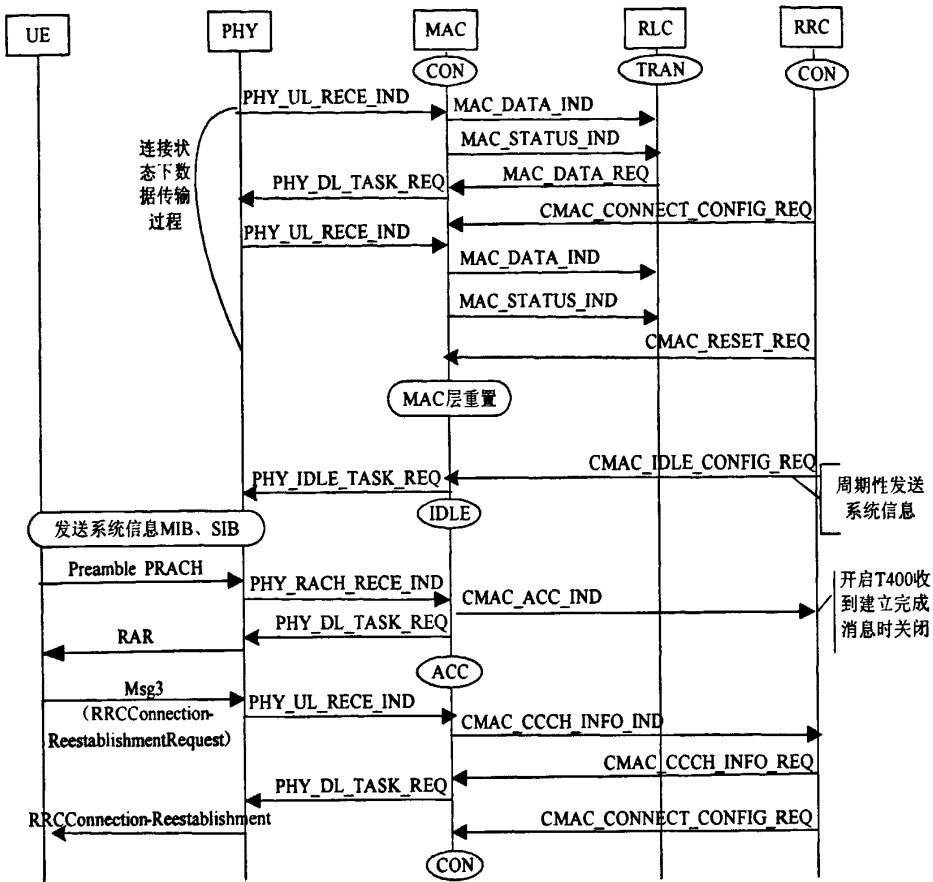


图 4.10 CON 状态下终端异常 (RRC 连接重建)

为了更清晰说明该过程，我们标示了连接状态下的周期性系统信息的发送，终端需进行测量、读取小区系统信息。当选择合适的小区驻留后，发起随机接入请求。重建过程与正常的随机接入过程处理相比较，区别在于 Msg3 消息中的 MAC PDU 是 RRCConnectionReestablishmentRequest 信息，在 RRC 层消息中指明重建原因：“reconfigurationFailure”、“handoverFailure”或者“otherFailure”。对于 MAC 来说，连接状态下存储于 buffer 中的数据因重建过程而丢弃。

当 MAC 层接收到 CMAC_RESET_REQ 请求时，MAC 层停止正在运行的所有定时器，将下行 HARQ 进程的 NDI 值设置为 0，取消所有 DL HARQ 进程的缓存器，对于每一个 DL HARQ 进程，认为下一个 TB 内接收到的数据传输都是新数据。在设计实现过程中，为了更清晰区分初始 RRC 连接建立与 RRC 连接重建过程，将 MAC 重置后仍需向终端发送系统信息等信息，其参数配置、MAC 规划与初始过程相一致。当终端读取系统信息、选择适合的小区驻留后，重新向网络端发起前导进行基于竞争解决的随机接入过程。当 MAC 层接收到前导后通过 CMAC_ACC_IND 向 RRC 层指示已正确接收，在 PHY_DL_TASK_REQ 中发送已经组装有 MAC PDU 的随机接入响应，MAC PDU 负载部分包括有终端用于上行时间校准的时间提前命

令 timing Advance Command, UL-grant 和临时 C-RNTI。当终端正确接收到 RAR 时, 向网络发送包含有“RRCConnectionReestablishmentRequest”的 Msg3, 网络端在 Msg3 缓存器中取得 MAC PDU 数据后进行解复用操作, 将 MAC SDU 通过 CMAC_CCCH_INFO_IND 传送给 RRC 层, RRC 通过 CMAC_CCCH_INFO_REQ 与 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ 配置 MAC 层参数进入连接状态并把“RRCConnectionReestablishment”消息发送至终端。

4.3.3 HARQ 异常处理过程设计

经过对 3.3.1 小节对下行 HARQ 所做的研究, HARQ 进程的异常包括 CRC 校验失败、MAC PDU 解码不成功和反馈 NACK 三种情况, 随机接入过程中的第 3 和第 4 步 (Msg3 与竞争解决)、连接状态下的业务数据流也均使用到 HARQ 机制。下面分别针对下行 HARQ 进程的异常处理进行分析与设计。

4.3.3.1 HARQ 进程异常处理 (CCCH)

网络端处于 RRC_IDLE、MAC_ACC 状态且 RRC 连接建立过程已经初始化, 此时只建立了 CCCH、RLC 透明模式 TM 实体, 业务信道及 AM、UM 模式均未配置专用参数, CCCH 信道的 HARQ 进程异常处理流程如图 4.11 所示。

① 终端初始化随机接入过程, 在 PRACH 信道上向网络发送前导 preamble, MAC 接收到 PHY_RACH_RECE_IND 前导后, CMAC_ACC_IND 上报给 RRC 层。MAC 通过 PHY_DL_TASK_REQ 对终端的随机接入响应, RAR 中包含有 RA-ID 与临时 T-RNTI, 同时进入 ACC 状态等待来自终端的 Msg3 消息。

② 网络端收到由临时 C-RNTI 扰码的 MAC PDU, 但不能被正确解码, 此时对于相应的 HARQ 进程, 将在 PHY_DL_TASK_REQ 发送 NACK 应答。

③ 终端根据 maxHARQ-Msg3Tx 最大重传次数重新发送 Msg3, 网络侧收到由临时 C-RNTI 扰码的 MAC PDU 且被正确解码, 此时对于相应的 HARQ 进程存储 ACK 应答并将数据 CMAC_CCCH_INFO_IND 送往高层。

④ RRC 层通过 CMAC_CCCH_INFO_REQ 发送 RRCConnectionSetup 消息, MAC 层在 MAC PDU 中包含 RRC 层消息、UE 竞争解决标识控制单元和 HARQ 进程 ACK 反馈利用 PHY_DL_TASK_REQ 发送到终端。

⑤ 根据 RRCConnectionSetup 消息中的参数通过 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ、CRLC_CONNECT_CONFIG_REQ、CPDCP_CONNECT_CONFIG_REQ、CPHY_CONNECT_CONFIG_REQ 配置下层连接状态参数。为了图示更简洁清晰, 此图略去 RLC、PDCP、PHY 的连接专用数据

