



文章编号:1001-9081(2019)01-0033-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018071624

LTE 系统多小区上行联合功控算法

张柔佳, 占庆祥, 朱宇航, 谭国平^{*}

(河海大学 通信与信息系统研究所, 南京 211100)

(* 通信作者电子邮箱 gptan@hhu.edu.cn)

摘要:针对传统的小区内开环功率控制算法通常以提升本小区的吞吐量性能为目标,忽略了当前小区用户对邻小区用户同频干扰的问题,为提升边缘用户性能的同时兼顾系统整体性能,提出了一种 LTE 系统小区间上行联合功率控制(UJPC)算法。该算法采用单基站三扇区为系统模型,以最优化系统吞吐量比例公平函数为目标,首先根据最小信干噪比(SINR)约束值和用户最大发射功率这两个约束条件得到相应的数学优化模型,然后采用连续凸近似的方法求解优化问题得出各个基站所管辖的小区内所有用户的最优发射功率。仿真结果表明,与基准的开环功控方案相比,联合功控方案在保证系统平均频谱利用率的情况下能够较大幅度地提高小区边缘频谱利用率,其最佳性能增益能达到 50%。

关键词:长期演进;上行链路;小区间干扰;联合功率控制;最小信干噪比;连续凸近似

中图分类号: TN929.53; TP393 **文献标志码:**A

Multi-cell uplink joint power control algorithm for LTE system

ZHANG Roujia, ZHAN Qingxiang, ZHU Yuhang, TAN Guoping^{*}

(Communication and Information Systems Institute, Hohai University, Nanjing Jiangsu 211100, China)

Abstract: Focusing on the issue that traditional open-loop power control algorithm normally aims to increase the throughput and ignores the interference to other cells, to achieve a tradeoff between edge users and whole system performance, an Uplink Joint Power Control algorithm of LTE system (UJPC), was proposed. In the algorithm, single base station and three sectors were adopted as system model, which aimed to maximize proportional fair index of system throughput. Firstly, the corresponding mathematical optimization model was obtained according to two constraints of the minimum Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR) and the maximum transmit power of users. Then continuous convex approximation method was used to solve optimization problem to get optimal transmission power of all users in each cell. The simulation results show that, compared with open-loop scheme, UJPC can greatly improve spectrum utilization of cell edge while ensuring average spectrum utilization of system and its best performance gain can reach 50%.

Key words: Long Term Evolution (LTE); uplink; inter-cell interference; joint power control; minimum Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR); continuous convex approximation

0 引言

在长期演进(Long Term Evolution, LTE)系统中,上行链路采用单载波频分多址(Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA)技术^[1],利用子载波的正交性质,有效消除了小区内用户之间干扰,但是,由于LTE要求高传输速率,在实际布网中使用的是同频组网方式,频率复用因子为1,即相邻小区使用相同的通信频段。多小区同频组网的情况下小区间干扰情况比较严重^[2],小区边缘用户性能较差,严重制约了系统性能的进一步提升。为了有效抑制小区间干扰,LTE系统在多小区场景下进行功率控制时,需要考虑相邻小区之间的干扰。对于相邻小区间的干扰,通过合理功率调控,能够降低干扰,提升边缘用户的用户体验,同时提升

整体性能状况,因此,研究多小区联合功率控制问题对于提升通信系统容量和性能具有重大意义。

自2004年启动LTE计划开始,世界范围内移动通信领域各大科研机构和各知名大学均在LTE上行链路功率控制算法以及资源调度方面进行了大量的研究,也取得了大量的研究成果。文献[3-4]中针对上行功率控制的研究,主要采用部分功率控制的方法,其主要的思想是根据用户不同的路径损耗,设置相对应的路损补偿因子,使得不同路径损耗的用户目标信干噪比(Signal-to-Interference plus Noise Ratio, SINR)不同。文献[5]中提出了LTE网络中上行链路部分功率控制全网优化,从网络优化的角度研究上行链路功率控制优化问题;文献[6]中提出了基于多小区的上行功率控制,根据干扰功率和热噪声比值(Interference over Thermal, IoT)进行用户

