



LTE TDD 系统中下行 HARQ 机制的研究 *

陈发堂¹, 万 翠¹, 樊 玺²

(1. 重庆邮电大学重庆市移动通信技术重点实验室 重庆 400065; 2. 电子科技大学 成都 611731)

摘 要:在对长期演进(long term evolution, LTE)下行数据发送机制详细分析的基础上, 针对下行数据发送过程的实现, 提出一种混合自动重传请求(hybrid automatic repeat request, HARQ)选择方案, 遵照协议给出的反馈时延的时隙关系, 在设计中采用反馈判断和优先重传的方案, 实现了 HARQ 反馈和重传时刻的正确映射, 并研究了同步 HARQ 和异步 HARQ 的往返时间(round trip time, RTT), 仿真分析了不同上下行配置对 HARQ RTT 的影响, 提出了一种最小化 RTT 的方法, 从而为网络侧提供业务不同时的配置选择提供了参考。

关键词: LTE; RTT; 上下行配置; HARQ 过程

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.015

Research of Downlink HARQ Mechanism in LTE TDD System

Chen Fatang¹, Wan Cui¹, Fan Xi²

(1. Chongqing Key Lab of Mobile Communications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Based on a detailed research on the mechanism of downlink data transmission in LTE system, an error-free HARQ solution to realize the downlink data transmission process was provided. According to the relations of the feedback delay, associated decision of feedback judgment and retransmission priority were adopted to complete the correspondence between them. A research on RTT of synchronous and asynchronous HARQ and the influence of different UL-DL configurations on HARQ RTT were also studied. Then a method to minimize RTT was put forward to provide reference for eNode B to choice configurations when providing different communication services.

Key words: LTE, round trip time, UL-DL configuration, HARQ

1 引言

在 LTE 系统中, 针对无线信道时变和多径衰落对信号带来的传输错误, LTE 系统采用了 HARQ 技术, 其中涉及物理层和 MAC(媒体接入控制)层。在每个 TTI(传输时间间隔)内, 物理层会向空中接口发送一个或者两个 TB(传输块)。如果该传输块没有被接收端正确解码, 那么该传输块将会重传, 同时接收端会将错误解码的 TB 保存。当接收

端接收到该重传的 TB, 会将之前传输的 TB 和这次的 TB 合并, 以增加解码的正确性。在采用 IR(增量冗余)的 HARQ 机制中, 重传的 TB 会包含一些初始 TB 中没有的冗余信息, 然后进行软合并。当传输次数增加时, 合并后的码字冗余信息逐渐增加, 获得码字合并增益。

LTE 系统提供两种双工方式: 一种是频分双工(frequency division duplexing, FDD), 另一种是时分双工(time division duplexing, TDD)。在 FDD 模式中, 上行子帧

* 国家科技重大专项基金资助项目(No.2011ZX03001-002)

和下行子帧在频域上是独立的，并且 HARQ RTT 是固定的。然而在 TDD 中，上下行子帧在时域内是独立的，其中，TDD 的帧结构如图 1 所示。一个 10 ms 的无线帧由上行子帧、下行子帧和特殊子帧构成^[1]。特殊子帧包含 3 个部分：DwPTS(下行导频时隙)、GP(保护间隔)、UpPTS(上行导频时隙)，其中 GP 是用作上下行子帧转换的保护间隔。DwPTS 可以发送下行数据，而 GP 和 UpPTS 则不能发送数据。TDD 支持 7 种不同的上下行和特殊子帧的配置^[1]，见表 1 (D 代表下行子帧，S 代表特殊子帧，U 代表上行子帧)。特别是在下行 HARQ 过程中，由于在有的上下行子帧配置中，下行子帧会比上行子帧多，因此同一个上行子帧上会包含着几个下行 HARQ 的反馈信息。几个下行 HARQ 的反馈会以捆绑或复用的方式在同一个上行子帧上传输，这样 TDD 模式下 HARQ RTT 就会比 FDD 模式下的长。当网络侧发送系统消息或者广播消息时，接收端如果解码错误，网络侧会为了避免重传数据的冲突而调整重发数据的时刻。这样，下行异步 HARQ 的重传可能发生在任意时刻，因此，并不能保证固定的 RTT。

