



LTE 系统中基于负载的能量有效性调度策略

文 凯^{1,2}, 苗亚丽¹

(1. 重庆邮电大学 重庆 400065; 2. 重庆信科设计有限公司 重庆 400065)

摘 要:针对绿色通信中如何能在保证一定服务质量的前提下降低能量消耗这一关键问题,根据带宽交换能量的思想,综合考虑系统吞吐量和用户间公平性,提出了 LTE 下行传输中基于负载的资源调度策略,通过降低频谱效率换取能量效率的提高,以达到节能的目的。仿真结果表明,所提的两个算法在满足用户速率要求的同时都能在很大程度上降低发射功率,且保证了用户间的公平性。

关键词:绿色通信; LTE; 调度策略; 能量效率

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.12.003

An Energy-Efficient Scheduling Strategy Based on Load Conditions in LTE System

Wen Kai^{1,2}, Miao Yali¹

(1. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Information Technology Designing Co., Ltd., Chongqing 400065, China)

Abstract: The key question of green communication is how to reduce energy consumption while maintaining the quality of service. According to the conception of trading bandwidth for energy, with the addition of taking system throughput and fairness among users into consideration, a resource scheduling strategy based on system load conditions for LTE downlink was proposed to reduce energy consumption by improving energy efficiency at the cost of spectral efficiency. The simulation results show that the two algorithms can greatly reduce transmit power on the premise that the requirements of the user rate are met, and ensure the realization of the fairness among users.

Key words: green communication, LTE, scheduling strategy, energy efficiency

1 引言

无线通信变革了人们的通信方式,而通信行业的快速发展和广泛应用引发的环境问题已不容忽视,早在 2008 年,通信行业产生的 CO₂ 排放量已占全球 CO₂ 排放量的 2%,预计到 2020 年,这一数字会上升为 3%^[1],所以绿色通信成为近年来的一个研究热点,参考文献[2]从技术、环境、经济等多方面说明了发展节能的绿色通信技术比仅局限于提高用户 QoS (quality of service, 服务质量) 的策略更有必要。ITU 已确认 2012 年全球手机用户数达到 60 亿户,无线通

信产业的能量消耗对全球变暖造成的影响正逐渐加大,由此可见发展绿色通信的必要性和重要性。

2012 年,作为 3GPP 的最新无线通信标准,LTE 在全球用户数已达到 9 230 万户,iSuppli 预测到 2014 年 LTE 用户数将达到 3 亿户,所以在维持 QoS 要求的同时降低基站发射功率,极具研究价值。目前已有一些研究机构和学者在研究如何通过分组调度降低基站发射功率,并取得了一定的成果。参考文献[3]从能量效率角度出发,比较了 Max C/I (最大载干比)、RR (round robin, 轮询)、PF (proportional fairness, 比例公平) 3 种经典调度算法在不同环境的下行

传输中的性能, 仿真证明了 Max C/I 算法频谱效率和能量效率均优于其他两种算法, 但公平性最差。参考文献[4]展示了资源调度算法通过利用多用户分集以提高系统增益, 这种增益可以转换为能量节省。参考文献[5]引入了电路级功率模式以分析无线通信系统中不同信道条件下带宽、功率和调制方案对能量效率的影响, 证明了自适应调制方案能改善带宽和能量效率间的折中效果。参考文献[6]论述了调制编码方式和节约能量的关系, 说明了可以在非满负载情况下以频谱换取功率方案的可行性, 并提出了在保证用户速率前提下逐级降低调制方式的能效有效性调度方案。参考文献[7]同样使用频谱换取功率的思想, 提出了低负载传输下的 BEM (bandwidth expansion mode, 带宽扩大模式) 技术, 但不适用于高负载情况。参考文献[8]则提出了一种在低负载和高负载情况下均有效的能量感知分组调度方案。