收稿日期:2018-07-19;修回日期:2018-08-10;录用日期:2018-08-14。 基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2015B18914);中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室开放课题项目(2016001)。

作者简介:张柔佳(1995—),女,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向:LTE 系统功率控制; 占庆祥(1992—),男,安徽天长人,硕士研究生,主要研究方向:信号与信息处理; 朱宇航(1998—),男,安徽安庆人,主要研究方向:移动边缘计算; 谭国平(1975—),男,湖南澧县人,教授,博士,CCF 会员,主要研究方向:移动自组网、无线多媒体通信、随机网络优化与控制、网络信息论。



分类,分别进行功率控制。近年来,不少研究将凸优化理论用于通信系统功率控制算法中,建立加权的系统容量最大化(Weighted Sum-rate Maximization, WSM)问题^[7]来求解功率分配方案,取得了非常好的效果。不考虑小区间干扰问题时,小区内 WSM 问题是个凸问题,通过次梯度迭代算法^[7]可以求解问题的最优解,进而得出功控方案。对于多小区 WSM 建模的时候,需要考虑不同小区之间的用户干扰问题,通过香农公式建立的目标函数是一个非凸函数,即此问题不是一个凸问题。非凸函数求解最优解是极其复杂的,且并不能保证存在最优解。MAPEL (MLFP (Multiplicative Linear Fractional Programming)-based Power Allocation) 算法^[8] 和 Branch & Bound 算法^[9]理论上可以求解 WSM 问题的最优解,但是求解算法的复杂度极高,在实际应用中具有一定的不可操作性。在不少文献中,通过采用连续凸近似优化算法^[10] 来求解 WSM 问题的次优解来解决问题。连续凸近似算法是一种求解 WSM 问题次优解的有效方法,该算法通过迭代求解一系列 WSM 问题的近似凸问题获得 WSM 问题的局部最优解。另外,文献[11]和文献[12]将 WSM 问题近似成几何规划(Geometric Programming, GP)问题,分别使用集中式和分布式的方式求解 GP 问题得到 WSM 的局部最优解。

上述对 LTE 上行功控的研究均取得了不错的效果,本文将在上述研究的基础上提出一些改进的算法,考虑多小区间的干扰,兼顾边缘用户频谱利用率和系统平均频谱利用率性能。

1 LTE 系统上行功率控制

在 LTE 系统中,无线资源管理的研究内容包括功率控制、信道分配、调度、切换、接入控制、负载控制和端到端服务质量(Quality of Service, QoS)保障等部分^[13]。上行链路功率控制对移动通信系统有极其重要的作用,主要是在两个方面获得平衡:一方面是为用户设备(User Equipment, UE)提供满足 QoS 所需的发送能量,另一方面是最小化每个用户对系统其他用户的干扰以及最大化用户电池寿命。LTE 系统在上行链路采用 SC-FDMA 技术,同一个小区内不同用户在上行链路中使用正交的频谱资源,不同用户的上行信号之间是正交的,所以,就不需要像以码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)技术为核心的第三代移动通信系统那样因为远近效应而进行频繁的功率控制。LTE 系统上行链路的功率控制的主要目的用于补偿用户信道路径损耗和阴影衰落,同时对小区间使用相同频谱资源的用户之间的相互干扰进行抑制。出于这些原因,LTE 系统上行功控只需采用慢功率控制方式即可,LTE 上行功控的频率一般不超过 200 Hz。用户的发射功率可以根据 eNode B 发送的功率调整指令调整,也可以根据下行参考信号(Reference Signal, RS)测量的路径损耗值等进行估算。

LTE 上行功率控制包括物理上行共享信道(Physical Uplink Shared Channel, PUSCH)、物理上行控制信道(Physical Uplink Control Channel, PUCCH)和探测参考信号(Sounding