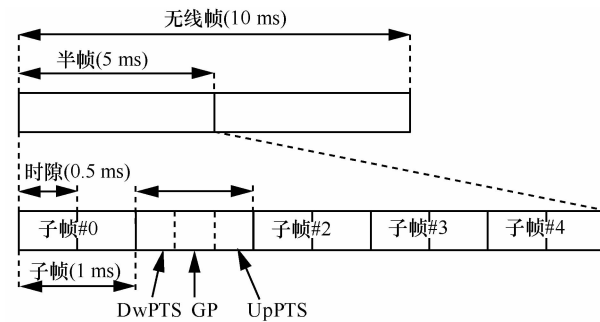


图 1 TD-LTE 帧格式结构

表 1 上下行子帧配置

上下行 子帧配置	子帧号									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

当重传发生时，HARQ RTT 增加，则数据分组的传输延迟，如果最先收到负反馈的 HARQ 进程具有最高的重传优先级，则此时 HARQ RTT 将会得到最小化^[2]。在上述准则的基础上，提出了一种根据不同的上下行子帧配置最小

化重传时间的方法。

2 HARQ 实体

MAC 层控制着 HARQ 实体的运行^[3]，HARQ 实体维持着一定平行数量的 HARQ 进程，上层数据被组装成 MAC PDU 后，封装至 HARQ 进程中。下行 HARQ 过程的发送是通过上行反馈(ACK 或 NACK)、新数据指示(NDI)、下行资源分配和下行数据重传来完成的。下行 HARQ 示意如图 2 所示。



图 2 下行 HARQ 示意

2.1 下行 HARQ 进程设计

HARQ 进程的状态可分为空闲状态、准备状态和传输状态，如图 3 所示，存储在 HARQ 实体里的 TB 被发至空闲状态的 HARQ 进程中，则该进程的状态转至准备状态；当 TB 被物理层发至 PDSCH(物理下行共享信道)时，则该进程的状态转至传输状态；当该进程收到一个 HARQ 负反馈时，又会返回至准备状态，准备进行重传；如果收到正反馈，则状态转至空闲状态。

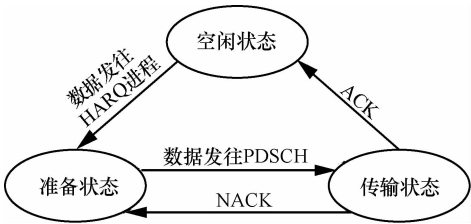


图 3 状态跳转

2.2 同步 HARQ 和异步 HARQ

在上下行 HARQ 过程中，接收端收到 HARQ 反馈的时刻都是固定的。但另一方面，接收到 HARQ 负反馈时，进行重传的时间是不同的。对于上行同步 HARQ 来说，重传的时间是固定的；对于下行异步 HARQ 来说，为了增加调度的灵活性，重传的时间是不固定的，有可能发生在任意时刻，由网络侧调度。如图 4 所示，说明了在上下行配置为 4 时的重传过程。以进程 2 为例，当所有的进程都被占用时，如图 4(a)所示，收到反馈的时刻是子帧 2，重传时刻

