第37卷 第17期
Vol.37 No.17

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2011年9月
September 2011

·网络与通信·

文章编号：1000—3428(2011)17—0061—03 文献标识码：A 中图分类号：TN929.5

基于修正CQI反馈参数的分组调度方法

姚 丹，季仲梅，崔维嘉

(解放军信息工程大学信息工程学院，郑州 450002)

摘 要：无线信道的非理想特性会使用户设备反馈给演进型基站(eNode B)的下行信道质量指示(CQI)参数值产生误差，从而降低调度器灵活调度的性能。为此，给出一种基于修正CQI反馈参数的快速分组调度方法，该方法在指数平滑预测模型及二次移动平均预测模型的基础上，利用CQI先验信息，通过组合预测对eNode B接收到的CQI参数值进行修正。仿真结果表明，该方法的吞吐性能够得到有效提升。

关键词：长期演进；分组调度；信道质量指示；粗略反馈

Group Schedule Method Based on Modified CQI Feedback Parameter

YAO Dan, JI Zhong-mei, CUI Wei-jia

(Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

【Abstract】Scheduler can not work well for wireless channel which causes Channel Quality Indicator(CQI) parameter error when transporting for eNode B. A modified CQI-based packet schedule method for Long Term Evolution(LTE) is proposed. This method is based on the exponent smoothing forecast model and secondary moving average forecast method, combining priori parameters. Simulation result indicates that it can improve the throughput when scheduling.

【Key words】Long Term Evolution(LTE); group schedule; Channel Quality Indicator(CQI); rough feedback

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.17.019

1 概述

第三代合作伙伴计划(the 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)启动的长期演进(Long Term Evolution, LTE)项目具有高数据率、低时延、基于全分组、共享信道传输以及网络结构扁平化等特点，与现有的第三代移动通信(the 3rd Generation, 3G)系统有着本质的区别[1]。为了能够快速匹配不同无线信道下的数据速率，满足各类高速分组数据业务的服务质量(Quality of Service, QoS)要求，LTE系统的调度器(调度算法得以实现的功能实体)由WCDMA的无线网络控制(Radio Network Control, RNC)侧下移到了演进型基站(eNode B)侧，且调度时隙缩短为1 ms，使其可以更加及时的适应无线信道变化特性进行灵活的调度。eNode B中的快速分组调度将主要依据QoS参数、用户设备(User Equipment, UE)的下行信道质量指示(Channel Quality Indicator, CQI)参数反馈、eNode B有待调度的负载量以及系统参数等要素展开灵活的资源分配[2]。其中，UE的CQI反馈参数是分组调度判决过程中考虑的最为关键的要素之一，是调度判决操作的基础。

现有的分组调度算法通常默认eNode B接收到的CQI反馈参数值在传输过程中未受无线信道的干扰，即eNode B接收到的值即为UE发送的参数值，该处理方式忽略了由于无线信道错误传输带来的影响。但文献[3]的研究表明，UE反馈到Node B的CQI数值有较大的误差，即使在低速如3 km/h情况下，典型的均方根(Root Mean Square, RMS)误差也接近2 dB，高速如120 km/h情况下的RMS误差高达6 dB左右。这说明CQI的反馈是一种粗略的反馈。因此，现有的直接依据CQI反馈参数的分组调度判决也将是一种粗略的判决[4]，判决结果未必就是当前实际的最佳判决结果，因此存在由于CQI粗略反馈而引起的分组调度判决失效及网络性能下降的隐患。文献[5]给出一种利用自动重传请求(Automatic Repeat Request, ARQ)的应答(ACK/NACK)与前向信道质量的高度相关性，省略CQI信息反馈，只基于ACK反馈进行下行分组调度判决的机制。该调度机制的优点是利用CQI粗略反馈的特点以及ACK与CQI的高度相关特性省略了UE向Node B的CQI反馈，减少了UE与Node B之间的信令交互，依据ACK/NACK应答来完成调度判决。但ACK/NACK的反馈对于分组调度判决来说也是一种对信道真实状况的定性反映，对调度判决的贡献也同样是粗略的。此外，在LTE系统中，由于无线信道的CQI反馈信息还将用于自适应调制编码(Adaptive Modulation Coding, AMC)、干扰管理及功率控制等方面，因此CQI的参数反馈不可避免。

