

基于边际效用的LTE系统调度算法的研究

为了实现LTE系统中高效的资源调度,支持实时业务,提出了一种基于边际效用函数的调度算法。该算法是在比例公平(Proportional Fair, PF)算法基础上,分别建立保证时延要求的边际效用算法模型和保证业务间公平性的多业务公平算法模型,二者结合推导出联合优化算法,通过对缓冲区中排队等待业务的调度优先级进行调整来实现。仿真结果表明,基于边际效用的联合优化算法,在保证一定系统吞吐量的前提下,与比例公平算法相比较,在业务间的公平性和时延性方面均有一定的提高,在有效性和公平性之间做出了更好的均衡。

靳佩佩 高 鹏 赵全明/河北工业大学电子信息工程学院



靳佩佩/硕士研究生

LTE (Long Term Evolution) 是3GPP组织主导制定的无线通信技术,旨在关注无线接口和无线组网架构的技术演进问题^[1]。LTE系统是一个多载波系统,下行基于OFDMA,上行基于SC-FDMA,相比于3G技术,在系统容量、传输速度方面有显著提高,在网络系统架构上进行简化^[2],因此,LTE系统对无线资源的调度提出了更高要求。

目前,在LTE无线资源调度中,主要存在着非实时调度和实时调度两类算法。常用的非实时调度算法有轮循调度(Round Robin, RR)算法、最大载干比调度(Max C/I)算法和比例公平(PF)算法等^[3]。其中,比例公平算法是轮循调度算法和最大载干比调度算法的折中,它同时兼顾了系统吞吐量和公平性,随着用户速率的提高,调度优先级逐渐降低,使得信道条件好的用户不会一直接受服务,信道条件差的用户则会因为一

直得不到服务而调度优先级得到提升,从而获得资源块。但是,比例公平算法限制了一部分信道条件好的用户的速率,将这一部分资源分配给信道条件差的用户,以此来保障用户之间的公平性,导致系统整体的吞吐量并不高。

针对PF算法出现的以上不足,引入边际效用的概念,边际效用^[4-5]属于经济学范畴,其基本思想就是让所有进入到系统中的业务进行排列组合,在保证一定吞吐量的前提下,通过边际效用使系统的性能整体最优,同时在比例公平算法的基础上进行改进,使它能够应用于实时业务,满足QoS时延要求^[6-7]。

系统模型及算法

1. 边际效用模型

利用边际效用原理,引入QoS保证时延等参数,得到S型函数,该函数能够准确地表现出业务在队列中的时延敏感变化,S型函数的表达式为

$$U_i(n) = \frac{1}{1 + e^{\delta(L - l_i(n))}} \quad (1)$$

式中, L 为用户 i 所能容忍的最大时延; $l_i(n)$ 为用户 i 的业务在缓冲区的队列时延; δ 为常数,取值范围为 $[0, 1]$,在实际调度中可根据时延敏感性的大小进行调节,且 δ 越大,S型函数的坡度越陡。

S型函数如图1所示。图1表明,在业务刚进入队列缓冲区时,由于边际效用时延敏感性比较平稳,随着队列时延的增加,时延敏感性逐渐增强,特别是在靠近时延门限 S 点处,敏感性最强,当队列时延超过 S 时,由于边际效用,时延敏

关键词/Keywords

LTE ·
调度算法 ·
实时业务 ·
边际效用 ·
服务质量QoS ·

国家科技支撑计划项目子课题(2013BAF02B04)。

感性逐渐减弱。

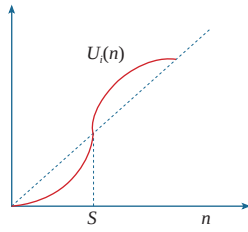


图1 S型函数

2. 多业务公平算法模型

考虑到PF算法使得不同业务之间的吞吐量趋于公平，因此在新算法中加入用户的服务质量（QoS）需求，用QoS速率需求来控制整个系统的资源分配，用于控制不同业务速率的速率因子Q和速率因子S，函数表达式为

$$Q_i(n) = \min \left[\left(\frac{R_i(n-1)}{R_L} \right)^\alpha, 1 \right] \quad (2)$$

$$S_i(n) = \max \left[\left(\frac{R_i(n-1)}{R_H} \right)^\beta, 1 \right] \quad (3)$$