传输配置。

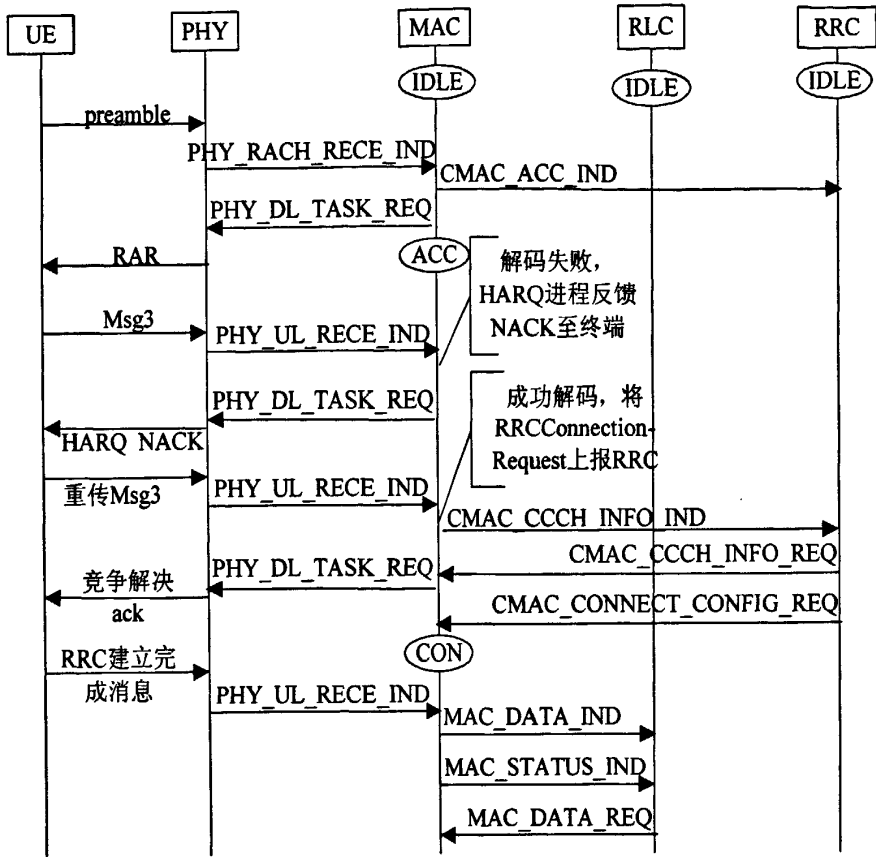


图 4.11 Msg3 消息不能成功解码后反馈 NACK 后重传

⑥ 网络端物理层根据 RRC 配置的物理信道接收终端的 RRC 连接响应, 并通过 PHY_UL_RECE_IND 通知 MAC 层, 包含有终端作为对 RRCConnectionSetup 消息响应的 RRCConnectionSetupComplete 的 MAC PDU。

4.3.3.2 HARQ 进程错误处理 (DCCH/DTCH)

DCCH/DTCH 信道的 HARQ 进程错误处理过程如图 4.12 所示, 网络端处于 E-UTRA RRC_CONNECTED、RLC_TRAN、MAC_CON 状态:

① 物理层 PHY_UL_RECE_IND 上报来自终端 MAC 层 HARQ 进程新的 MAC PDU 数据, 但其不能正确解码, 此时网络端通过 PHY_DL_TASK_REQ 对相应的 HARQ 进程发送一个 NACK。

② 终端在 PUSCH 上重传 MAC PDU 且其 CRC 校验成功, 此时网络端仍通过 PHY_DL_TASK_REQ 对该 HARQ 进程发送一个 ACK 反馈。

③ MAC 将接收到的重传数据通过 MAC_DATA_IND 上报给 RLC, 同时通过

MAC_STATUS_IND 告知 RLC 当前 buffer 空余情况以便 RLC 进行数据分段组装。

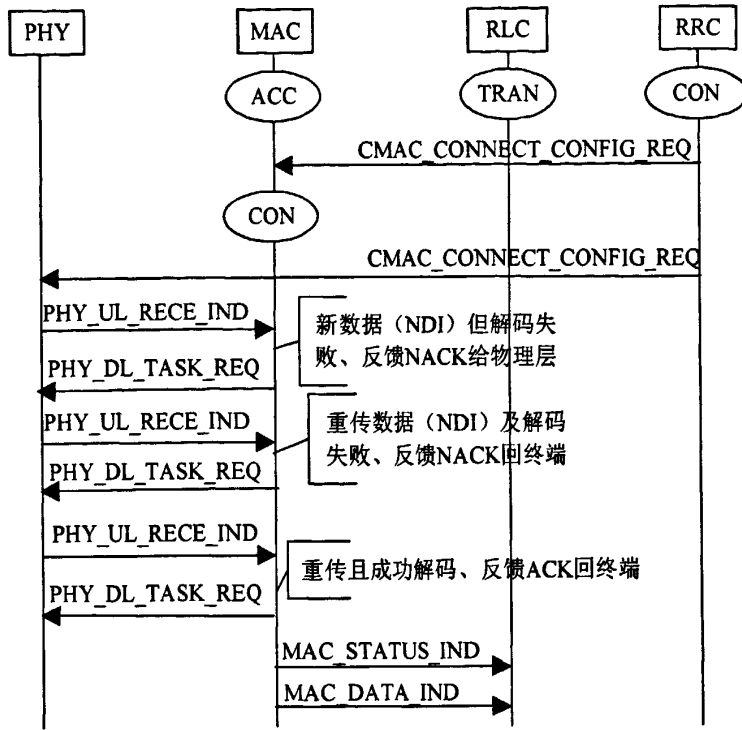


图 4.12 DCCH/DTCH 信道 HARQ 解码失败处理

4.3.3.3 UL-SCH 数据 HARQ 进程错误处理

对于上行链路共享信道的数据传输，HARQ 进程错误处理流程如图 4.13 所示，此时网络端处于 RRC_CONNECTED、MAC_CON 状态，且 DRB 已经建立好，RRC 通过 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ 配置 MAC 连接状态的参数 maxHARQ-Tx=2，在本设计方案中，MAC 层实体仅支持单个 HARQ 进程进行数据转发。

① RLC 通过 MAC_DATA_REQ 请求 MAC 有数据需要发送，其中新数据通过 RLC SDU SN=1 标识，MAC 层将 MAC SDUMAC 头会利用 RV=0 的冗余版本在 HARQ 进程=2 上进行新 MAC PDU 的传输。

② 终端对 MAC PDU 正确解码并反馈一个 ACK，MAC 层通过 MAC_DATA_IND 通知 RLC 可以发送新数据，同时 MAC_STATUS_IND 告知当前 buffer 状态。

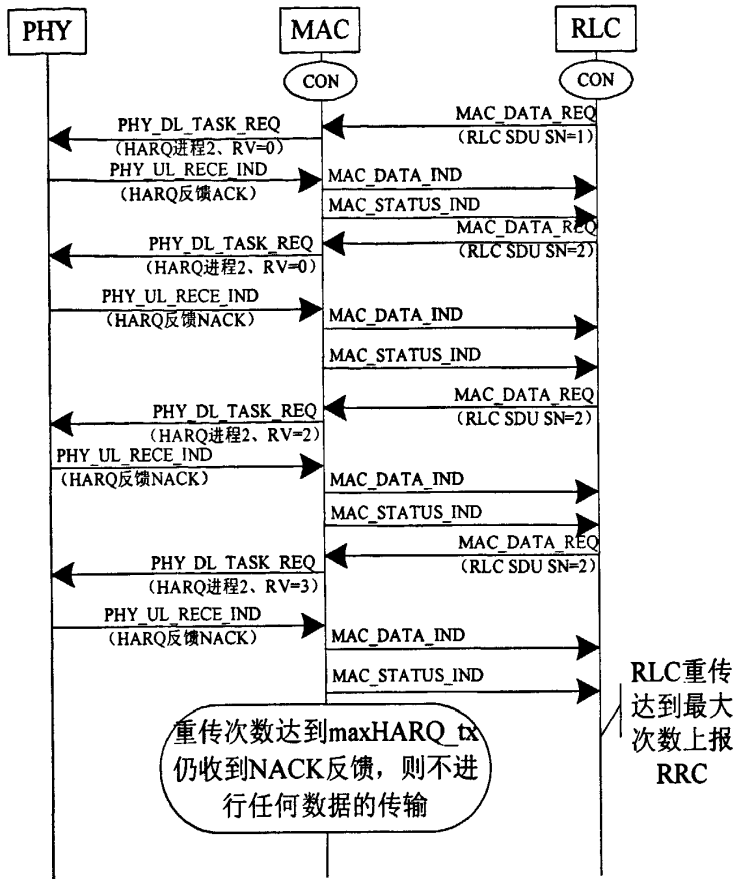


图 4.13 上行 HARQ 错误处理

③ RLC 发送包含有 RLC SDU SN=2 的新数据，MAC 对 SDU 进行加头、控制元素、填充组装后在 RV=0、2 进程上发送 MAC PDU。

④ 终端出现异常反馈 NACK，这是本 MAC PDU 收到的第一个 NACK 反馈，网络端将会按照 0,2,3,1 的冗余版本顺序进行自适应重传。

⑤ RLC 重传包含有 RLC SDU SN=2 的数据，MAC 在 RV=2,2 进程上发送 MAC PDU，等待终端对数据的 HARQ 返回反馈。

⑥ 终端仍旧无法对数据正确解码后对重传数据反馈 NACK，这是重传 MAC PDU 收到的第二个 NACK 反馈，网络端将会按照 RV=3 的冗余版本再次进行自适应重传。

