

一种基于 LTE TDD 系统上行同步控制算法

陈 禹 温向明 郑 伟
(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

摘 要: 该文提出了一种 LTE TDD 系统上行同步控制算法, 为移动台提供发送的定时提前量。首先介绍了上行同步控制的过程, 分析了利用用户信道估计信息检测信道冲激响应的起始位置、峰值位置和结束位置的方法, 并详细描述了上行同步控制算法。仿真结果表明, UE(用户终端)速度为低速或高速以及不同的工作信噪比时, 该同步控制算法都能够较好地工作, 避免定时不准确导致的 ISI。

关键词: LTE TDD; 上行同步; 信道估计; 尾径估计

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1938-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00814

Research on Uplink Synchronous Control in LTE TDD System

Chen Yu Wen Xiang-ming Zheng Wei

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to determine the sending time for the mobile station, a novel synchronous control mechanism for the uplink in the LTE TDD system is proposed in this paper. Firstly, the principle of synchronous control is introduced. Secondly, according to the information used to estimate the channel status, the initial, peak and end position of impulse response is detected reasonably; Moreover, the method for controlling the synchronous of uplink is proposed. Results show the effectiveness of the mechanism under scenarios with different velocity and the degree of signal to noise, additionally, the ISI induced by the inaccurate timing can be avoided.

Key words: LTE TDD; Uplink synchronization; Channel estimation; Tail diameter estimation

1 引言

LTE 系统中, UE(用户终端)通过随机接入过程与基站建立上行初始同步后, 利用同步控制模块对上行用户信道进行定时控制, 完成用户上行信号发射时间的调整^[1,2]。

同步控制功能由基站与 UE 共同完成。首先, 基站根据接收到的用户的导频估计该用户到基站的信道时域冲激响应^[3]。然后根据信道时域冲激响应, 对 UE 进行上行发送时刻的调整^[4,5]。目前 LTE 协议中没有定义具体的同步算法是怎么实现, 只是在 LTE 协议中定义了发送端是如何发送^[6], 接收端如何实现同步都没有规定, 因此本文利用用户的信道冲激响应起始位置、峰值位置和结束位置的估计提出一种上行同步算法。

在上行同步控制过程中, UE 会接收到 6 bit 的

定时提前量命令(TA), 它的取值范围是 0 到 63^[7]。如果用 $N_{TA,old}$ 表示旧的定时提前量命令, $N_{TA,new}$ 表示新的定时提前量命令, 那么由下式计算新的定时提前量命令: $N_{TA,new} = N_{TA,old} + (TA-31) \times 16$, 其中 $(TA-31) \times 16$ 为正和负分别表示需要提前和延迟上行发送定时^[8-10]。

本文的描述都只针对单用户。

2 主/首/尾径估计

估计方法的原理如图 1 所示。主径是时域信道冲击响应的最强径, 首径是时域信道冲击响应第 1 个比较强的径, (The first strong path), 尾径是时域信道冲击响应最后一个比较强的径。

假设当前用户占用子载波的频域信道估计值为

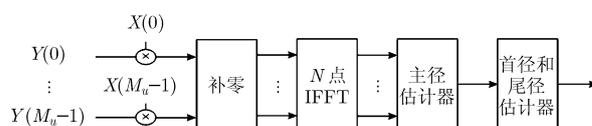


图 1 算法原理图

2009-05-31 收到, 2010-05-14 改回

IMT-Advanced(第四代移动通信)干扰抑制网络架构关键技术研究及其标准化(D08080100620802)和北京市科技计划资助课题

通信作者: 陈禹 chen_yufine@yahoo.com.cn

$\widehat{H}^{\text{ant,slot}}(k), k = 0, \dots, M-1, \text{ant} \in [1, 4], \text{slot} \in [1, 2]$, 其中 M 为用户占用的子载波数目, ant 为天线序号, slot 为时隙序号。

对每根天线, 每个时隙的 $\widehat{H}^{\text{ant,slot}}$ 中间补零到 N 点, 得到序列 $\widehat{H}^{\text{ant,slot}}(k)$, 然后 $\widehat{H}^{\text{ant,slot}}(k)$ 经过 N 点 IFFT 后得到信道的时域冲激响应:

$$\widehat{h}^{\text{ant,slot}}(n) = \text{IFFT}_N \left\{ \widehat{H}^{\text{ant,slot}}(k) \right\} \quad (1)$$

估计峰值点位置:

$$j_{\text{peak}} = \arg \max_{n \in [1, N_{\text{CP}}]} \left[\sum_{\text{ant}=1}^{N_r} \sum_{\text{slot}=1}^2 \left| \widehat{h}^{\text{ant,slot}}(n) \right|^2 \right] = \arg \max_{n \in [1, N_{\text{CP}}]} \left| \bar{h}(n) \right|^2 \quad (2)$$