Reference Signal, SRS)进行功率控制,本文只对 PUSCH 信道上行功率控制进行研究分析。

1.1 小区内功率控制

在 LTE 中为 PUSCH、PUCCH 和 SRS 明确了详细的功率控制公式。三种上行信道的功率控制方程都不一样,但基本上功率控制的原理是一致的:虽然它们看似复杂,但在所有情况下,它们都可以分成两个基本部分的和:从 eNode B 信令化的静态或半静态参数得到的一个基本开环工作点和每个子帧更新的一个动态偏移量,即每个资源块功率 = 基本开环工作点 + 动态偏移量。

3GPP LTE 定义了 PUSCH 信道的发射功率控制方程为:

$$P_{\text{PUSCH}} = \min\{P_{\max}, 10 \lg M + P_0 + \alpha \cdot PL + \Delta_{\text{MCS}} + f(\Delta_{\text{TPC}})\} \quad (1)$$

其中: P_{PUSCH} 是 UE 的发射功率, P_{\max} 为 UE 的最大功率; M 是用户占用的上行资源块(Resource Block, RB)的数量,10 lg M 是用户功率中偏移带宽因素; Δ_{MCS} 和 $f(\Delta_{\text{TPC}})$ 共同组成动态偏移量部分,用于对用户发射功率进行闭环功率控制,下标 MCS(Modulation and Coding Scheme) 表示调制和编码方案,TPC(Transmitter Power Control) 表示发射功率控制。

1.2 小区间功率控制

单小区的功率控制主要为了补偿路径损耗,当一个边缘 UE 的上行信道质量变差时,单纯地提高该 UE 的发射功率将会增加其对邻小区的干扰。若各个小区都一味地提高小区边缘用户的发射功率,整个系统吞吐量将会由于系统小区之间的干扰的增加而下降,不利于提升多小区系统的频谱利用率,因此,以最大化整个系统吞吐量为目标,应该采用“部分功率控制”的方式,合理控制小区边缘 UE 发射功率。这种方式就是基于小区间干扰协调的小区间功率控制^[14]。

“部分功率控制”方式的主要思想是:若某个小区的 UE 和相邻小区的 UE 使用不同的时频资源块,可以采用全功率发射以提高资源利用率;若某个小区的 UE 和相邻小区的 UE 使用重叠的时频资源块,则必需限制该 UE 的发射功率以缓解小区间干扰。在单小区的功率控制中,只需要根据各 UE 的 QoS 调整发射功率,直到 UE 的 SINR 达到预先设定的期望值,但从抑制小区间干扰和优化系统边缘用户性能的角度看,这种策略并不一定合适。当某个 UE 使用与邻小区用户相同的频带资源时,如果随意提高该用户在占用频带的发射功率,该用户的性能可能得到提升,但邻小区用户的性能却遭受损失,导致整体系统性能下降,所以,对于可能造成小区间严重干扰的敏感频带,应当降低用户 SINR 的期望值,进行适度的功率控制,缓和小区间干扰。

LTE 系统上行链路小区间功率控制是通过干扰过载指示(Overload Indication, OI)生成和 eNode B 之间 X2 接口的信息交互完成的。3GPP 标准文件 TS36.423 中定义了 OI, OI 将小区内所有 RB 受到的干扰水平分为高、中、低三个等级,这个等级根据各个 RB 的 IoT 以及设定的两个过载干扰门限值(TH_1 和 TH_2 , $TH_1 < TH_2$) 判别的。第 k 个 RB 的干扰过载指示定义如式(2):



$$OI(k) = \begin{cases} \text{高}, & IoT(k) > TH_2 \\ \text{中}, & TH_1 \leq IoT(k) \leq TH_2 \\ \text{低}, & IoT(k) < TH_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $IoT(k)$ 的定义如式(3) :