⑦ 网络端物理层 PHY_UL_RECE_IND 收到终端的 NACK 反馈，MAC PDU 的重传次数达到了 maxHARQ-Tx = 2 而此时又收到一个 NACK，网络 MAC 层将丢弃 buffer 中数据不再进行传输。

4.3.4 MAC PDU 与 SDU 处理设计

MAC 层处于连接状态时, 需要完成来自 RLC 及物理层的数据加头/去头、填充 Padding, 即 MAC PDU 与 MAC SDU 之间的转换。根据 3.3.3 节介绍的 MAC PDU 结构格式、各个字段域代表的信息, 设计连接状态下 MAC PDU 处理反馈过程, 以检验接收方是否能将数据正确解码。在该设计测试例第二部分中, 假设终端(外部环境)已经将不同逻辑信道的数据分装在 MAC SDU 中, 逻辑信道的数据参数配置如表 4.5。此时 MAC 层处于 CON, 在这个过程中, MAC 状态没有发生变化, 网络端 MAC 层对接收到的 MAC PDU 处理流程如图 4.14 所示,

情况 1: 物理层接收终端 DRB1 封装的在逻辑信道标识为 3 上的 120byte MAC SDU

物理层在 PHY_UL_RECE_IND 内的参数 tbsize 设置为 120byte 上报给高层, 网络 MAC 对接口内参数进行必要的存储与去头后剥离出 MAC PDU, 在头格式中, 当 MAC SDU 长度超过 128byte 时, “F”域设置为 1。

在 MAC 对终端数据正确解码后, MAC_STATUS_IND 指示高层当前缓存区的空间余量后通过 MAC_DATA_IND 将数据转发至 RLC。

待下一次高层 MAC_DATA_REQ 的数据回发, MAC 把前一次上行数据的反馈 PHY_DL_TASK_IND 告知终端, 指示其能进行后续数据的发送。

表 4.5 逻辑信道配置测试参数

参数配置	DRB1	DRB2
逻辑信道标识	3	4
逻辑信道优先级	7	6
优先级比特率	0kbs	0kbs
逻辑信道组	2	1

情况 2: 接收终端 DRB1 封装的在 LC-ID=3 上的 11byte MAC SDU, DRB2 封装的在 LC-ID=4 上的 8byte MAC SDU,

情况 2 的设计思想与消息流程图与情况 1 类似, 在这里主要设计 MAC 子头中各字段域的理论取值。对于逻辑信道标识为 3 与 4 的数据, 根据其逻辑信道优先级排序, 将高优先级的数据首先装载到 MAC PDU 中。高优先级的 DRB1 数据长度为 11byte, 头类型是“L”域为 7bit 的子头结构, 将 LCID 设置成为“00011”, “F”域为“0”, 同时还存在优先级较低的 DRB2 数据需要传输, 扩展位“E”设置为 1; DRB2 数据对应的 MAC 子头是最后一个子头, 所以子头类型是不含有“L”域 R/R/E/LCID, 设置 E=0(接下来的比特位是 MAC 负载)和 LCID=00100。

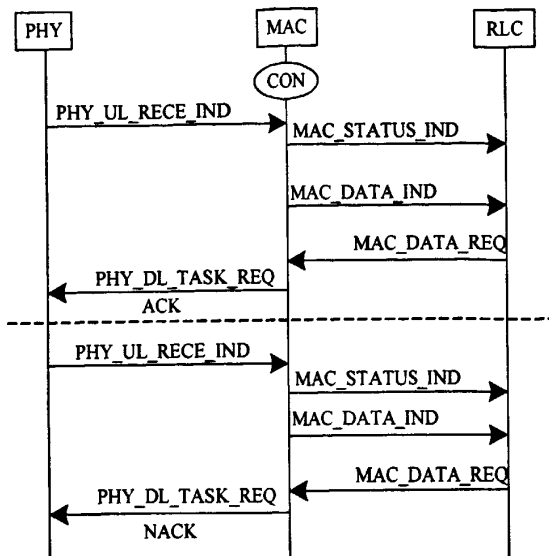


图 4.14 MAC PDU 头处理

4.4 本章小结

本章主要提出了 LTE 网络端 MAC 层的协议设计方案，包括总体接口设计、状态划分、状态跃迁条件，分别定义了 MAC 层与 RRC、RLC 层、物理层的层间接口原语以及参数设置。重点在于对连接状态下数据传输、HARQ 进程的错误纠正流程、数据 MAC PDU 发送与接收流程进行设计，为第五章的仿真测试打下基础。

第五章 LTE 系统 MAC 层协议连接模式仿真与测试

5.1 SDL 与 TTCN 协仿真

近年来,随着通信标准在电信领域内应用的增长和通信软件的日益庞大,对协议标准有效性的验证和通信软件的一致性测试显得非常重要。在实现 LTE 网路端高层协议时,我们采用 Telelogic AB Tau 的产品 SDL and TTCN Suite4.0 作为开发测试工具^[26]。SDL and TTCN Suite4.0 是一个集仿真、开发、测试为一体的软件工具,完全满足高层协议开发和一致性测试的需求。因此,在系统实现时,采用 SDL 和 C 语言相结合的方式,在 C 语言中通过条件编译来控制仿真测试,这样的做法是为了同时满足仿真测试和在线测试的需要。经过 SDL 仿真测试过的代码可以直接下载到目标板上进行在线测试而不做任何改动。在仿真测试时,采用 TTCN 编写测试例,通过 SDL and TTCN Suite4.0 提供的 SDL 和 TTCN 协仿真功能来进行测试,完成错误修改。

5.1.1 SDL 软件开发描述

在协议软件的开发过程中,SDL 经常被应用在系统规范描述和设计阶段,它能完全独立于硬件实现与操作系统。SDL 软件不仅可以用于规范描述和设计,用户还可以在 SDL 的描述设计中嵌入 C 代码,从而完成实现功能。SDL 系统的理论模型是基于有限状态机的,各进程并行处理,进程间使用信号传递信息。除用于协议软件的开发外,SDL 还被广泛用于如工业进程控制、交通控制等领域。

作为规范描述语言,SDL 具有两种不同的形式:SDL 图形表示法 SDL/GR 和 SDL 正文短语表示法。前者的基础是一套标准化了的图形符号,后者的基础是类似于程序的语句。两种表示法表示相同的 SDL 概念,图形表示法的优点是能清楚地显示系统的结构并易于看清控制流程;而正文短语表示法则适合于计算机输入。一个 SDL 系统一般由系统——功能块——进程——过程等几级组成。SDL 语言本身的构成就提供了一个结构化的思想,因此利用它进行系统软件开发是完全符合软件工程结构化设计的要求,从层次关系来看,SDL 系统可用图 5.1 来表示。

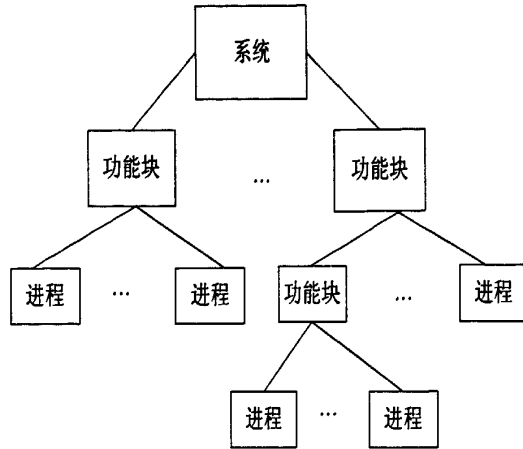


图 5.1 SDL 系统层次关系

5.1.2 TTCN 测试原理

TTCN (Tree and Tabular Combined Notation、树表结合表示法)^[27]是国际标准化组织 ISO 推荐的一种专门描述测试集的半形式化的描述语言,它具有明确的语法和语义,且是可执行的,用以描述独立于任何实现的通用测试集。它针对测试领域,提供了许多有用的元素,目前已经发展成为一种通用的测试规格语言^[28]。树表结合表示法,顾名思义就是采用以树和表格为表示形式的测试表示法,其中表格主要用于原语、数据类型、协议观察点和约束等,而树则用于描述测试集、测试例和测试步等等。TTCN 是一种独立于协议、测试设备和测试方法的抽象语言,因此被广泛运用于通信协议测试中。

根据 ISO/IEC 9646 的定义, TTCN 需要满足以下几项需求^[29]:

- ① 测试系统能够定义和构造发送和接收被测试实体 (IUT) 的抽象服务原语 (ASP)。
- ② 能够定义和构造嵌入在 ASP 中的协议数据单元 (PDU)。
- ③ 在指定控制和观察点 (PCO) 上,能够规定 ASP 的发送或接收顺序,能够构造测试例。