本文给出一种基于修正CQI反馈参数的分组调度方法，通过改善CQI粗略反馈对快速分组调度带来的影响，使调度器能够充分利用无线信道资源进行灵活的调度，从而提升LTE系统的吞吐量性能。

2 基于修正CQI反馈参数的分组调度方法

2.1 设计思想

由于现有的3G系统调度时隙较长，不同时隙CQI反馈参数间的相关性较弱，不利于对CQI反馈参数的有效修正。因此，现有的分组调度算法通常忽略CQI参数粗略反馈的特点，直接依据eNode B接收到的CQI反馈参数参与调度判决。显然，这种参数处理方法不利于调度器针对无线信道状况进

基金项目：国家“863”计划基金资助重点项目(2009AA011504)

作者简介：姚 丹(1983－)，女，硕士研究生，主研方向：下一代移动通信技术；季仲梅，教授；崔维嘉，讲师、博士

收稿日期：2011-04-15 **E-mail：**yaodanxjj@hotmail.com

行灵活的调度。为进一步提升分组调度性能，同时考虑到 LTE 系统分组调度器位置下移及调度时隙大大缩短为 CQI 参数修正带来的有利影响，本文给出一种结合修正 CQI 反馈参数的分组调度方法。该方法的主要思想为利用当前反馈的 CQI 参数与具有连续 ACK 回传的先验信息之间的相关性[5]，采用基于两级单项预测模型的组合预测方式实现对 CQI 反馈参数的修正，进而辅助提升分组调度性能。基于修正 CQI 反馈的快速分组调度方法如图 1 所示。

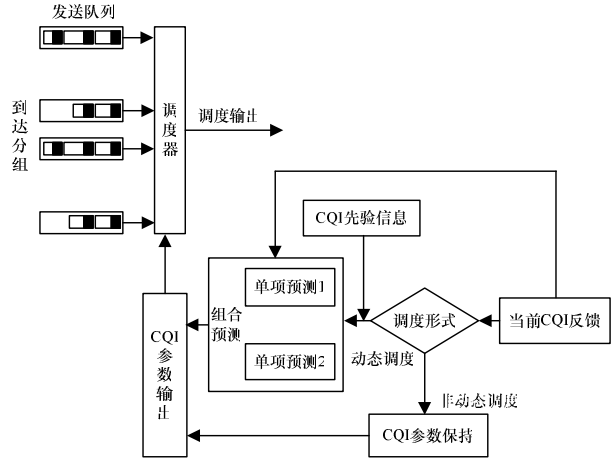


图 1 基于修正 CQI 反馈参数的方法示意图

UE 向 eNode B 上报的 CQI 反馈参数可以综合反映小区内不同待调度 UE 所处无线信道的信干比(Signal to Interference Ratio, SIR)状况及 UE 的接收机性能，是快速分组调度的重要信息来源。设计中，首先，通过调度形式来判定是否对当前 CQI 反馈参数进行修正，如果调度形式符合修正条件，那么将对当前 CQI 反馈参数进行修正，反之，则保持当前的 CQI 反馈参数。其次，若复合修正条件，那么将结合连续具有 ACK 回传的 CQI 先验信息，利用指数平滑预测模型及二次移动平均预测模型分别得到的单项预测值进行组合预测，完成对 CQI 反馈参数的修正。再次，将经过处理后的 CQI 反馈参数输出至分组调度器。最后，由分组调度器判决当前为哪个待调度 UE 提供服务。

2.2 CQI 反馈参数修正

由于当前 TTI 反馈的 CQI 参数与具有 ACK 回传的 CQI 反馈参数间具有高度的相关性，因此利用这些有效的先验信息能够对 CQI 反馈参数进行有效地修正。由于时间序列 CQI 参数在局部时间范围内具有缓慢波动的特性，因此本文采用指数平滑预测模型对 CQI 反馈参数进行一级预测。同时，为克服对 CQI 的预测产生滞后现象，本文采用二次移动平均预测模型对 CQI 反馈参数进行二级外推预测。考虑到采用 2 种单项预测模型的预测精度存在差异性，因此，在两级预测模型的基础之上，本文借助当前 TTI 反馈的 CQI 参数进一步确定了不同预测模型下的单项预测值在组合预测中的权重，通过组合预测的方式对 CQI 反馈参数进行更好的拟合。