$$IoT(k) = I(k)/N_0 \quad (3)$$

这里 $I(k)$ 指的是第 k 个 RB 上的干扰功率, N_0 指的是频谱带宽内所有 RB 的平均热噪声。

当 eNode B 监测到某个 RB 的 OI 等级为高时, 通过 eNode B 之间的 X2 接口交互 OI 信息, 若某个小区接收到邻小区发送过来的等级为高的 OI 时, 在小区内对在相应 RB 上服务的 UE 进行闭环功率控制, 降低 UE 的发射功率, 减小对邻小区的干扰; 仅当该小区收到 OI 等级为低的 RB 上服务的 UE 才可以按照期望的 SINR 提升功率。3GPP 协议规定了 OI 更新的最小周期为 20 ms。

2 多小区上行联合功控算法

2.1 基本系统模型

本文研究 LTE 上行功率控制考虑的基本系统模型采用单基站三扇区系统模型, 如图 1 所示, 基站采用扇区化天线, 用户终端采用全向天线, 每个基站管理 3 个小区, 基站位于 3 个小区的交界处。系统模型图中箭头处是基站位置, 方向代表基站的三个扇区化天线, 圆点代表小区内分布的用户, 用户在小区内服从均匀分布。

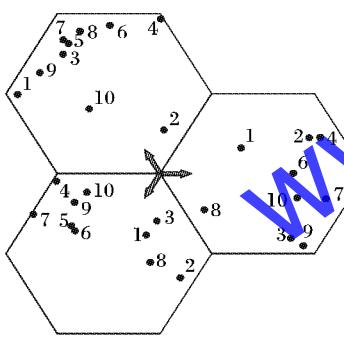


图 1 单基站三小区系统模型

Fig. 1 System model of single base station and three cells

2.2 联合功控算法

传统功率控制算法, 通常基于路径损耗和用户信干噪比, 通过部分路径损耗补偿来进行功率控制, 这些算法缺乏对小区间使用相同频率资源的用户之间相互干扰的考虑。本文通过考虑对小区间干扰的抑制, 提升边缘用户性能, 并兼顾系统整体性能的最大化。基于此, 提出了小区间上行联合功率控制(Uplink Joint Power Control, UJPC)算法。

本文研究中系统模型采用单基站三扇区的基本模型, 假设每个小区的用户数相同, 小区内用户服从均匀分布。在每个基站可以精确知道来自相邻小区的干扰大小, 同时也可以明确知道本基站调度用户对邻小区以及用户信干噪比的影响。基于此本文提出的 UJPC 算法思想如下: 以最优化系统吞吐量比例公平函数为目标, 设立约束条件求解优化问题得出各个基站所管辖的小区内所有用户的最优发射功率, 其数

学模型如式(4)所示。这里约束条件有两个: 最小信干噪比约束值 γ_{\min} 和用户最大发射功率 P_{\max} 。

$$\begin{aligned} \max(\Gamma(W_{i,j}, P_{i,j})) = \max\left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \lg(W_{i,j} \ln [(1 + \right. \right. \\ \left. \left. SINR_{i,j})])\right) \\ \text{s. t. } SINR_{i,j} \geq \gamma_{\min}; i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \\ P_{i,j} = PSD_{i,j} * W_{i,j} \leq P_{\max}; \\ i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \end{aligned} \quad (4)$$

其中, M 是小区的数目, N_i 是小区 i 的用户数, $PSD_{i,j}$ 表示小区 i 内的用户 j 发射功率谱密度, $W_{i,j}$ 表示小区 i 内的用户 j 的带宽, γ_{\min} 和 P_{\max} 分别表示最小 SINR 约束值和 UE 最大发射功率。