TTCN 采用黑盒测试方法进行测试,其测试模型如图 5.2 所示, IUT 作为被测测试实体,是一个或多个协议的实现,通过选择 IUT 与测试环境的接口进行测试,对于 TTCN 测试系统而言,它无需知道 IUT 这个黑盒子内部是如何实现的,将 TTCN 与 SDL 嵌入的 C 代码联合使用,只需要通过观察点 (PCO) 来验证这个黑盒子收到预定的信号 (ASP) 是否能产生预期的输出效果,同时检查生成的消息序列图 (MSC) 和数据流,达到查找错误的目的。

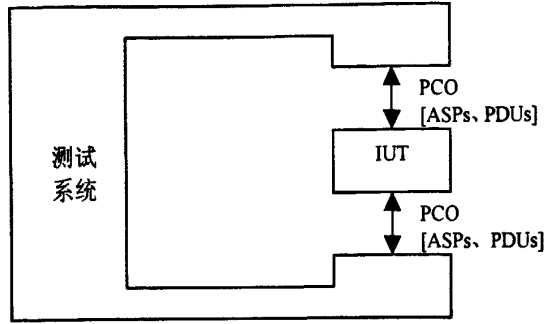


图 5.2 TTCN 测试模型

5.2 MAC 子层协议测试模型

基于网络端 MAC 层的 SDL 完整实现过程如图 5.3-5.10 所示，它包括 MAC 系统、功能块、MAC 进程和进程中调用的过程。为了实现对 MAC 模块的测试，需要建立相应的测试环境，RRC、RLC 和 PHY 模块作为 MAC 的测试环境。MAC 与此 3 个模块之间的信息交互都视为与环境间的交互^[30]。

5.2.1 系统级图

系统图是由许多用信道连接起来的功能块组成，每一个功能块相对于其他外部环境而言都是独立的，在不同功能块的进程之间，通常的手段是发送原语信号。

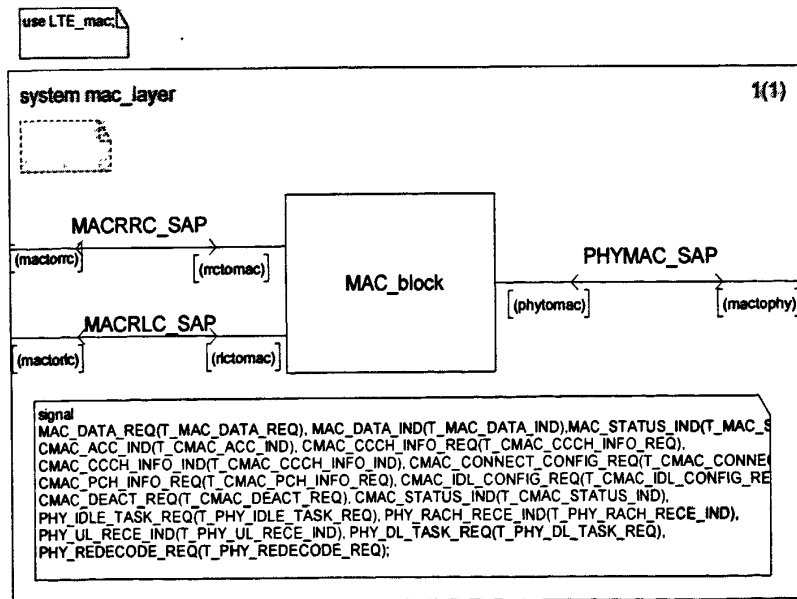


图 5.3 MAC 层系统图 (MAC 块、信道组成、信号定义)

图 5.3 是利用 SDL 画出的 MAC 系统图，MAC 模块与上下层之间分别通过

MACRRC_SAP、MACRLC_SAP、PHYMAC_SAP 信道进行交互，与 MAC 层有关的所有信号、状态变量都定义在图中的信号定义中，规定了系统功能块之间或功能块和环境之间交互的信号类型，包括信号传递值的类型。

5.2.2 功能块图

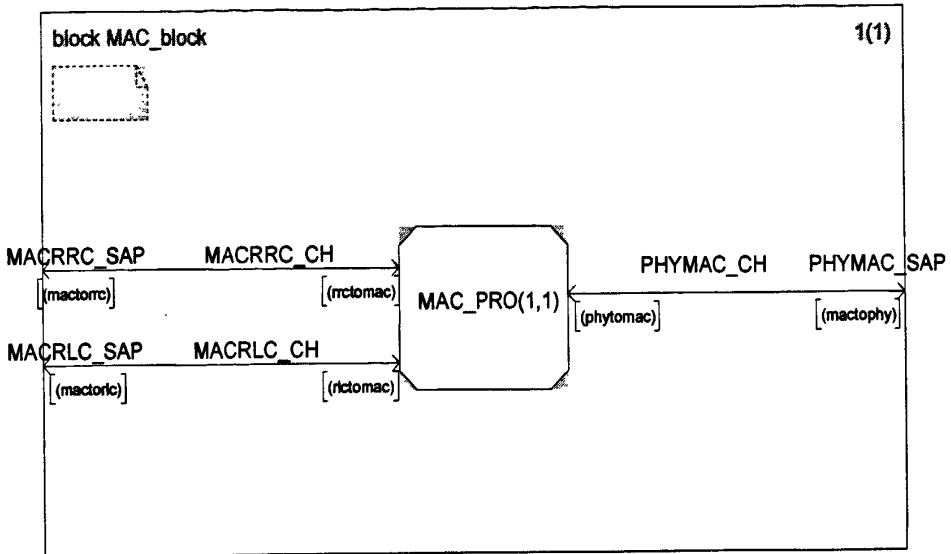


图 5.4 MAC 层功能块图

在设计 LTE-MAC 系统时，先把 MAC 系统分解成功能单位，在本设计方案中，我们将 MAC 定义功能块中的一个进程，功能块外面的信道和内部的信号路由间的连接通过 MACRRC_CH、MACRLC_CH、PHYMAC_CH 来标识。

5.2.3 进程级图

进程图详细体现了 SDL 中调用 C 语言的设计过程；进程是一个扩展的有限状态机，基本上处于等待信号的状态；根据有限状态机理论，一个进程可以包含许多不同的状态，当处于某个状态时，如果有信号（或同一信号）到达该进程时，执行不同的行为动作，根据收到的具体信号做完相应的全部动作以后，就进入下一个状态，这时等待下一个信号，进程能够一直存在下去，也可以执行一个停止动作而停止^[31]。图 5.5 和 5.6 是 MAC 层在连接状态下接收到不同信号时所执行的动作。本文以在连接 CON 状态下收到的“MAC_DATA_REQ”的调用，它完成 MAC SDU 的重组和分析。