目前, 对 LTE 下行传输中能量有效性调度的研究相对较少, 并存在一定的缺陷, 即只考虑在保证 QoS 的前提下降低发射功率, 忽略了调度的另外两个主要目标——吞吐量和公平性。一个好的调度算法应能实现上述几个参量间的很好折中, 发射功率的大幅度降低若以牺牲吞吐量为代价或者使用户间公平性较差, 并不能获得高的网络综合性能。本文分析了影响发射功率的因素, 提出了一种用于 LTE 下行传输中基于负载的能量有效性调度方案, 致力于在满足用户数据速率的前提下使发射功率降到最低, 同时能保证用户间公平性, 且从不同的角度进行了能量节省算法的分析和设计, 提出了两种资源分配算法。

2 系统模型和相关参量

低频谱效率模式仅支持低的数据速率, 低调制方式所需的发射功率较低, 所以在系统非满负载的情况下, 可以把满足用户速率要求的剩余频谱再分配给用户, 从高频谱模式转换到低频谱效率模式, 通过降低其调制方式达到能量节约的目的, 这是能量有效性调度策略的理论基础。

下行调度需要终端向基站上报 CQI (channel quality indicator, 信道质量指示) 作为最高 MCS 指示, 本文选择合适的 CQI 值时使用 BLER (block error rate, 误块率) 门限值的方法^[9], 即根据当前 SINR (signal-to-interference plus noise ratio, 信干噪比) 选择满足 $BLER \leq 10\%$ 的最高的 CQI, 由此原则产生的 SINR-CQI 对应如图 1 所示。每个 MCS (modulation and coding scheme, 调制编码方案) 等级可实现的数据速率表示为: $R = (\text{每符号子载波个数} / \text{符号} \times \text{编码速$

率 $\times$ 编码比特数 / 符号 $\times$ 每时隙 OFDM 符号数) / 时隙长度^[10], SINR 取值范围以及可实现的数据速率见表 1。在 RB (resource block, 资源块) 分配过程中要根据用户的 SINR 值在表 1 中查找其最优调制方式同时更新用户瞬时速率。

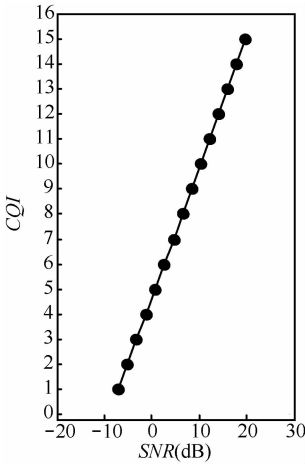


图 1 SINR-CQI 间的映射

表 1 调制编码方案

CQI 索引	调制	码率($\times 1024$)	比特率 (kbit/s)	SINR 范围 (dB)
1	QPSK	78	12.8	$[-8, -5]$
2	QPSK	120	19.7	$[-5, -3]$
3	QPSK	193	31.7	$[-3, -0.9]$
4	QPSK	308	50.4	$[-0.9, 0.9]$
5	QPSK	449	74	$[0.9, 2]$
6	QPSK	602	99.1	$[2, 5]$
7	16QAM	378	124.3	$[5, 7]$
8	16QAM	490	161.3	$[7, 8.5]$
9	16QAM	616	201.6	$[8.5, 10.1]$
10	64QAM	466	226.8	$[10.1, 12]$
11	64QAM	567	279.1	$[12, 13.5]$
12	64QAM	666	327.6	$[13.5, 15]$
13	64QAM	772	378	$[15, 18]$
14	64QAM	873	428.4	$[18, 19.8]$
15	64QAM	948	468.7	≥ 19.8

能量节省的程度主要依赖于资源分配方式和负载状况。负载在文中定义为满足所有用户速率需要的 RB 数和 RB 总数的比值。通常能量效率参数由 ECR (energy consumption rate, 能量消耗速率) 和 ERG (energy reduction gain, 能量降低增益) 两个参数表示。ECR 定义为:

$$ECR = \frac{P}{R} \text{ (J/bit)} \tag{1}$$

其中, P 和 R 分别为平均发射功率和数据速率, ECR



值越大说明能量效率越低。 ERG 定义为:

$$ERG = 1 - \frac{ECR}{ECR_r} \quad (2)$$

其中, ECR 表示在算法中根据所需发射功率值计算得到的值, ECR_r 为参考系统的值 (参考系统发射总功率取 46 dBm)。 ERG 值越小, 说明发射功率降低的程度越大。对一个通信系统而言, 要优化的参量很多, 正如本文前面所说, 一个好的调度算法, 要能在众多欲优化的参量中进行很好的折中, 尽可能提高系统综合性能。本文中的限制条件为用户目标数据速率和基站发射总功率, 设所有用户的数据速率要求相同为 T , 在满足用户速率要求的情况下优化 ERG 和吞吐量参量, 同时兼顾到用户间公平性。