(1)单项预测 1。该项预测利用了当前 TTI 以前具有连续 ACK 回传的 n 个 CQI 参数值作为先验信息完成预测。由于近期的先验信息所包含的信息量大，远期的先验信息所包含的信息量小，且时间序列 CQI 参数在局部时间范围内具有缓慢波动的特性，因此采用指数平滑预测模型[5]来估计当前的 CQI 参数值。

假设当前 TTI 以前有 n 个连续的 ACK，且权系数为：

$$\lambda_i = k \cdot w^i \quad i = 0,1,\cdots,n-1 \tag{1}$$

其中，$w \in (0,1)$；k 为常数。因为权系数满足 $\sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i = 1$ 即 $\sum_{i=0}^{n-1} k \cdot w^i = 1$，所以 $k = (1-w)/(1-w^n)$。从而指数平滑预测的计算公式为：

$$\hat{x}_{1(n+1)} = \lambda_0 x_n + \lambda_1 x_{n-1} + \cdots + \lambda_{n-1} x_1 = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1-w}{1-w^n} w^i x_{n-i} \tag{2}$$

其中，$\hat{x}_{1(n+1)}$ 表示 $(n+1)$ 时刻时间序列指标的预测值。因为 $w \in (0,1)$，所以 $\lim_{n \to +\infty} w^n = 0$。令 $\alpha = 1-w$ 为平滑系数，则 $\alpha \in (0,1)$ $w = 1-\alpha$。那么，上式可转化得到递推公式如下：

$$\hat{x}_{1(n+1)} = \alpha \sum_{i=0}^{\infty} (1-\alpha)^i x_{n-i} = \alpha x_n + (1-\alpha)\hat{x}_{1n} \tag{3}$$

由上式可见，采用指数平滑预测模型得到第 $(n+1)$ 时刻的指数平滑预测值等于第 n 时刻时间序列指标的实际接收值与第 n 时刻指数平滑预测值的加权平均。其中，初始的指数平滑预测取值为初始时刻时间序列的实际值。文献[6]经论证指出若时间序列指标值变化缓慢，α 取 0.3 左右；若时间序列指标值变化比较迅速，α 取 0.7~0.9 左右而选取得到。

(2)单项预测 2。该项预测是为了克服对 CQI 的预测产生滞后现象，采用二次移动平均预测模型，利用具有 ACK 回传的有效 CQI 先验信息及其对应的二次预测值进行外推预测。二次移动平均预测方法即首先对有效地 CQI 先验信息进行一次移动平均，然后利用全部有效先验信息所对应的二次预测值再进行一次移动平均，最终通过二次预测值的加权平均确定该模型下的最终预测值[6]。

一次移动平均值为：

$$\hat{x}_{2(n+1)} = \frac{x_n + x_{n-1} + \cdots + x_1}{n} \tag{4}$$

其中，$\hat{x}_{2(n+1)}$ 为一次移动平均值；$\{x_i, i = 1,2,\cdots,n\}$ 为当前 TTI 以前实际接收到的具有连续 ACK 回传的 n 个 CQI 参数值。

对一次移动平均值序列再进行一次移动平均就得到了二次移动平均值：

$$\hat{\hat{x}}_{2(n+1)} = \frac{\hat{x}_{2n} + \hat{x}_{2(n-1)} + \cdots + \hat{x}_{21}}{n} \tag{5}$$

其中，$\hat{\hat{x}}_{2(n+1)}$ 为二次移动平均值；$\{\hat{x}_{2i}, i = 1,2,\cdots,n\}$ 为当前 TTI 以前实际接收到的具有连续 ACK 回传的 n 个 CQI 参数值所分别对应的 n 个二次移动平均预测值。

文献[6]经论证给出二次移动平均预测值关系式为：

$$\hat{x}_{2(n+1)} = 2\hat{x}_{2(n+1)} + \hat{\hat{x}}_{2(n+1)} \tag{6}$$

其中，$\hat{x}_{2(n+1)}$ 为二次移动平均预测值，它是一次移动平均值与二次移动平均值的线性组合。

(3)组合预测。由于 $\{x_i, i = 1,2,\cdots,n\}$ 序列单项预测模型的预测精度并不相同。本文在前 2 种单项预测模型的基础上，采用组合预测的方法使预测精度能得到进一步提高。