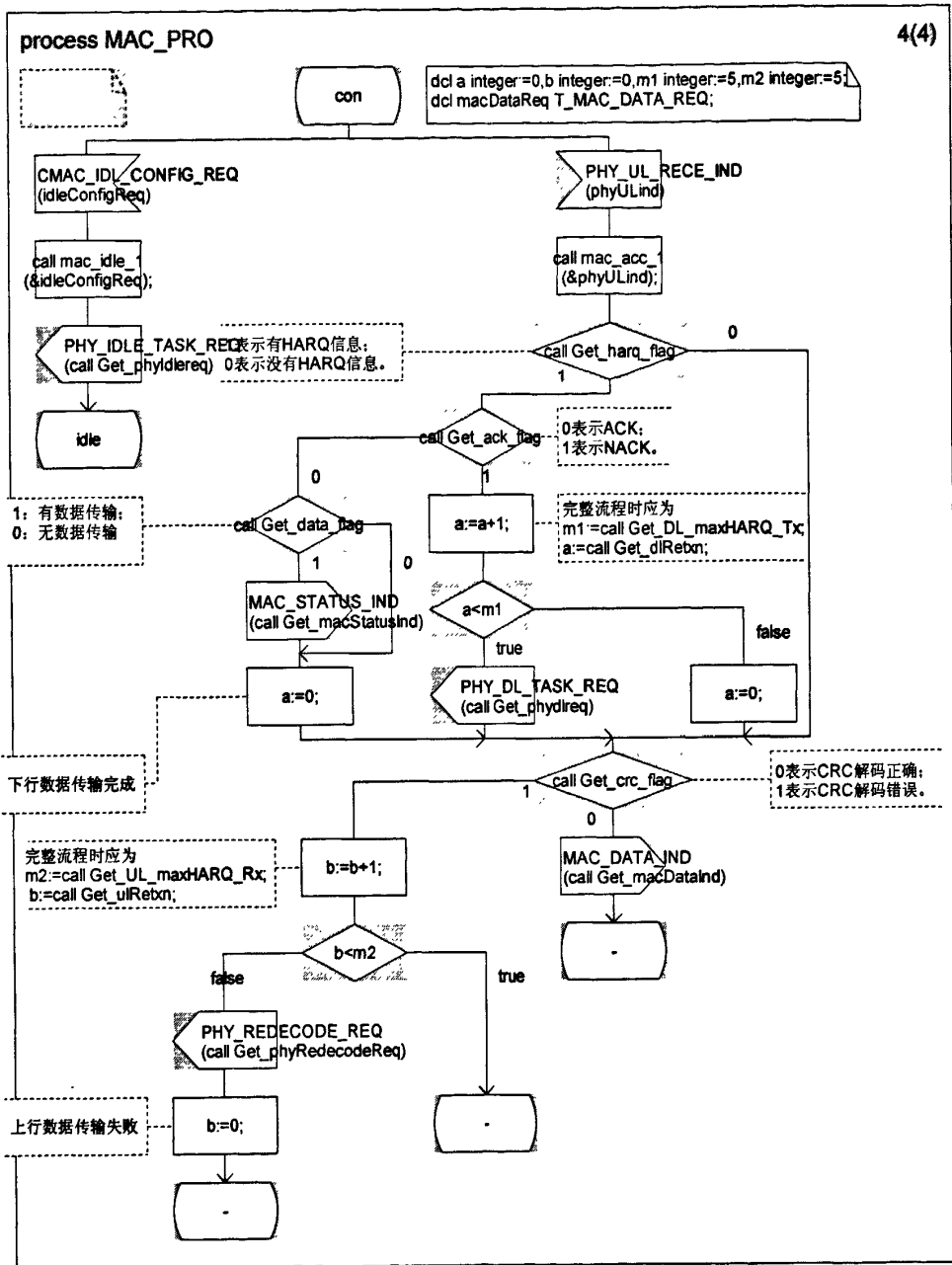


图 5.5 CON 状态进程图 1

MAC 层在连接状态下于 4(4)MAC-PRO 进程中监视输入队列，获得输入信号，当输入信号为高层 RLC 的数据发送请求 `MAC_DATA_REQ` 时，对函数变量 `mac05_12MAC_DATA_REQ` 操作，通过标志位 `sdu_flag` 决定进程的下一个分支，当标志位取值为“1”时表明 RLC 层有数据需要发送，将高层数据封装在 `PHY_DL_TASK_REQ` 发送至物理层；当取值为“0”没有下行数据，再通过调用变量 `data_flag` 判断 RLC 层是否还有待下发的数据，经该标志位表示有待发数据发送时，MAC 层则需将当前 `buffer` 中的剩余空间通过 `MAC_STATUS_REQ` 告知 RLC 层以便高层进行数据的组装和分段。

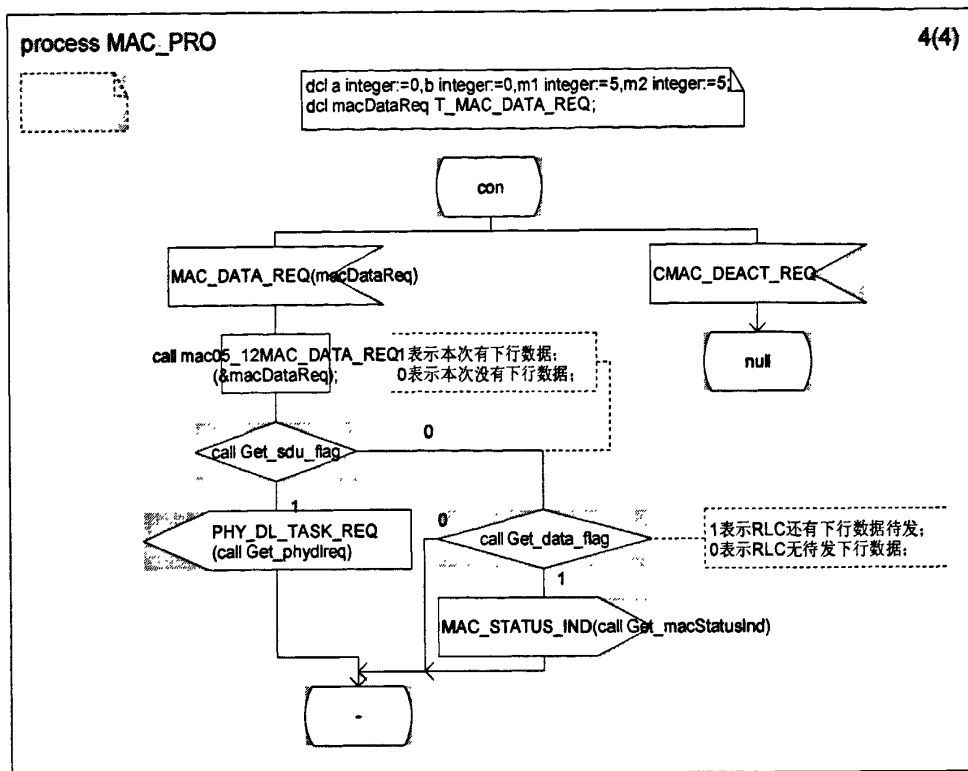


图 5.6 CON 状态进程图 2

5.2.4 构造测试用例

5.2.4.1 约束条件定义

根据 5.1.2 节中 TTCN 的测试例构造步骤构造连接模式测试例中需要的变量、常量和定时器，在约束部分，要构造从测试环境到 ITU 的数据流（ASP 类型、PDU 类型），在本文的仿真过程中，声明约束是根据测试例实际的数据来编写，由于篇幅原因，本文只关心 MAC 层连接模式下的约束声明。其中 CAMC_CONNECT_CONFIG_REQ、PHY_UL_RECE_IND、CMAC_DATA_REQ 见图 5.7-5.9。对于每一个信号，其中“*”代表通用匹配符，匹配一个结构或数组，我们并不关心它的值。singlingID 为信令编号，用来对层间的原语信号进行标注；Mode 0 代表当前是测试版本；State 表示模块状态（空状态 00，空闲状态 01，ACC 状态 10，CON 状态 11）；sfn 表示系统帧号；length 为信息长度指示，Reserved 代表保留位。