其中 N_r 表示接收天线数目, N_{CP} 表示 CP 长度。假设使用一个子帧的导频信息进行同步控制, 那么对该子帧不同天线和不同时隙的信道估计结果进行非相干合并。式(2)中第 1 个求和为对不同天线得到的信道估计结果的非相干合并, 而第 2 个求和为对两个时隙的信道估计结果的非相干合并。

估计最大功率, 定义阈值 $\text{Threshold} = \text{Th}$:

$$\text{Th} = \alpha \max \left| \bar{h}(n) \right|^2 \quad (3)$$

其中 α 表示阈值系数。

对于 $\left| \bar{h}(n) \right|^2 (n \in [1, N_{\text{CP}}])$, 从 $n = 1$ 开始按照 n 的递增顺序, 检测得到第一个大于阈值 Th 的瞬时功率, 记其位置为 $j_{\text{start}}(n)$, 此即为用户信道响应估计的起始位置; 从 $n = N_{\text{CP}}$ 开始按照 n 的递减顺序, 检测得到第 1 个大于阈值 Th 的瞬时功率, 记其位置为 $j_{\text{end}}(n)$, 此即为信道响应估计的结束位置。

3 同步控制

利用用户的信道冲激响应起始位置、峰值位置和结束位置的估计, 进行该用户的上行同步控制。该算法包括内环同步控制和外环同步控制。

内环同步控制完成当前内环计数周期内主/首/尾径位置的平滑, 并且在满足条件时输出 TA 值, 即定时调整值。

外环同步控制完成下一调整周期内用户目标峰值位置的周期更新, 该值在内环同步控制过程中计算 TA 时作为目标峰值位置使用。

3.1 内环同步控制

在获得初始赋值, 或者通过外环同步跟踪控制模块获取上行用户下一外环周期内脉冲响应的峰值目标位置 j_{target} 的情况下, 运行内环同步控制模块, 每个内环控制计数周期输出一一次定时提前量命令, 该命令由下行信道发送给 UE 后, UE 按照协议规定的时序对发送定时进行调整。

eNB(增强型 NodeB)端算法流程:

(1)用户通过随机接入建立上行同步。初始化同步控制计数器为 0, 设定计数门限 M_InLoop 为 16 个上行子帧, 设定 Flag 为 0。启动同步控制计数器。跳到(2)

(2)如果 TA 定时器没有超时, 在同步控制计数器达到门限之前, 如果接收到目标用户的上行业务子帧, 则同步控制计数器加 1, 并且对 Flag 置 1, 跳到(3); 如果没有收到目标用户的上行业务子帧, 不执行操作。如果同步控制计数器达到门限, 跳到(4)。如果 TA 定时器即将超时, 跳到(4)。如果 TA 定时器超时, 跳到(1)。

(3)计算目标用户当前业务子帧的时域信道响应的首径位置 $j_{\text{start}}(n)$ 、主径位置 $j_{\text{peak}}(n)$ 和尾径位置 $j_{\text{end}}(n)$; 并对 3 个位置分别做平滑, 然后跳到(2)。

平滑方法如下:

如果 $\text{mod}(n-1, M_InLoop) = 0$, 那么

$$\left. \begin{aligned} \bar{j}_{\text{start}}(1) &= j_{\text{start}}(1) \\ \bar{j}_{\text{peak}}(1) &= j_{\text{peak}}(1) \\ \bar{j}_{\text{end}}(1) &= j_{\text{end}}(1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其他情况下:

$$\left. \begin{aligned} \bar{j}_{\text{start}}(n) &= (1-p)\bar{j}_{\text{start}}(n-1) + pj_{\text{start}}(n) \\ \bar{j}_{\text{peak}}(n) &= (1-p)\bar{j}_{\text{peak}}(n-1) + pj_{\text{peak}}(n) \\ \bar{j}_{\text{end}}(n) &= (1-p)\bar{j}_{\text{end}}(n-1) + pj_{\text{end}}(n) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

p 为均值遗忘因子, 满足 $p \in [0, 1]$ 。

(4)如果 Flag 为 1, 则使用主/首/尾径位置的平滑值计算 TA。然后对同步控制计数器置 0, 对 Flag 置 0, 跳到步骤(5); 如果 Flag 为 0, 则对同步控制计数器置 0, 对 Flag 置 0, 跳到步骤(2)。

TA 计算方法为:

首先计算定时误差: $\varepsilon = J_{\text{target}} - \bar{j}_{\text{peak}}$

如果 $\varepsilon_{\text{peak}} < 0$: $\text{TA} = -\max \left(\min \left(\text{round} \left(\frac{|\varepsilon|}{16} \right), \text{fix} \left(\frac{\bar{j}_{\text{start}}}{16} \right) \right), 1 \right)$

如果 $\varepsilon_{\text{peak}} > 0$: $\text{TA} = \max \left(\min \left(\text{round} \left(\frac{|\varepsilon|}{16} \right), \text{fix} \left(\frac{N_{\text{CP}} - \bar{j}_{\text{end}}}{16} \right) \right), 1 \right)$

其他情况下: $\text{TA} = 0$

(5)在满足目标用户时序的下行子帧上发送该 TA, 跳到(2)。

UE 端流程:

(1)按照调度命令发送信号

如果在第 n 帧接收到 TA, 那么在第 $n+6$ 帧之后的第 1 次上行发送开始按照该 TA 调整发送定时; 如果没有接收到 TA, 一直按以前的发送定时发送, 直到 TA 定时器超时。

3.2 外环同步控制

外环同步控制的目的是调整用户的峰值目标位置, 以保证信道冲激响应在预测窗内。外环同步控制模块完成信道冲激响应目标峰值位置的更新。在每个外环控制周期, 外环同步控制模块都会生成新的目标峰值位置, 并且输出给内环同步控制模块使用。

外环同步控制的流程如下:

在一个控制周期内, 对用户信道冲激响应的起始位置 $j_{\text{start}}(n)$, 峰值位置 $j_{\text{peak}}(n)$, 结束位置 $j_{\text{end}}(n)$ 的瞬时值分别设置一个计数器, 记做 StartCount, PeakCount 和 EndCount。计数器在每个周期的开始时刻清零, 当起始位置 $j_{\text{start}}(n)$ 等于 1 时, StartCount 加 1; 当峰值位置 $j_{\text{peak}}(n)$ 等于 1 或 N_{CP} 时, PeakCount 置 1; 当结束位置 $j_{\text{end}}(n)$ 等于 N_{CP} 时, EndCount 加 1。在每个外环调整周期的最后一个半帧(或无线帧), 根据该周期内 3 个计数器分别与其门限的关系, 以及首径位置均值 $\bar{j}_{\text{start}}(n)$, 峰值位置均值 $\bar{j}_{\text{peak}}(n)$, 以及结束位置均值 $\bar{j}_{\text{end}}(n)$ 来确定下一外环调整周期内目标峰值位置 j_{target} 。新的 j_{target} 等于当前帧的峰值位置均值 $\bar{j}_{\text{peak}}(n)$ 和偏移量 $\Delta_{\text{target}}(n)$ 的和。

偏移量 Δ_{target} 的确定步骤如下: 首先考察 PeakCount, 如果 PeakCount 为非零值, 认为外环同步控制非常不准确, 直接把目标值设置为经验目标值 $[N_{\text{CP}}/3]$ 。不再考察 StartCount 和 EndCount。

当 PeakCount 为 0 时, 考察 StartCount 和 EndCount, 有 4 种情况:

情况 1: StartCount < Threshold_{Count} and EndCount < Threshold_{Count}

此时认为信道冲激响应位于 CP 之内, 即认为当前的目标峰值位置比较合理。调整策略是, 调整峰值位置使信道冲激响应更可能保持在 CP 之内, 即

$$\Delta_{\text{target}} = \begin{cases} \min(j_{\text{target}} - \bar{j}_{\text{peak}}, N_{\text{CP}} - \bar{j}_{\text{end}}), & \bar{j}_{\text{peak}} < j_{\text{target}} \\ 0, & \bar{j}_{\text{peak}} = j_{\text{target}} \\ -\min(\bar{j}_{\text{peak}} - j_{\text{target}}, \bar{j}_{\text{start}} - 1), & \bar{j}_{\text{peak}} > j_{\text{target}} \end{cases} \quad (6)$$

这里的 j_{target} 表示当前的目标峰值位置。

情况 2: StartCount \geq Threshold_{Count} and EndCount < Threshold_{Count}

此时认为信道冲激响应的起始位置位于 CP 之外, 结束位置位于 CP 内。调整策略是, 保证结束位置在 CP 内, 并尽可能使起始位置向 CP 靠拢。即

$$\Delta_{\text{target}} = \min\left(0, \left\lfloor \frac{N_{\text{CP}} - \bar{j}_{\text{end}}}{2} \right\rfloor\right) \quad (7)$$