式中， $R_i(n-1)$ 为用户*i*在第*n*个TTI之前传输速率的平均值； R_L 为用户*i* QoS速率要求的下限； R_H 为用户QoS速率要求的上限； α 、 β 均大于1，为函数参数，用来控制用户优先权的收敛速度。

3. 联合优化算法

设置系统的固定总带宽为*B*，在该带宽上有*i*个终端（UE）与分组调度器相连，假设信道不变，在每个子帧上，连续时间内子帧总是变化的，系统总带宽*B*在频域上被分为*K*个资源块（RB），数据被分为持续时间*T*子帧的数据块，其中传输时间间隔TTI=1 ms。用户*i*在所有载波的信道增益为

$$\text{Gain}_{i,k}(n) = 10^{\left[\frac{P_{l,i,k}(n)}{10} \right] + \left[\frac{\xi_{i,k}(n)}{10} \right] + \left[\frac{\text{mapth}_{i,k}(n)}{10} \right]} \quad (4)$$

式中， $P_{l,i,k}(n)$ 为第*r*个子载波的路径损耗； $\xi_{i,k}(n)$ 为第*r*个子载波阴影衰落所产生的增益； $\text{mapth}_{i,k}(n)$ 为第*r*个子载波多径衰落所产生的增益。用户*i*在每个子载波的信干噪比为

$$\text{SINR}_{i,k}(n) = \frac{P_k \text{Gain}_{i,k}(n)}{I + N_o} \quad (5)$$

式中， N_o 为噪声功率谱； P_k 为基站在第*r*个子载波

的发射功率；*I*为小区之间的干扰功率。

用户*i*在第*j*个资源块上的传输速率为

$$\text{DRC}_{i,j}(n) = \log_2[1 + \text{SINR}_{i,j}(n)] \quad (6)$$

根据用户*i*在第*n*个TTI每个资源块上的速率 $\text{DRC}_{i,j}(n)$ ，速率因子*S*和*Q*及基于边际效用函数的S型函数，最终得到第*n*个TTI中用户在每个资源块上的调度优先级因子，相关算式为

$$p_i(n) = \frac{\text{DRC}_i(n)}{R_i(n-1)} Q_i(n)^{-1} S_i(n)^{-1} U_i(n) \quad (7)$$

对于非实时业务，可将S型函数中的 $\delta=0$ ，此时S型函数值为1，调度优先级只考虑业务速率，尽可能地保证用户之间的公平性。

当用户*i*在第*n*个TTI时的平均传输速率 $R_i(n-1)$ 小于目标传输速率 R_L ，即 $R_i(n-1) < R_L$ 时， $Q_i(n) = \left(\frac{R_i(n-1)}{R_L} \right)^\alpha < 1$ ， $S_i(n) = 1$ ，最终会导致用户调度资源的优先级提升，从而满足最低目标传输速率。

当用户*i*在第*n*个TTI时的平均传输速率 $R_i(n-1)$ 大于 R_H ，即 $R_i(n-1) > R_H$ 时， $S_i(n) = \left(\frac{R_i(n-1)}{R_H} \right)^\beta > 1$ ， $Q_i(n) = 1$ ，导致用户调度资源的优先级下降，用户被调度的机会减小。