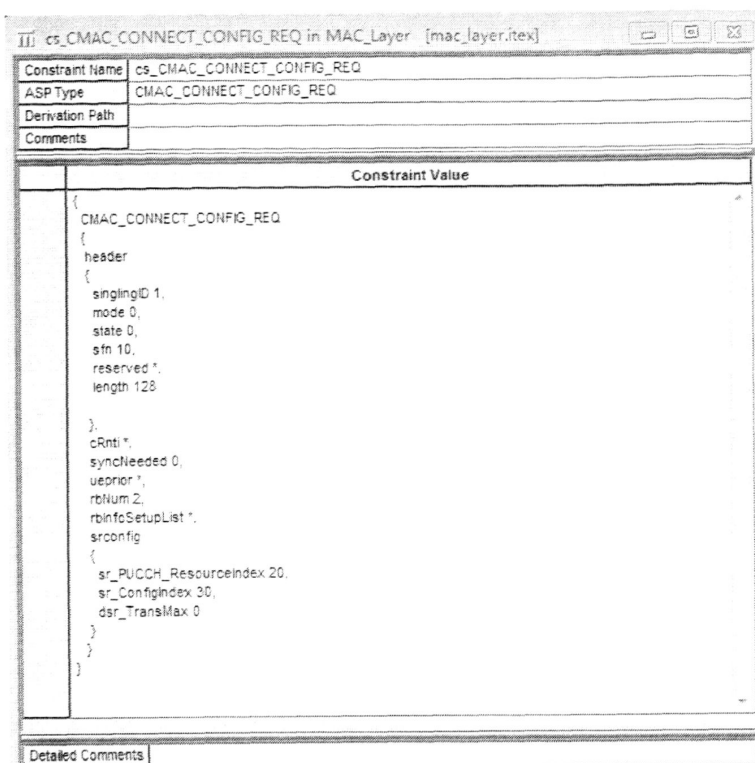


图 5.7 约束定义 CAMC_CONNECT_CONFIG_REQ

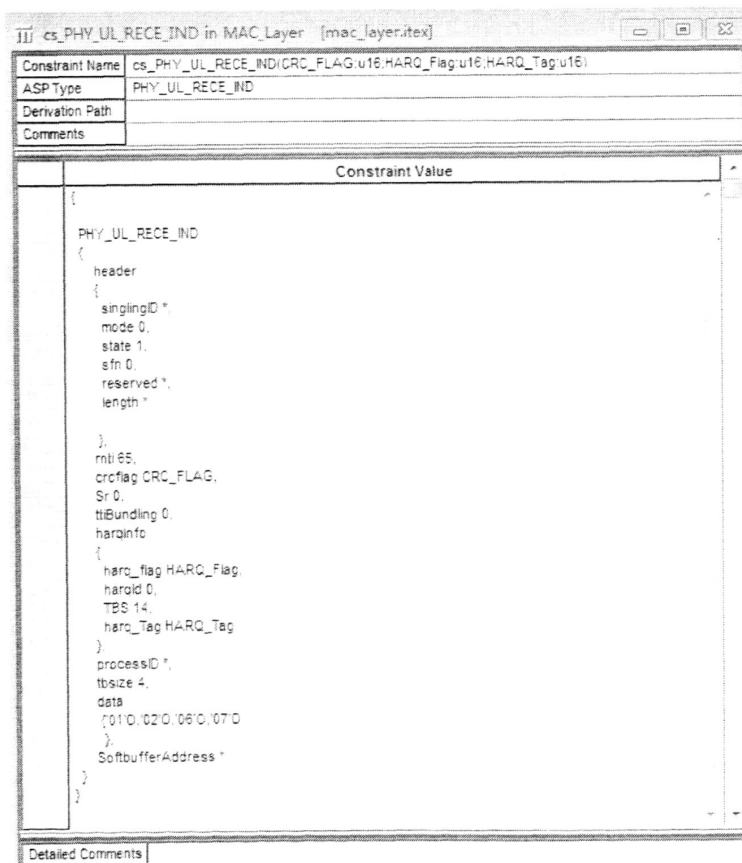


图 5.8 约束定义 PHY_UL_RECE_IND

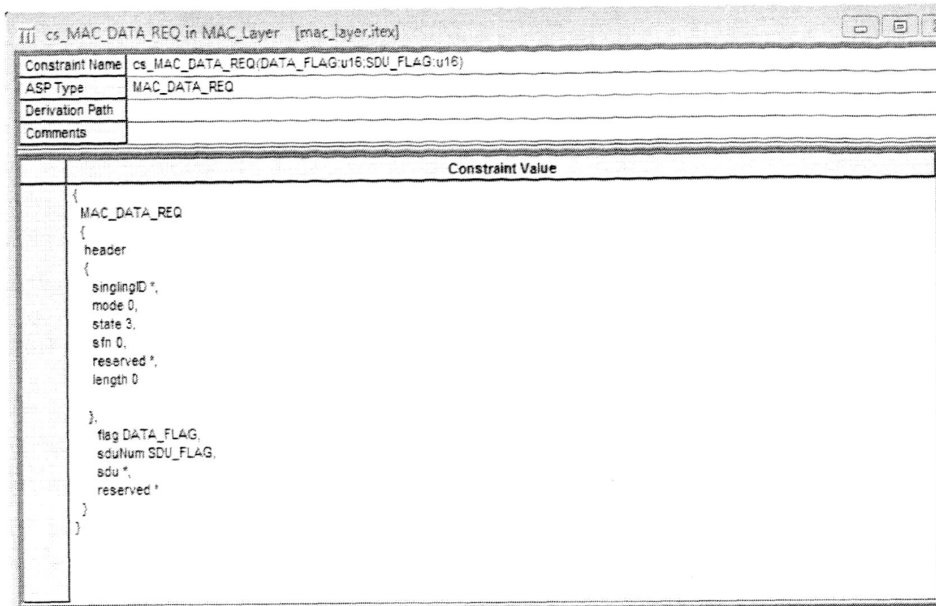


图 5.9 约束定义 CMAC_DATA_REQ

5.2.4.2 创建测试例

在 TTCN 测试集的集成环境中，创建一个新的 TTCN 测试集^[32]。其中“!”表示发送信号，“?”表示接收信号，不管发送或接收的信号，都通过 Constraints Ref 来认证，根据协议及接口配置的参数也定义在其中，这保证了 SDL 程序输入输出的正确性之外，也验证了开发所编写代码的正确性，限于篇幅，本文只截取随机接入成功过程和下行数据传输处理的测试例图，如图 5.10 和如图 5.11 所示。

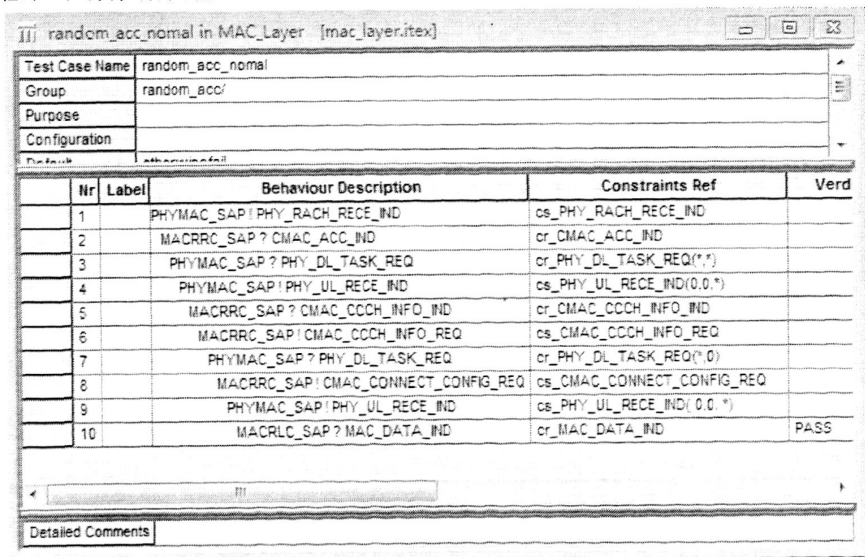


图 5.10 随机接入过程的测试例（成功情况）

主要执行步骤功能介绍：

- ① 测试步 1-2: UE 初始化随机接入过程, 根据系统信息参数选择前导发送至网络端。
- ② 测试步 3: 网络端对前导进行随机接入响应 RAR。
- ③ 测试步 4-5: 网络接收来自终端的 Msg3 消息, 并将 Msg3 通过 CMAC_CCCH_INFO_IND 信号通知 RRC 层, 在此没有进行 HARQ 反馈。
- ④ 测试步 6-7: RRC 层通过 CMAC_CCCH_INFO_IND 发送竞争解决信息或 RRCConnectionSetup 给终端。
- ⑤ 测试步 8-10: 网络端 RRC 配置 CMAC_CONNECT_CONFIG_REQ 请求 MAC 层进入 CON 模式, 进行连接模式下数据的传输和处理。

Nr	Label	Behaviour Description	Constraints Ref	Verdict
1	MACRLC_SAP!MAC_DATA_REQ		cs_MAC_DATA_REQ(1,0)	
2	MACRLC_SAP?MAC_STATUS_IND		cr_MAC_STATUS_IND	
3	MACRLC_SAP!MAC_DATA_REQ		cs_MAC_DATA_REQ(1,5)	
4	PHYMAC_SAP?PHY_DL_TASK_REQ		cr_PHY_DL_TASK_REQ(*,*)	
5	PHYMAC_SAP!PHY_UL_RECE_IND		cs_PHY_UL_RECE_IND(1,1,1)	
6	PHYMAC_SAP?PHY_DL_TASK_REQ		cr_PHY_DL_TASK_REQ(*,*)	
7	PHYMAC_SAP!PHY_UL_RECE_IND		cs_PHY_UL_RECE_IND(1,1,1)	
8	PHYMAC_SAP?PHY_DL_TASK_REQ		cr_PHY_DL_TASK_REQ(*,*)	
9	PHYMAC_SAP!PHY_UL_RECE_IND		cs_PHY_UL_RECE_IND(1,1,0)	
10	MACRLC_SAP?MAC_STATUS_IND		cr_MAC_STATUS_IND	
11	MACRLC_SAP!MAC_DATA_REQ		cs_MAC_DATA_REQ(0,4)	
12	PHYMAC_SAP?PHY_DL_TASK_REQ		cr_PHY_DL_TASK_REQ(*,*)	
13	PHYMAC_SAP!PHY_UL_RECE_IND		cs_PHY_UL_RECE_IND(1,1,0)	PASS