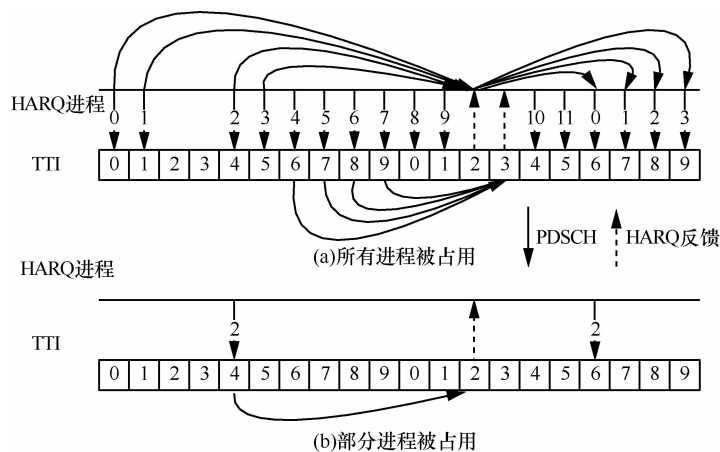


图4 下行 HARQ 重传示意

3 下行 HARQ RTT 算法设计

3.1 HARQ 重传原则

在接收到 HARQ 反馈之后,如果收到的是负反馈,则需要进行重传。对于重传时刻的确定,考虑到两种情况:一种是当所有的下行子帧都被 HARQ 进程占用时,重传时刻是固定的,此时的情况可以理解为同步 HARQ,子帧 n 的重传时间可由表 3 中的 k' 确定;另一种是只有部分下行子帧被占用时,若当前子帧为 n ,那么之前接收对应的 HARQ 反馈的时刻为 $n-k$ 。 k' 的值见表 3,且 $k_{\min}$ 为网络侧处理上行数据时

延,大小为 $4 \text{ ms}^{[5]}$ 。

$$k_{\min} \leq k \leq k' \quad (1)$$

在子帧 n 上传输的进程的最小 HARQ RTT 可根据以下步骤获得。

- (1) 网络侧假定根据表 3 在子帧 $n-k$ 上收到 HARQ 反馈。
- (2) 根据表 2 检测是否在子帧 $n-k-l$ 上存在和子帧 $n-k$ 的反馈相对应的 PDSCH。当网络侧在检测时, l 是按照递减的顺序进行的,这样就能保证最先收到 HARQ 反馈的进程优先得到重传。
- (3) 如果子帧 $n-k$ 上没有收到 HARQ 反馈,则 k 值递减,并重复上述过程。

最终,HARQ 进程号和相应的 HARQ 重传时刻可以根据当前子帧 n 得到确定。在这个过程中,网络侧需要同时考虑帧号和子帧号。

3.2 实现步骤

根据上述原则设计出的 HARQ 的方案如下。

- (1) 首先为每个 HARQ 进程设计参数:HARQ 缓冲域

是子帧 8;当部分进程被占用时,如图 4(b)所示,重传时刻为子帧 6,相比之下,时延减少了,相应地,子帧 4 的 HARQ RTT 也被减小。

2.3 下行 HARQ 反馈

在下行 HARQ 过程中,上层数据在 MAC 层被组装成 MAC PDU,然后被保存在位于 MAC 层的 HARQ 进程中。之后,MAC PDU 会通过 HARQ 进程发送至物理层。这里,一个 MAC PDU 对于物理层来说,是一个 TB。物理层通过 PDSCH 在下行子帧 $n-l$ 上发送 TB 至空中接口。接收端在接收到 HARQ 进程数据后,会通过 PUCCH(物理上行控制信道)或者 PUSCH(物理上行共享信道)在上行子帧 n 上发送 HARQ 反馈。其中, n 和 l 的值见表 2^[4]。

由于不同上下行子帧配置下的上下行子帧的个数不同,导致在下行子帧多于上行子帧的情况下,几个下行子帧的反馈会被捆绑或复用到同一个上行子帧上,因此,在接收反馈后重传的时间将会高于 FDD 模式下的重传时间,HARQ RTT 也会相应地增加。

表 2 TDD 下行相关索引集合 $L: \{l_0, l_1, \dots, l_{M-1}\}$

配置	上下行子帧比	进程数		子帧 n									
		上行	下行	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3:2	7	4	-	-	6	-	4	-	-	6	-	4
1	2:3	4	7	-	-	7,6	4	-	-	-	7,6	4	-
2	1:4	2	10	-	-	8,7,6,4	-	-	-	-	8,7,6,4	-	-
3	3:7	3	9	-	-	11,7,6	6,5	5,4	-	-	-	-	-
4	2:8	2	12	-	-	12,11,8,7	7,6,5,4	-	-	-	-	-	-
5	1:9	1	15	-	-	13,12,11,9,8,7,6,5,4	-	-	-	-	-	-	-
6	5:5	6	6	-	-	7	7	5	-	-	7	7	-

表3 同步 HARQ 下的子帧 n 的重传等待时间

上下行 子帧配置	子帧 n 的 k' 值(ms)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	6	4	-	-	-	6	4	-	-	-
1	7	4	-	-	7	7	4	-	-	7
2	8	4	-	6	7	8	4	-	6	7
3	7	7	-	-	-	11	4	5	6	6
4	7	8	-	-	11	12	4	5	6	7
5	8	9	-	11	12	13	4	5	6	7
6	6	4	-	-	-	7	4	-	-	6