联合优化算法流程图如图2所示。

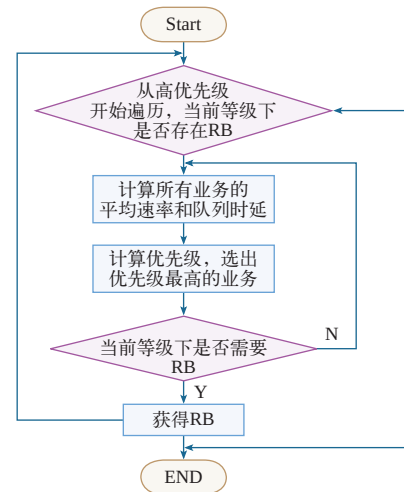


图2 联合优化算法流程图

所有业务的平均速率为

$$R_i(n) = \left(1 - \frac{1}{n_c}\right) R_i(n-1) + \frac{1}{n_c} \text{DRC}_i(n) \quad (8)$$

系统仿真

为了检验联合优化算法在系统吞吐量、公平性和时延性上的性能，借助奥地利维也纳大学的LTE仿真平台，在Matlab基础上对轮循调度（RR）算法、最大载干比调度（Max C/I）算法、比例公平（PF）算法和联合优化算法进行仿真比较。仿真过程中所设定的参数如下表所示。

表 仿真过程中的参数设定

参数	取值
小区拓扑	正六边型，7小区，每小区3个小区
带宽/MHz	5~20
子载波间隔/kHz	15
资源块大小	12个子载波
噪声密度/（dBm/Hz）	-174
$nT_x \times nR_x$	2×2
发射方式	TxD and OLSM
基站间距/m	500
用户移动速度/（km/h）	5
基站天线增益/dBi	15
传输时间间隔/ms	1

理论上，轮循调度（RR）算法保证所有用户可以按照相同的概率调度资源，不考虑信道条件，故公平性最好；最大载干比调度（Max C/I）算法只考虑信道条件，信道条件差的用户无法获得资源，故系统吞吐率最高，但公平性最差；比例公平（PF）算法的公平性和吞吐率均介于以上二者之间。

仿真结果表明，在系统吞吐量方面，图3为4种调度算法中系统吞吐量随终端UE数量的变化，其中Max C/I算法的系统吞吐率是最好的，联合优化算法和PF算法相近。

在用户速率方面，图4~图7分别为RR算法、Max C/I算法、比例PF算法和联合优化算法的用户速率的分配，图中纵轴代表了整个小区中各个速率的用户数量。

对比图4~图7，RR算法的用户速率分布密度最集中，但用户的最高带宽速率也是最低的；Max C/I算法的用户速率分布很分散，但部分用户能够获得最大的带宽速率。联合优化算法中用户的最