图 5.11 下行数据传输过程测试例 (HARQ 进程进行 NACK 反馈)

测试目的:

- ① 网络端处于 MAC_CON 状态, 当收到一个 MAC PDU 但其 CRC 校验失败, 此时 SS 将会对相应的 HARQ 进程发送一个 NACK;
- ② 网络端处于 MAC_CON 状态, 当收到一个重传的 MAC PDU 且其 CRC 校验成功, 此时 SS 将会对相应的 HARQ 进程发送一个 ACK 并将数据传递到高层。

主要测试步骤介绍:

- ① 测试步 1-3: RLC 层请求 MAC 层发送数据, MAC 子层将当前缓存器 buffer 中的空间余量通过 MAC_STATUS_IND 状态指示后, 高层再根据 buffer 具体情况组装和分配数据量。
- ② 测试步 4-7: MAC 向物理层发送高层数据, 此时 MAC 层已经入 CON 状态, 需要进行 CRC 校验、ACK/NACK 指示, 物理层 HARQ 反馈 NACK 指示, 无法正

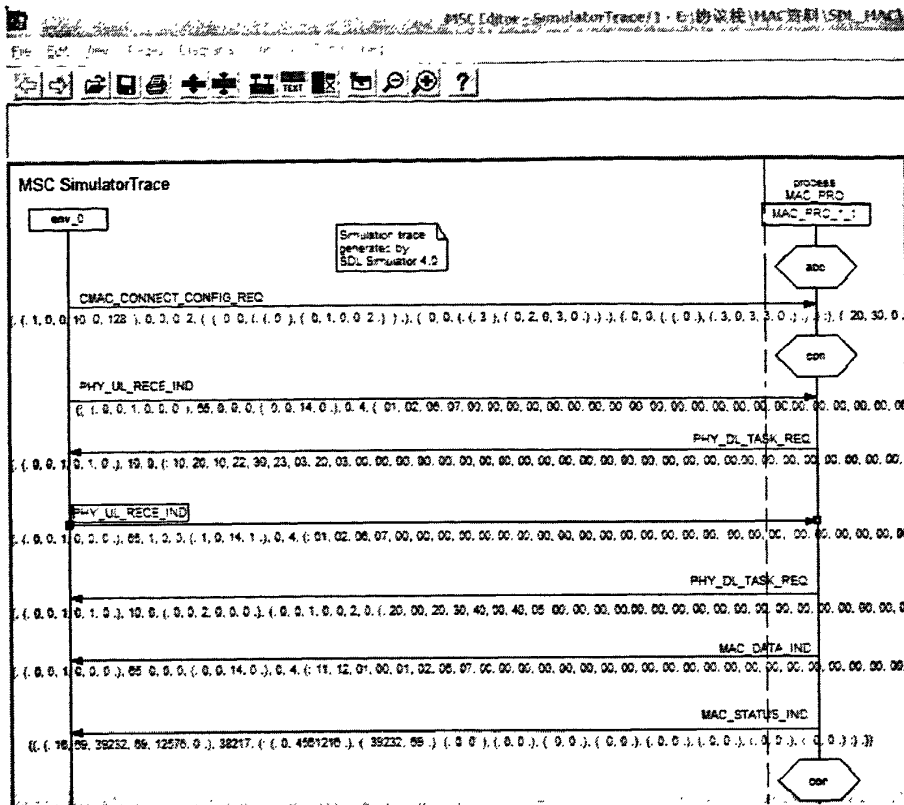


图 5.14 CRC 校验失败的 MSC 图

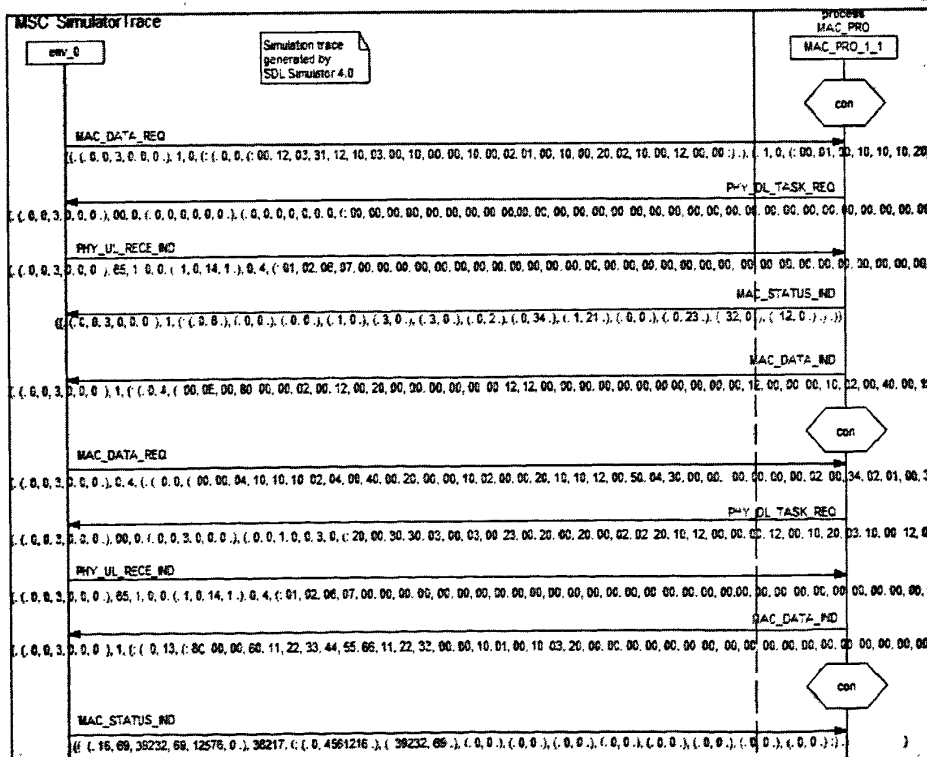


图 5.15 上行数据传输的 MSC 图

从上面 4 个图中可以看到，每个信号都指明了发送者和接收者，对于 MAC 层来说，RLC、RRC、PHY 视为外部环境，位于 MSC 图中的左边 env_0 实体，通过接口原语的形式与 MAC 层进行信令交互控制 MAC 层的状态跳转与保持。同时从图中也可以看到信号以数据结构形式展现的具体值，便于测试人员随时检测信号的正确性。

5.4 本章小结

本章首先论述了 SDL 系统的层次结构和 TTCN 的测试模型，基于 TTCN 与 SDL 协仿真对所实现的协议设计进行仿真，目前的测试结果和预期的设计方案相一致，证明了程序编写、状态设计和实现方法的正确性。

第六章 结束语

6.1 论文工作总结

移动通信方兴未艾, 3G 技术正在完善并全面商用, 4G 标准就已确定, 未来移动通信系统要求提供的数据传输速率高达 100Mbit/s 以上, 支持的业务也将从语音业务扩展到多媒体业务(包括实时的流媒体业务)。为了促进 TD-LTE 技术和产品研发, 依据 3GPP TS36 系列 Release 8、9 和 TD-LTE 标准, 本项目设计软件模块并开发出符合 3GPP 及行业标准要求的 TD-LTE 无线综合测试仪表, 该综测仪是模拟网络侧测试终端的功能是否完善、技术指标是否满足要求。

在论文前期, 学习了无线移动通信的发展, 研读 3GPP 协议栈协议, 包括 RLC、PDCP、RRC 和非接入层的协议标准, 以及协议结构中对 MAC 层相关流程、参数配置等的描述。对 MAC 层网络侧提供的功能和服务, 特别是连接建立部分和 MAC 协议栈实现和开发的流程有较深入的了解。

本论文主要完成了以下的工作:

① 简要介绍了 LTE 空中接口协议框架, 各层实现的功能和技术要求, 并描述了后一部分的测试协仿真过程。

② 基于对空中接口控制面协议栈的研究, 重点对层 2 中的 MAC 层工作流程进行协议分析, 包括上下行链路的数据传输 (HARQ 进程控制)、调度及 MAC PDU 的分组和组装。

③ 协议实现: 实现主要从协议栈总体设计, 系统设计、接口原语设计、参数定义、代码编写, 具体流程的设计来进行。

④ 测试: 选取 MAC 网络侧部分业务实现进行协议测试, 在 TTCN 和 SDL 协仿真对协议实现进行测试, 生成测试结果 MSC 图, 最终验证了协议实现设计符合协议描述要求。

6.2 论文的主要贡献

本文的主要贡献:

① 根据 3GPP 协议规范, 抽象出 MAC 层的有限状态机模型, 生成状态转移图和跃迁条件, 简化了跃迁信号和参数。

② 总结 LTE 系统网络端的 HARQ 进程、数据错误处理流程。

- ③ 利用 SDL 完成对基本流程和功能的一致性测试。

6.3 下一步工作的安排

由于时间和精力所限,根据现阶段所取得的研究成果,对于不少问题的研究还很不充分,下一阶段的研究工作主要有:

① 对于流程优化设计中针对网络侧 MAC 层控制的资源调度问题,还需要进一步的研究。包括算法选择、信令优化和测试等。

② 对于 MAC 子层的众多测试项目,例如重建过程中的 MAC 层重置后恢复信令控制 SRB 与数据承载 DRB 的过程、MAC-padding,未能全部测试;同时可能存在的某些异常情况没有考虑到,这些都是下一步工作需要考虑和解决的问题。

③ 文中 MAC 层软件设计只进行了主要连接模式功能的测试,要投入到商用并能稳定地运行,还需要经过长时间的系统测试、外场测试以完成修改完善工作。另外,也需要对 SDL 中的 C 代码进行优化。

致 谢

当毕业论文落下最后一个标点符号时，开始写这篇致谢之前，回首了过去3年生活中的点点滴滴，从懵懵懂懂地走进重邮这座通信殿堂，怯生生地面见导师结识同学，逐渐相互学习、扶持、帮助、照顾，到即将故作轻松的走出这座大门，迈进充满未知和挑战的社会，心中顿时充满了各种失落、不舍与感激。藉此机会向所有给予我帮助的老师、同学表达我内心最诚挚的感谢。

首先要感谢王志导师，是您不辞劳苦的鼓励和教导，我才会学术和为人处事方面得到了很大的提高，感谢您在工作上给予的建议和意见，使我对未来工作有了更清晰地认识。感谢实验室李校林、李雪松老师，3年的研究生生活因你们的教诲我才会过得如此充实和丰富多彩，此刻再多美好的语言也无法准确表达我心里对老师们的感激之情，唯有最简单的对您说一句：老师您辛苦了，谢谢您！学生决不会辜负您的培养！

感谢LTE项目组的李小文、陈发堂、刘宇老师，老师们渊博的知识、严谨的治学和为人师表的工作态度给我留下了深刻的印象，是你们在平时的项目学习过程中给予的指导和帮助以及在这次论文撰写中提出的宝贵修改意见，我才能顺利完成毕业论文并度过了这3年美好宝贵的时间。

感谢信科16楼十一景的兄弟姐妹，是我们共同营造的快乐和谐的学习和生活氛围，在硕士期间对我的学习和生活的帮助，在我情绪低落的时候给予鼓励，在我遇到困难时给予帮助，谢谢你们！3年的朝夕相处，同甘共苦，我将永远怀念曾经一起奋斗、共同学习过的时光，此行一别后唯有在心里祈祷你们拥有一个美好幸福的未来！

深深感谢我的父母和家人，他们为我的成长默默倾注了太多的心血，在我纠结迷惘的时候，是他们在背后不厌其烦的指点和关心，我才有勇气面对未知的未来！

天下没有不散的宴席，纵然带着许多不舍和留恋，但，真的是时候告别了！

再见，亲爱的老师及来自五湖四海相聚于此的兄弟姐妹们！

再见，美丽的重邮！

再见，雄伟的南山！

再见，热情的重庆！

有此3年，此生无悔！

参考文献

- [1] 沈嘉, 索士强等. 3GPP 长期演进 (LTE) 技术原理与系统设计[M]. 人民邮电出版社, 2008. p1-2
- [2] 胡宏林, 徐景. 3GPP LTE 无线链路关键技术[M]. 电子工业出版社, 2008.
- [3] Farooq Khan. LTE for 4G mobile broadband [M]. ISBN-13 978-0-511-51666-5, 2009.
- [4] Pierre Lescuyer, Thierry Lucidarme, 李晓辉, 崔伟等. 演进分组系统 (EPS): 3G UMTS 的长期演进和系统结构演进[M]. 机械工业出版社, 2009.
- [5] 张克平. LTE-B3G/4G 移动通信系统无线技术[M], 电子工业出版社, 2008.
- [6] 孟繁丽, 张新程等. LTE 系统时延分析[J]. 邮电设计技术, 2009. P37-41.
- [7] Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker. The UMTS Long Term Evolution FROM THEORY TO PRACTICE [M], ISBN 9780470697160 (H/B), 2009.
- [8] 赵训威, 林辉董等. 3GPP 长期演进 (LTE) 系统架构与技术规范[M]. 人民邮电出版社, 2010. P11-12.
- [9] Pierre Lescuyer, Thierry Lucidarme, 李晓辉, 崔伟, 译. 演进分组系统 (EPS): 3G UMTS 的长期演进和系统结构演进[M]. 北京. 机械工业出版社. 2009. p70-90
- [10] 3GPP TS 36.211: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation" http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2009-12/Rel-9/36_series/
- [11] 3GPP TS 36.321: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification". http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2009-12/Rel-9/36_series/
- [12] 3GPP. TS 36.322: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification". http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2009-12/Rel-9/36_series/
- [13] 3GPP. TS 36.323 V8.7.0: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification; (2009-09). http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2009-12/Rel-9/36_series/
- [14] 3GPP TS 36.331: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification". http://www.3gpp.org/ftp/Specs/2009-12/Rel-9/36_series/
- [15] 成斗铨, 朴亨镐. 使用 HARQ 发送数据的方法. 中国. 101622811. 2008.7. p5-7
- [16] 3GPP TS 36.300 Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial

- Radio Access Network (E-UTRAN); (2009-09).
- [17] 张俊峰、赵建平等. 一种 HARQ 重传资源配置方法, 中国, 101132264, 2008.2
- [18] 白玉, 冯春燕等. 一种 OFDMA 系统半静态干扰协调算法[J]. 无线电通信技术, 2009 年第 35 卷第 1 期. p11-13.
- [19] Sunggu Choi; Kyungkoo Jun; Yeonseung Shin; Seokhoon Kang; Byoungjo Choi;. MAC Scheduling Scheme for VoIP Traffic Service in 3G LTE. Vehicular Technology Conference, 2007. p1441-1445.
- [20] 王枫. 3GPP LTE 中上行链路 MAC 层调度的研究[博士后论文]. 上海交通大学. 2007.10
- [21] 张天魁, 曾志民. 3G LTE 动态资源分配机制研究[J]. 移动通信, 2007. p58-61.
- [22] http://blog.sina.com.cn/s/blog_5eba1ad10100h056.html
- [23] Yong Fan, Petteri Lunden. Efficient Semi-Persistent Scheduling for VoIP on EUTRA Downlink[J]
- [24] Dajie Jiang, Haiming Wang. Principle and Performance of Semi-persistent Scheduling for VoIP in LTE System. Beijing University of Posts and Telecommunications
- [25] 3GPP TSG-RAN2#60bis R2-080259, "MAC header structure"
- [26] 罗一静 段红光. 利用 TTCN 进行协议测试的一种方法[J]. 广东通信技术. 2006 vol26 No.6. p41-45
- [27] Telelogic Tau 4.0 User's Manual. February 2000. p189-223
- [28] 蒙移发 徐惠民 高强. 协议验证与一致性测试方法. 计算机科学, 2002, 29 (5)
- [29] Recommendations for CCITT Applications—The Tree and Tabular combined Notation (TTCN)
- [30] 朱红专, 李小文, SDL 在无线承载中的应用[N], 重庆邮电学院学报, 2005.8
- [31] 李盘林 田兵 丰勇 陈吉力. 第三代移动通信系统 TD-SCDMA 信令测试软件[N]. 重庆邮电学院学报, VOL.14, No.2. 2002
- [32] Paul Baker, Jens Grabowski, Ekkart Rudolph, A Message Sequence Chart-Profile for Graphical Test Specification, Development and Tracing-Graphical Presentation Format for TTCN-3

附录 攻硕期间从事的科研工作及取得的研究成果

学习期间参与的科研项目:

TDD-LTE 无线综合测试仪表开发 国家科技重大专项

学习期间发表的论文:

- [1]基于 LTE 系统的终端 RRC 连接建立过程研究,《信息通信》2010 年第 3 期
- [2]LTE 系统中 RRC 消息传输方案的设计与改进,《电讯技术》2010 年第 9 期
- [3]Improved Scheme of RRC Message Transmission in LTE system, ICEIT2010