3 分组调度方案

LTE 下行使用的是 OFDM 技术, 由于子载波间相互正交, 在研究中忽略小区内干扰, 只考虑小区间干扰。用户信道质量用 $SINR$ 表示为:

$$SINR_{k,c}(t) = \frac{P_T^{k,c}(t)G_k}{N + I_{k,c}} \quad (3)$$

其中, K 和 C 分别表示用户和 RB 总数, $P_T^{k,c}(t)$ 表示在调度时刻 t 若 RB_c 分配给用户 k 时该用户的发射功率值, G_k 是包括链路损耗、阴影衰落、天线增益在内的信道增益, N 和 $I_{k,c}$ 分别表示噪声和小区间干扰。由于分配给同一个用户的所有 RB 使用统一的 MCS 等级且发射功率等分, 所以这些 RB 的 $SINR$ 值由一个 $SINR$ 值表示即等效 $SINR$, 为了能说明问题且简化计算, 文中使用平均值代替。用户 k 的发射功率可表示为:

$$P_T^k(t) = n_k \times \frac{\overline{SINR}_k(t) \times (N + \bar{I}_k)}{G_k} \quad (4)$$

其中, n_k 是分配给用户 k 的 RB 数, $\overline{SINR}_k$ 表示用户 k 的平均 $SINR$ 值, $\bar{I}_k$ 是平均干扰值。基站总发射功率为所有用户发射功率的总和。

本文提出的能量效率分组调度方案中, 把资源分配过程分为两个阶段: 第一个阶段为初次分配阶段, 每个用户的数据速率要求得到满足后进入第二阶段; 第二阶段为能量降低阶段, 把第一阶段分配结束后剩余的 RB 根据此阶段的调度算法进行分配, 用多余的带宽换取能量效率的提高, 有效地降低发射功率。

3.1 初次分配阶段

初次分配的主要目的是满足用户速率要求, 则应该考虑用最少的 RB 数满足此要求, 尽可能地增大剩余 RB 数以换取最大的发射功率降低, 加上对系统吞吐量的考虑, 该阶段选择使用 Max C/I 算法进行资源的初次分配。一个用户分配到满足其数据速率要求后就不再给其分配资源, 当所有用户的速率要求都得到满足后该阶段结束。在调度时刻 t , 用户 k 的数据速率为:

$$r_k(t) = n_k \times f(\overline{SINR}_k(t)) \quad (5)$$

其中, $f(\overline{SINR}_k(t))$ 是根据平均 $SINR$ 值查询表 1 确定的可实现的速率。该算法描述如下。

步骤 1 H 是可用的 RB 集合, $H = \{1, 2, 3, \dots, C\}$, I 是用户集合, I_k 是分配给用户 k 的 RB 集合, $I_k = \Phi$, $k = 1, 2, 3, \dots, K$, n_k 为分配给用户 k 的 RB 总数, $n_k = 0$, $r_k(t) = 0$ 。

步骤 2 用户 $k=1$ 时, 判断瞬时速率是否小于速率要求, 若小于则找出该用户在 H 中的最优 ($SINR$ 值最大) RB_c 分配给该用户, 更新用户 k 的平均 $SINR$ 值, 在表 1 中查找对应的最优调制方式及对应的可实现的数据速率, $I_k = I_k + \{c\}$, $H = H - \{c\}$, 根据式 (5) 更新该用户数据速率 $r_k(t)$; 否则停止对该用户的资源分配, 开始对下一个用户的分配。所有用户的速率要求均得到满足时, 该阶段结束。