设第 i 种单项预测方法在第 $(n+1)$ 时刻的预测值为 $\hat{x}_{i(n+1)}, i = 1,2.$ 判断绝对值 $\left|(x_{n+1} - \hat{x}_{i(n+1)})/x_{n+1}\right|$ 与 1 的大小关系。令：

$$e_{i(n+1)} = \begin{cases} 1 & \left|(x_{n+1} - \hat{x}_{i(n+1)})/x_{n+1}\right| \geqslant 1 \\ \left|(x_{n+1} - \hat{x}_{i(n+1)})/x_{n+1}\right| & 0 \leqslant \left|(x_{n+1} - \hat{x}_{i(n+1)})/x_{n+1}\right| < 1 \end{cases} \tag{7}$$

其中，$e_{i(n+1)}$ 为第 i 种单项预测方法在第 $(n+1)$ 时刻的预测相对差距，$0 \leqslant e_{i(n+1)} \leqslant 1$，$x_{n+1}$ 为当前 TTI 实际接收到的 CQI 反馈参数，$\hat{x}_{i(n+1)}$ 为第 i 种单项预测模型的估计值。

组合预测加权平均系数设定为：

$$\begin{cases} p_{1(n+1)} = e_{2(n+1)} / (e_{1(n+1)} + e_{2(n+1)}) \\ p_{2(n+1)} = e_{1(n+1)} / (e_{1(n+1)} + e_{2(n+1)}) \end{cases} \tag{8}$$

其中，$p_{i(n+1)}$，$i=1,2$ 为第 i 种单项预测方法在组合预测中的加权平均系数，$\sum_{i=1}^{2} p_{i(n+1)} = 1$；$e_{i(n+1)}$ 表征了第 i 种单项预测模型的估计值较实际接收 CQI 参数值的变异程度，因此，$e_{i(n+1)}$ 越大表示该单项预测模型下的估计值变异程度越大，从而该估计值在组合预测中的加权平均系数越小，反之则加权平均系数越大。令 $\hat{x}_{n+1}$ 为对当前 TTI 反馈的 CQI 参数的最终修正值，则修正公式为：

$$\hat{x}_{n+1} = \left[p_{1(n+1)} \hat{x}_{1(n+1)} + p_{2(n+1)} \hat{x}_{2(n+1)} \right] \tag{9}$$

该公式向下取整。这种修正 CQI 反馈参数的方法是利用当前 CQI 的实际反馈值、具有连续 ACK 回传的先验值以及基于 2 种单项预测模型的组合预测而得到的。其中哪种单项预测模型的相对差距越大就表示该预测结果较实际接收值的变异性越大，因此，该单项模型在组合预测中的权重越小，反之则会增大该模型预测值在组合预测中的权重。特殊的，如果当前 TTI 以前没有收到任何连续的 ACK 回传，那么此时将不对当前获得的 CQI 反馈参数值进行修正。

2.3　分组调度方法

最大载干比(Max C/I)调度算法是一种基于信道质量的分组调度算法，该算法按照信道的瞬时质量状况来划分所有待服务用户的优先级次序，调度判决最终选择具有最优信道条件的用户传输数据。调度判决所需不同待调度 UE 的最大载干比参数即通过 CQI 反馈参数转化获得。Max C/I 算法的调度判决表达式为：

$$i^* = \arg\max_i (u(i)) \tag{10}$$

其中，i 为待调度的用户编号；$u(i)$ 为待调度用户 i 所对应的最大载干比参数值。Max C/I 算法的优点在于它充分利用了不同用户无线信道条件的差异性，能够获得最佳的小区吞吐量性能。本文给出的新的快速分组调度方法即为以 Max C/I 算法为基础，以 CQI 反馈参数修正为依据，以充分利用无线信道特性为目标的快速分组调度方法。

3　仿真与结果分析

本文研究的是频分复用蜂窝小区内下行链路的快速分组调度机制，采用单小区网络拓扑结构[7-10]。通过仿真，比较 CQI 反馈参数修正与否对系统性能所带来的影响。基站位于小区的中心位置，采用两发两收天线，假设该小区内随机分布 20 个用户。该小区采用共享信道传送分组数据，位于 eNode B 的快速分组调度器在每个调度时隙判决为具有最优无线信道质量的用户来提供调度机会。假设物理层的帧长度能够根据发送速率自适应地改变，使每次传输均在一个时隙内完成。系统主要参数设置如表 1 所示。