标志 h_{harq} , 反馈 f_{feedback} , 当前子帧 $n_{\text{currentframe}}$ 。

每个 HARQ 进程有一个缓冲域, h_{harq} 为 1 时表示该进程被占用。 f_{feedback} 用于接收上次发送下行数据时的反馈。 $n_{\text{currentframe}}$ 用于记录该进程发送数据时的下行子帧。

(2) 如果子帧 n 收到 HARQ 反馈, 首先扫描所有 h_{harq} 为 1 的进程, 如果 $n_{\text{currentframe}}=n-l$, 则将该进程的 f_{feedback} 设置为收到的 ACK 或 NACK。

(3) 对于 f_{feedback} 为 ACK 的进程, MAC 层将该进程清空, 即置 h_{harq} 为 0。对于 f_{feedback} 为 NACK 的进程, 首先对这些进程按 l 从大到小进行排序, 然后确定每个进程的重传时刻 $n_{\text{nextsubframe}}$, 则每个进程的 RTT 为 $n_{\text{nextsubframe}}-n_{\text{currentframe}}$ 。

在下行数据传输过程中, 数据以多个并行的 HARQ 进程为载体向下层传输, 不同的数据速率会导致处于传输状态的 HARQ 进程数目的增加, 但当速率增加到一定程度时, 所有的 HARQ 进程都被占用, 相应的下行子帧也被占用, 此时的 HARQ RTT 是固定的。不同配置下, 上下行子帧的不对称性导致 HARQ RTT 也有所区别。下面进行具体分析。

4 仿真结果

在 LTE TDD 系统中, 首先分析了 HARQ 机制, 并从上下行配置方面分析了同步 HARQ 和异步 HARQ 的 HARQ RTT。数据的到达服从随机的泊松分布, 并以一定速率被发往 HARQ 实体。不同 HARQ 利用率下的 HARQ RTT 如图 5 所示。

以配置 5 为例, 当全部 HARQ 进程都被占用时, 为同步 HARQ, 此时 HARQ RTT 为 16.6 ms, 而异步 HARQ 的 RTT 要小于同步 HARQ。在异步 HARQ 过程中, 当多数 HARQ 进程处于空闲状态时, 将会减小收到反馈与重传之

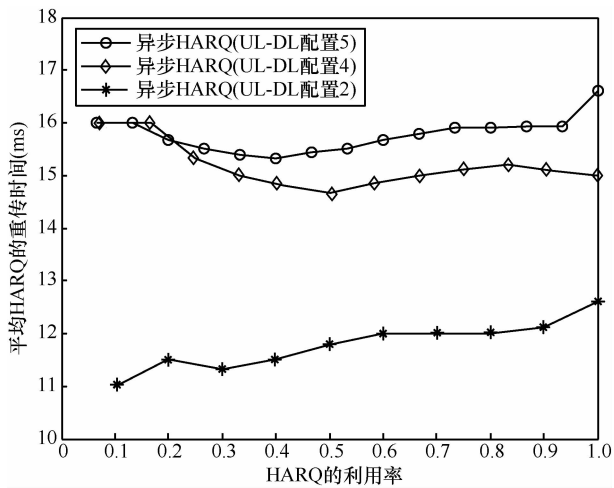


图5 配置为 5、4、2 下的平均 HARQ RTT

间的时间间隔, 因此 HARQ RTT 也会减小。当数据的速率较大时, 处于空闲状态的 HARQ 进程不存在, 也就是说所有的进程都被占用, 进程的重传时间是固定的, 就演变成了同步 HARQ 过程, 在 HARQ RTT 方面, 二者不存在区别。