3.2 能量降低阶段

第一阶段关注频谱效率和用户速率要求是否得到满足, 不考虑用户的发射功率情况, 二次分配考虑的是如何用剩余带宽最大程度地提高能量效率。总发射功率受带宽、信道质量、调制方式等因素的影响, 在降低发射功率的同时不能忽略吞吐量和公平性的问题。本文将该阶段优先级分为两个部分: 用户优先级和一个用户下 RB 优先级, 选择用户时考虑功率降低和公平性问题, 为挑选出的用户分配 RB 时继续使用 Max C/I 算法, 在现有的条件下最大化吞吐量, 且从不同的影响发射功率的角度设计两种用户优先级算法。

(1) 多用户功率降低 (multi-user power reduce, MPR) 算法

增加带宽能降低满足速率要求的目标 $SINR$ 值, 从而降低调制等级, 所需的发射功率也就小了。该算法直接从发射功率入手, 选择得到资源后“瞬时”发射功率最小的用户, 并将该 RB 分配给此用户, 最大程度地降低基站总发射功率。则用户优先级为:

$$g_1 = \max_{k_1 \in I} \left(\frac{1}{P_{T_{k_1}}^1(t)} + f_{\text{fair}}^1 \right) = \max_{k_1 \in I} \left(\frac{1}{P_{T_{k_1}}^1(t)} + \exp(T/(r_{k_1}(t) - T)) \right) \quad (6)$$

其中, $P_{T_{k_1}}^1(t)$ 是调度时刻 t 用户 k_1 的瞬时发射功率, f_{fair}^1 是公平性函数, 这里使用用户瞬时速率来设计公平性函数, 该函数能很好地限制高吞吐量用户的优先级。

算法描述如下(承接初始分配阶段)。

步骤 3 为每个用户在 H 中挑选出最优 RB, 查表并计算若得到此 RB 后的“临时”速率和功率值。

步骤 4 根据式(6)选择用户 k_1 , 在 H 中其最优 RB 设为 c_1 , 更新相关参数 $n_{k_1} = n_{k_1} + 1$, $I_{k_1} = I_{k_1} + \{c_1\}$ 以及 $r_{k_1}(t)$ 和瞬时功率值, 若瞬时速率小于速率要求, 继续使用 Max C/I 算法给该用户分配 RB, 若满足要求则进行下一步。

步骤 5 判断集合 H 是否为空, 若不为空则返回执行步骤 3, 若为空则该 TTI 内的调度算法结束。

(2)多用户能量效率(multi-user energy efficiency, MEE)算法

ECR 值越大, 说明能量消耗越快, 若能使得每个用户的 ECR 值都较小, 总发射功率会相应地降低。从这个角度出发, 将用户优先级设计为:

$$g_2 = \max_{k_1 \in I} \left(\frac{1}{ECR_{k_1}(t)} + f_{\text{fair}}^2 \right) = \max_{k_1 \in I} \left(\frac{R_{k_1}(t)}{P_{k_1}(t)} + \frac{1}{n_{k_1}(t)} \right) \quad (7)$$

其中, $P_{k_1}(t)$ 和 $R_{k_1}(t)$ 分别为用户 k_1 的瞬时功率和速率值, $n_{k_1}(t)$ 为其获得的瞬时 RB 个数, 使用用户已分配到的 RB 数目以保证用户间的公平性。带宽的增大带来调制等级的降低和吞吐量的增加, 通过给高 ECR 用户分配更多的资源以降低该用户的调制等级, 故而能降低其发射功率。该算法执行步骤和算法(1)相同, 将步骤 4 中的用户优先级换为式(7)即可。

4 仿真与分析

仿真中设置 7 个小区, 基站位于小区中心, 站间距为 500 m, 基站 30 m 内不放置用户, 传播模型使用 3GPP 36.942 中提供的模型: $L = 15.3 + 37.6 \lg d$ (dB), d 表示距离, 单位是 m。带宽是 20 Mbit/s, RB 个数为 100, 仿真在 MATLAB 中进行。

图 2 是算法 1 在不同负载下的功率降低情况, 可看出总发射功率是随着系统负载的降低而减小的, 负载越低, 能用于第二阶段分配的资源越多, 意味着有更多的宽度可以为用户换取能量的节省, 负载因子为 50% 时 ERG 也达到 55% 左右, 几乎只需要参考系统的一半的发射功率。虽然能量效率的提高是以频谱效率的降低为代价的, 但是在