表 1　仿真参数设置

参数	数值
小区半径	1 km
小区内 UE 分布	随机分布
小区内 UE 数目	20
UE 移动速度	3 km/h
发射及接收天线数	2×2
最小信号损耗	70 dB
传播模型	L=128.1+37.6lg(R) (R 为基站与用户间距离，单位为 km)
HARQ 最大重传数	4
调度重传	最高优先级
调制编码方式	QPSK、16QAM、64QAM
TTI	1 ms

当 CQI 平均周期为 1TTI、CQI 反馈循环 40TTI 时，CQI 参数修正前后单小区 eNode B 接收到的 SIR 与实际 SIR 间的 RMS 误差比较如图 2 所示。

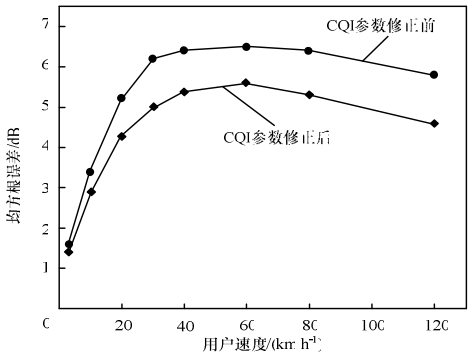


图 2　接收 SIR 与实际 SIR 间的 RMS 误差比较

图 3 为 CQI 参数修正前后的系统平均吞吐量对照。可以看出，新方法可以起到提升系统平均吞吐量的作用。但由于调度初期调度器获得的有效先验值有限，CQI 参数的修正条件不够充分，因此造成了仿真中修正 CQI 反馈参数后的快速分组调度算法短期内性能略低的状况。

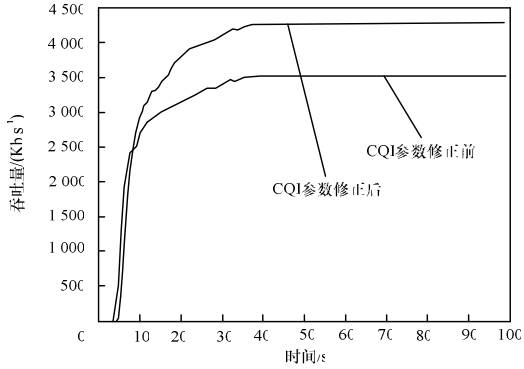


图 3　CQI 参数修正前后的系统平均吞吐量对照

修正 CQI 反馈参数值的分组调度算法性能能够得以提升的原因是因为 CQI 反馈参数的修正利用了已知的有效先验信息及组合预测模型更好的拟合当前无线信道的质量信息状况，使调度判决结果更趋近于当前的最佳判决结果，从而使得分组调度器对无线信道的利用可以更加充分，系统平均吞吐量因此相应的有所提升。

4　结束语

本文给出基于修正 CQI 反馈参数的快速分组调度方法，利用已知的有效先验信息及单项预测值，并采用指数平滑预测模型及二次移动平均预测模型组合的方式对当前反馈的 CQI 参数值进行修正，以有效改善由于 CQI 粗略反馈带来的不利影响，修正后的 CQI 参数为快速分组调度判决提供更加准确的无线信道质量信息，辅助提升快速分组调度判决的性能。仿真结果表明，这种基于修正 CQI 反馈参数的快速分组调度方法能有效提升系统的平均吞吐量。该算法的优点在于修正 CQI 反馈参数有助于分组调度器根据无线信道质量状况进行灵活的调度，可以有效提升系统的平均吞吐量性能。但同时，该调度方法也存在一定的局限性，即这种调度方法主要适用于 LTE 默认分配有效期较短的动态调度[11]。这是因为无线信道具有时变特性，当一次调度的分配有效期较长时，先验信息及 ACK 可信度标识与当前时刻 UE 反馈的 CQI 参数值之间的相关性就会减弱，不利于修正 CQI 反馈参数。

(下转第 66 页)