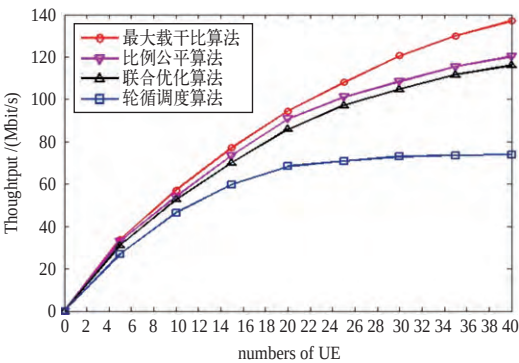


图3 系统吞吐量变化图

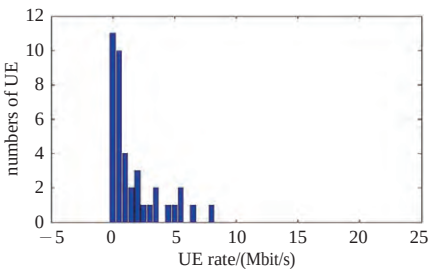


图4 RR算法用户速率分布图

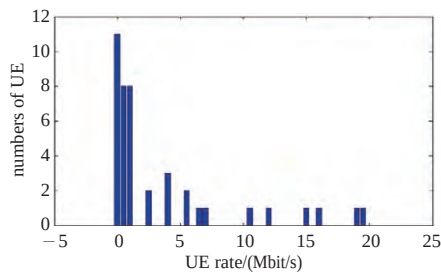


图5 Max C/I算法用户速率分布图

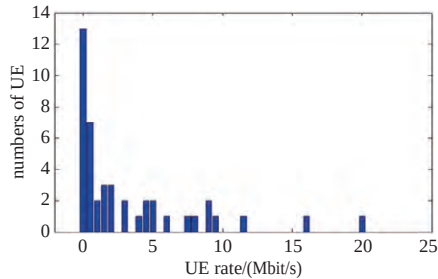


图6 PF算法用户速率分布图

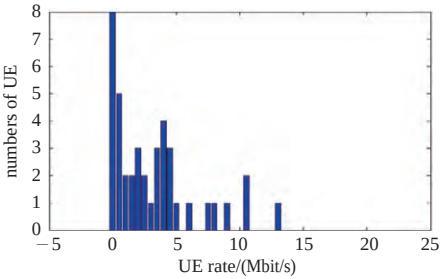


图7 联合优化算法用户速率分布图

大速率比PF算法稍低，但在高速率区的用户数量比较集中。

在公平性方面，利用CDF标准曲线，在它右侧的曲线符合公平性原则，仿真结果如图8所示。仿真结果表明，联合优化算法比PF算法在公平性上有一定提升。

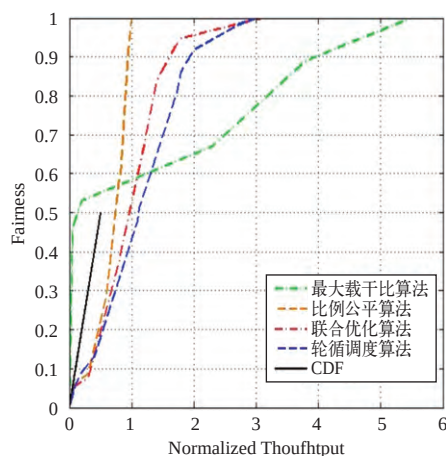


图8 四种调度算法公平性性能比较

在时延性方面，仿真结果如图9所示。仿真结果表明，联合优化算法比PF算法在时延性上有一定的改进。

结束语

主要研究基于边际效用的实时业务调度算法，采用边际效用中的分析机制来处理无线资源调度问题，在比例公平算法的基础上提出改进的联合优化算法。该算法侧重整体，兼顾了系统吞吐量、用户间的公平性和业务的时延性等性能指标，使系统整体的性能得到较大提升。

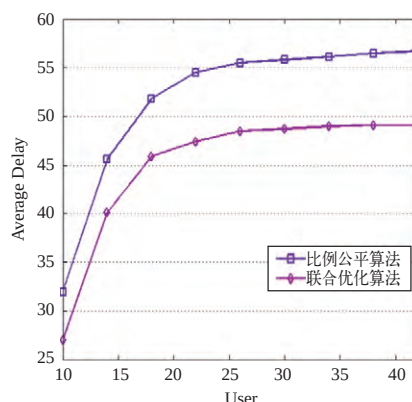


图9 联合优化算法与PF算法延时性

参考文献

- [1] 曾召华. LTE基础原理与关键技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
- [2] 王浩光. LTE关键技术及其发展趋势 [J]. 信息技术与信息化, 2014 (4): 139-141.
- [3] 陈磊, 卢军, 印翀. LTE基于QoS业务的比例公平调度算法研究 [J]. 光通信研究, 2012 (5): 64-67.
- [4] 陈威. 论边际效用递减规律 [J]. 金融经济, 2011 (8): 84-85.
- [5] 王容昌. 简论边际效用递减规律 [J]. 西北第二民族学院学报: 哲学社会科学版, 2006 (1): 12-15.
- [6] 吴宣利, 韩杏玲, 赵婉君. LTE系统中一种低丢包率的实时业务调度算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47 (3): 24-28.
- [7] 杨俊蓉, 樊自甫. 基于时延和速率效用函数的LTE无线资源调度算法研究 [J]. 数字通信, 2011 (2): 57-60.

(收稿日期: 2015-03-15) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告