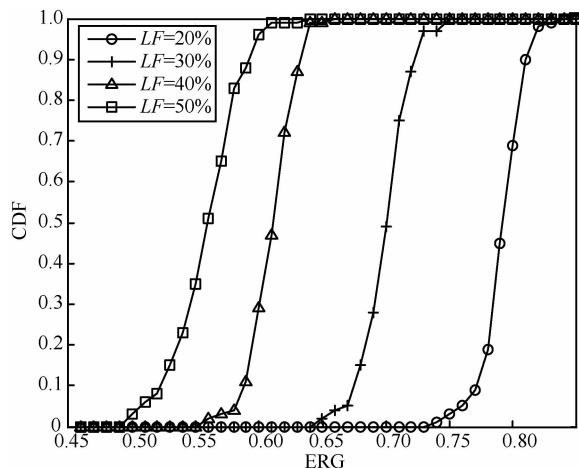


图 2 MRR 算法下不同负载的 ERG 仿真

系统不是满负载的情况下, 既不浪费珍贵的频谱资源, 又能降低基站的发射功率, 这对环境降低和运营商成本来说都是极为有利的。

图 3 是两种算法和 RR 算法间的 ERG 值比较结果。MRR 算法由于使用了用户瞬时发射功率调整用户优先级, 所以就降低系统发射功率而言, 该算法取得的效果较好, 在系统负载为 25% (用户数为 20 时) 时 ERG 值为 75%~80%, MEE 算法的 ERG 值略逊于 MRR; 较之于没有考虑信道条件、负载情况等影响总发射功率因素的 RR 算法而言, 两种算法在降低功率上的优势就很明显了。

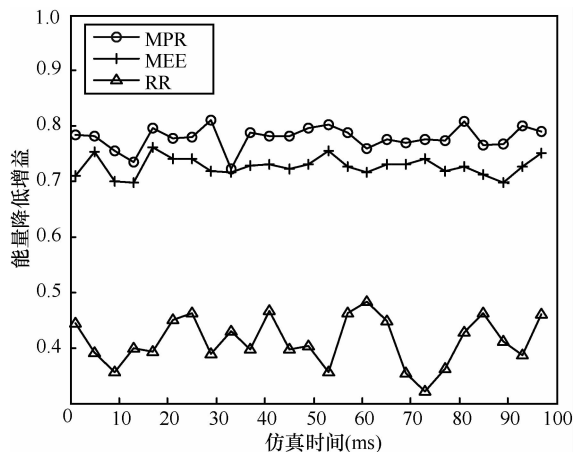


图 3 ERG 比较 (LF=25%)

用户吞吐量情况如图 4 所示, 由于在调度策略中使用了 Max C/I 算法, 两种算法在总吞吐量上胜于 RR 算法, MEE 算法实现的吞吐量略高于 MRR 算法。从图 4 可看出, MRR 和 MEE 算法的公平性很接近 RR 算法, 很好地保证了用户间的公平性。同样多的频谱资源, 由于调度策略的不同, RR 算法能实现的系统吞吐总量低于 Max C/I 算

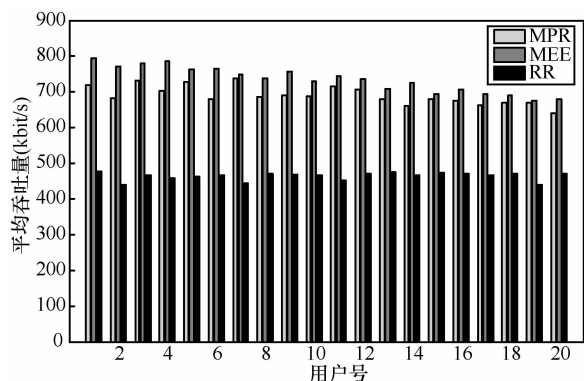


图4 用户吞吐量仿真

法,按照本文对负载的定义,对于前两种算法负载为75%左右,RR算法则基本达到满负载情况,基站需要按最大功率发射,已几乎不能实现能量的节省,如图5所示。这两种算法不仅能节省发射功率,而且能实现较高的系统吞吐量和用户间公平性,所以系统综合性能较好。