此外, 当上下行配置为 5 时, 下行子帧和上行子帧的个数比例达到最大; 而配置为 4 和 2 时, 比例减小, 且配置为 5 时的 HARQ RTT 比配置为 4 和 2 时的大。原因如下, 当下行子帧和上行子帧的比例较高时, 在同一个上行子帧会传输多个下行子帧的 HARQ 反馈, 因此 HARQ RTT 会随着复用 HARQ 反馈的个数而增加。但配置为 4 和 2 时, 二者的上下行子帧个数配比是相同的, 但是因为配置 4 的上下行转换点为周期 10 ms, 因此其 HARQ RTT 要大于转换点周期为 5 ms 的配置 2 的 HARQ RTT。此外, 上下行配置为 0 时是例外的, 其 HARQ RTT 是固定的, 这是由协议规定的。因此, 可根据应用不同的上下行配置来调节 HARQ RTT, 从而改善 HARQ 的性能, 满足业务需求。例如, 在下行业务量较大并且对时延要求不高时, 可选择配置 5, 比如在访问网络下载视频的情况下; 但如果在上下行配比相同的情况下, 选择上下行切换点周期为 5 ms 的配置可减小下行时延。

5 结束语

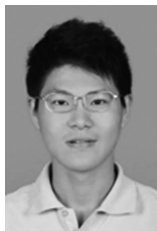
本文针对 LTE TDD 系统下行异步 HARQ 过程中 RTT 的问题, 提出了一种通过网络侧应用不同的上下行配置而最小化 HARQ RTT 的方法, 并从 HARQ RTT 方面分析了



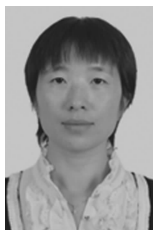
参考文献

- 1 童晓渝, 张云勇, 房秉毅等. 电信运营商实施云计算的策略建议. 信息技术, 2012(1)
- 2 袁文成, 朱怡安, 陆伟. 面向虚拟资源的云计算资源管理机制. 西北工业大学学报, 2010, 28(5)
- 3 田文洪, 赵勇. 云计算——资源调度管理. 北京: 国防工业出版社, 2011
- 4 孙鑫. 面向云环境数据中心的高效资源调度机制研究. 北京邮电大学博士学位论文, 2012
- 5 庄威, 桂小林, 林建材等. 云环境下基于多属性层次分析的虚拟机部署与调度策略. 西安交通大学学报, 2013(2)
- 6 尹红军, 李京, 宋许等. 云计算中运营商效益最优的资源分配机制. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011(S1)

[作者简介]



李济汉,男,北京邮电大学本科在读,主要研究方向为人工智能、机器学习和云计算等。



李素粉,女,博士,现就职于中国联通集团研究院,主要研究方向为云计算相关技术。



张云勇,男,博士后,中国联通集团研究院高级工程师、平台与云计算研究中心主任,主要研究方向为云计算、下一代开放网络、固定移动融合核心网、移动互联网及业务、公共运算。



房秉毅,男,博士,中国联通集团研究院高级工程师,主要从事云计算、核心网新技术的研究工作。

(收稿日期:2013-04-01)

(上接第 77 页)

同步 HARQ 和异步 HARQ 过程。设计出一种求得 HARQ RTT 的方案,仿真分析了不同配置和 HARQ 进程利用率对 HARQ RTT 的影响。本文将有助于对下行 HARQ 的研究和理解,并且可根据对比仿真图中的 HARQ RTT,为网络侧进行不同业务时的上下行配置提供参考。

参考文献

- 1 3GPP TS 36.211 V9.0.1. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulations, 2009
- 2 Dahlman E, Parkvall S, Skold J, *et al.* 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, 2nd Ed. Academic Press, 2008
- 3 3GPP TS 36.321 V9.1.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Medium Access Control (MAC) Protocol Specification, 2009
- 4 3GPP TS 36.213 V9.0.1. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures, 2009
- 5 Susitaival R, Meyer M. LTE coverage improvement by TTI bundling. Proceedings of VTC 2009-Spring, Spain, 2009

[作者简介]



陈发堂,男,硕士,重庆邮电大学副教授、硕士生导师,重庆邮电大学“重庆移动通信工程研究中心”算法研究部副主任,主要研究方向为 TD-SCDMA/GSM 双模终端开发项目的物理层算法研究。



万翠,女,重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为 LTE 高层协议栈开发。

樊玺,女,电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为通信网络技术研究。

(收稿日期:2012-12-30)