这里采用 $\left\lfloor \frac{N_{\text{CP}} - \bar{j}_{\text{end}}}{2} \right\rfloor$ 而不是 $\lfloor N_{\text{CP}} - \bar{j}_{\text{end}} \rfloor$, 是对调整量进一步做平滑, 以避免没必要的震荡。

情况 3: StartCount < Threshold_{Count} and EndCount \geq Threshold_{Count}

此时认为信道冲激响应的起始位置位于 CP 之内, 结束位置位于 CP 外。调整策略是, 保证起始位置在 CP 内, 并尽可能使结束位置向 CP 内移动。

$$\Delta_{\text{target}} = -\min\left(0, \left\lfloor \frac{\bar{j}_{\text{start}} - 1}{2} \right\rfloor\right) \quad (8)$$

这里采用 $\left\lfloor \frac{\bar{j}_{\text{start}} - 1}{2} \right\rfloor$ 而不是 $\lfloor \bar{j}_{\text{start}} - 1 \rfloor$ 的原因与情况 2 中相同, 不再赘述。

情况 4: StartCount \geq Threshold_{Count} and EndCount \geq Threshold_{Count}

此时认为信道冲激响应完全位于 CP 外。此时目标峰值位置设为峰值均值, 有: $\Delta_{\text{target}} = 0$ 在得到偏移量 $\Delta_{\text{target}}(n)$ 后, 计算下一控制周期内用户的峰值目标位置为 $j_{\text{target}}(n) = \bar{j}_{\text{peak}}(n) + \Delta_{\text{target}}(n)$, 在外环控制过程中, Threshold_{Count} 的设置对外环同步控制有比较大的影响。但总的来说, 外环同步控制对整个同步控制过程影响不大。

4 性能仿真

本仿真工具使用 Matlab, 仿真环境使用的是 LET TDD 的系统 20 MHz 仿真平台。同步跟踪控制中用到的主要参数取值如表 1。

有关情况说明如下:

(1) 仿真曲线中“精确定时”表示理想定时。“定时偏移 100”表示定时偏差一直为 100。而“同步控制 100”表示在第 500 个子帧时发送定时瞬间调整为 100, 之后由同步控制模块生成定时提前量对发送定时进行调整。其余标识意义相似。

(2) 定时偏移为正值为开窗位置靠前的情况, 此时引入相位旋转, 但引入较小的 ISI; 定时偏移为负值为开窗位置靠后的情况, 此时引入较严重的 ISI。

(3) 仿真只开启内环同步控制模块, 而没有开启外环同步控制模块。

仿真结果如图 2-图 7 所示。

图 2 和图 3 表明, 低速情况非精确定时的情况

表 1 参数设置

载波频率 f_c	2 GHz	均值遗忘因子 p	1/8
子载波宽度 Δf	15 kHz	Step	16
IFFT/FFT 点数 N	2048	信道类型	TU (截短)
循环前缀 N_{CP}	144	移动速率 v	3 km/h, 300 km/h
接收天线数目	1, 4	仿真 block 数目	[2000 8000 10000 30000]
用户占用子载波数	72	M_{inLoop} 内环调整周期	16
阈值系数 α	0.1		