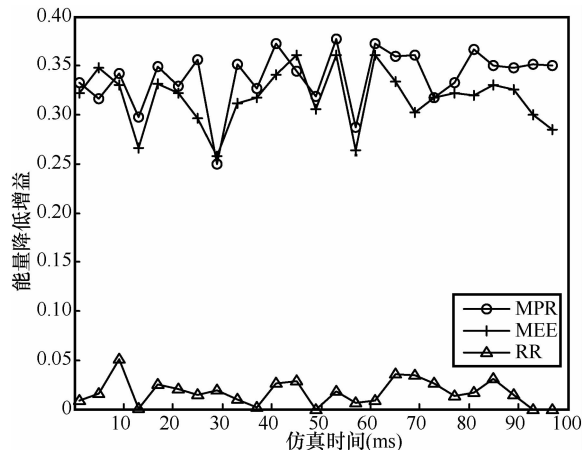


图5 ERG比较(LF=75%)

5 结束语

本文研究了LTE下行传输的资源调度策略,在非满负载情况下,对于特定的数据速率要求,通过降低频谱效率换取能量效率的提高,降低了基站的发射功率。调度策略将调度过程分为两个阶段,分别实现速率满足和能量降低的目标,考虑了信道质量和系统负载对能量降低的影响,同时兼顾到系统吞吐量和用户间公平性,对阶段二的2种算法进行了仿真验证和比较分析。随着4G LTE商用道路的不断拓宽,势必会带来基站数目的大量增长。在有限的频谱资源下,如何能在保证一定服务质量的前提下降低发射功率是对资源管理策略的挑战,该研究对环境或经济来说都是大有裨益。在非满负载情况下,资源分配使用高能量效率调度模式,能在满足一定

服务质量要求的同时,降低基站发射功率,有助于推动绿色通信的发展。

参考文献

- 1 Future Mobile and Wireless Radio Systems: Challenges in European Research. The FP 7 Consultation Meeting, Brussels, 2008
- 2 Wang R, Thompson J, Haas H. A novel time-domain sleep mode design for energy-efficient LTE. Proceedings of the 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing(ISCSP), Limassol, Cyprus, 2010:1~4
- 3 Dario S, Marco C, Roberto F. Energy efficiency evaluation of state of the art packet scheduling algorithms for LTE. Proceedings of European Wireless Conference, Vienna, Austria, 2011:1~4
- 4 Han C, Beh K C, Nicolaou M, et al. Power efficient dynamic resource scheduling algorithms for LTE. Proceedings of IEEE VTC 2010 Fall, Québec City, Canada, 2010: 1~5
- 5 Zhang S Q, Chen Y, Xu S G. Improving energy efficiency through bandwidth, power, and adaptive modulation. Proceedings of IEEE VTC 2010 Fall, Québec City, Canada, 2010: 1~5
- 6 Han C Z, Simon A. Adaptive power and resource allocation strategies for green radio. Proceedings of IEEE Communications Society Subject Matter Experts for Publication in the IEEE Globecom 2011, 2011:1~5
- 7 Videv S, Haas H. Energy-efficient scheduling and bandwidth-energy efficiency trade-off with low load. Proceedings of IEEE Communications Society Subject Matter Experts for Publication in the IEEE ICC 2011, Kyoto, Japan, 2011:1~5
- 8 Turyagyenda C, O'Farrell T, Guo W. Long term evolution downlink packet scheduling using a novel proportional-fair-energy policy. Proceedings of IEEE VTC 2012, Québec City, Canada, 2012:1~6
- 9 Stefania S, Issam T, Matthew B. LTE-The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice. New York: John Wiley & Sons Inc Press, 2012

[作者简介]



文凯,男,博士,重庆邮电大学副教授,主要研究方向为移动通信及认知网络。

苗亚丽,女,重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为LTE MAC层资源调度算法。

(收稿日期:2013-08-23)