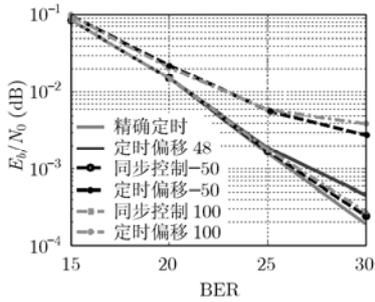


图 2 1×1 天线、64 QAM、速度为 3 km/h 时的 BER 曲线

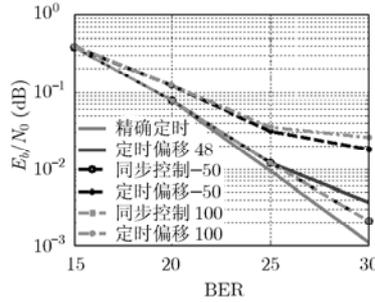


图 3 1×1 天线、64 QAM、速度为 3 km/h 的 BLER(误块率)曲线

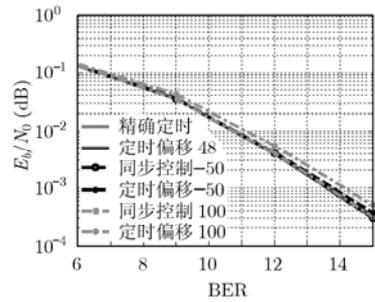


图 4 1×2 天线、16 QAM、速度为 120 km/h 的 BER 曲线

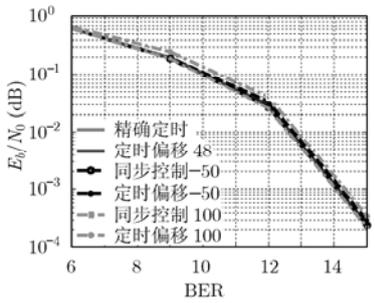


图 5 1×2 天线、16 QAM、速度为 120 km/h 的 BLER 曲线

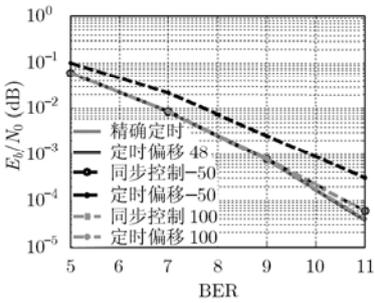


图 6 1×4 天线、16 QAM、速度为 300 km/h 的 BER 曲线

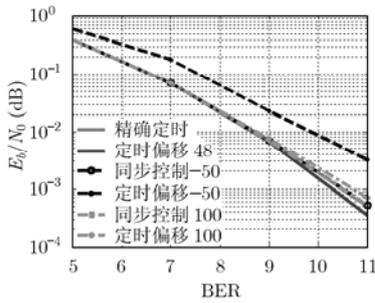


图 7 1×4 天线、16 QAM、速度为 300 km/h 的 BLER 曲线

下, 相比较精确定时, 开启同步控制模块, 在不同性能要求时, 会有 0~1.5 dB 不等的性能损失。比较有定时偏移但不开启同步控制模块的结果, 可以看出同步控制模块对系统性能提升很大。

图 4, 图 5 表明, 在中高速情况下, 开启同步控制模块时, 性能与精确定时几乎没有差别。偏移为 100 时, 开启同步控制会有 0.3 dB 的性能改善。偏移为 -30 时, 开启同步控制会有 0.5 dB 左右的性能改善。

图 6 和图 7 表明, 在高速情况非精确定时的情况下, 相比较精确定时, 开启同步控制模块, 与精确定时的性能差别非常微小。与负定时偏移但不开启同步控制模块的结果比较, 可以看出同步控制模块对系统性能提升很大。而相对正定时偏移但不开启同步控制模块的情况, 提升并不明显。

由以上仿真结果可以看出, UE 速度为低速或高速, 以及不同的工作信噪比, 同步控制都能够较好地工作, 避免定时不准确导致的 ISI。

5 结论

本文首先分析了利用上行用户的信道估计信息进行用户脉冲响应起始位置、峰值位置和结束位置的检测的方法, 并在此基础上提出了 TDD LTE 系统一种可行的上行同步控制算法。通过仿真, 说明本文提出的上行同步控制算法能够满足 LTE TDD 系统上行同步控制的需要。

参考文献

[1] 3GPP TS 36.211 V8.2.0 (2008-03), Physical Channel and Modulation (Release 8).
 [2] Stefan Parkvall, Johan Sköold, and Per Beming. Evolution

- HSPA and LTE for Mobile Broadband. Erik Dahlman, 2007.
- [3] 3GPP TS 36.213 V8.5.0 (2008-12), Physical layer procedures, (Release 8).
- [4] R1-080889, Ericsson. Maximum timing advance for TDD. TSG-RAN WG1 #52, Sorrento, Italy, February 11-15, 2008.
- [5] R1-070377, Nokia. Restricted sets of RACH preamble signatures for environments with high Doppler shifts. 3GPP TSG RAN WG1 #47bis, Sorrento, Italy, January 15-19, 2007.
- [6] R1-072892, Huawei. RACH Transmission timing in LTE TDD frame structure type 2. 3GPP TSG-RAN-WG1 Meeting # 49bis, Orlando, FL, USA, June 25-29, 2007.
- [7] R1-080889, Ericsson. Maximum timing advance for TDD. TSG-RAN WG1 #52, Sorrento, Italy, February 11-15, 2008.
- [8] R1-080365, Ericsson. Maximum timing advance for TDD. TSG-RAN WG1 #51bis, Sevilla, Spain, January 14 - 18, 2008.
- [9] R1-073738, Ericsson. RACH transmission timing alignment for LTE TDD. TSG-RAN WG1 50, Athens, Greece, August 20-24, 2007.
- [10] 3GPP, TS 36.211 V8.2.0 (2008-03), Physical Channel and Modulation (Release 8).
- 陈 禹: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为 3G LTE 研究、无线宽带网络技术等.
- 温向明: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代通信技术.
- 郑 伟: 女, 1979 年生, 讲师, 研究方向为现代通信技术.