在 LTE 多小区系统中, 小区 i 下的用户 j 的 SINR 可以表示为:

$$SINR_{i,j} = P_{i,j}^R / (I_{i,j} + N_0) \quad (5)$$

其中, N_0 表示噪声功率, $P_{i,j}^R$ 表示基站接收的小区 i 中用户 j 的信号功率, 计算方式如下:

$$P_{i,j}^R = P_{i,j} G_{i,j}^i \quad (6)$$

其中: $P_{i,j}$ 表示小区 i 中用户 j 的发射功率, $G_{i,j}^i$ 表示小区 i 的用户 j 到所属基站的大尺度信道增益。

$I_{i,j}$ 表示小区 i 中用户 j 所受到的信号干扰, 计算方式如下:

$$I_{i,j} = \sum_{(i',j') \in I(i,j)} P_{i',j'} G_{i',j'}^i \quad (7)$$

其中: $I(i,j)$ 表示小区 i 的用户 j 的相互干扰的用户集合, $P_{i',j'}$ 表示干扰用户的发射功率, $G_{i',j'}^i$ 表示干扰用户到小区 i 的用户 j 的大尺度信道增益。结合上述计算, 得到小区 i 的用户 j 的信干噪比如下:

$$\begin{aligned} SINR_{i,j} = (P_{i,j} G_{i,j}^i) / \left(N_0 + \sum_{(i',j') \in I(i,j)} P_{i',j'} G_{i',j'}^i \right); \\ i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \end{aligned} \quad (8)$$

在理想情况下, 干扰集合 $I(i,j)$ 的用户是可以获知的。

原则上相互干扰用户集合 $I(i,j)$ 每个元素是小区外所有使用与该用户相同频段的用户。由于调度的频率远大于功率控制的频率, 在计算用户 SINR 的干扰部分, 将所有干扰用户的干扰功率根据小区用户数量进行平均化处理, 即某个小区对用户 (i,j) 的干扰认为是该小区所有用户对用户 (i,j) 的干扰的均值, 此时相互干扰用户集合 $I(i,j)$ 是由与用户 (i,j) 不在同一小区的所有用户组成。作平均化处理后用户 (i,j) 的干扰计算如下:

$$I_{i,j}^{\text{average}} = \sum_{i'=1}^M \frac{1}{N_{i'}} \sum_{j'=1}^{N_{i'}} P_{i',j'} G_{i',j'}^i \quad (9)$$

其中, $G_{i',j'}^i$ 表示用户 (i',j') 到小区 i 的信道增益, 如果 $i' = i$, 即小区 i' 与小区 i 为同一小区, 设置该值为 0。

对系统内所有用户进行统一编号, 确定目标函数为系统吞吐量比例公平函数, 其简化的数学模型变如式(10)所示:

$$P^* = \arg \max_P \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \lg(\ln(1 + SINR_{i,j}))$$



$$\begin{aligned} \text{s. t. } & SINR_{i,j} = (P_{i,j}G_{i,j}) / \left(\sigma^2 + \sum_{i'=1}^M \frac{1}{N_{i'}} \sum_{j'=1}^{N_{i'}} P_{i',j'} G_{i',j'}^i \right); \\ & i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \\ & SINR_{i,j} \geq \gamma_{\min}; i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \\ & 0 \leq P_{i,j} \leq P_{\max}; i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \quad (10) \end{aligned}$$

其中: M 为小区数, N_i 为对应小区 i 的用户数, σ^2 表示噪声功率, 用户发送功率谱密度为 $P = \{P_{i,j}\}, i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i, G_{i',j}'$ 表示用户 (i', j') 到小区 i 的信道增益, 如果 $i' = i$, 即小区 i' 与小区 i 为同一小区, 设置该值为 0。 γ_{\min} 为最小信干噪比约束, 这里为系统中所有用户设置相同的最小信干噪比约束值。为方便计算, 在固定带宽分配情况下, 设置用户频谱带宽为 1。

数学模型(10)的目标函数是一个非凸函数, 这里可以通过一系列操作, 用一个凸函数来近似逼近目标函数: 第一步进行变量的指数变换; 第二步采用连续凸近似的思想来进行目标函数近似替换。经过两步的变换后, 通过使用求解近似后的凸函数的最优值来逼近原目标函数的最优值。

对模型(10)目标函数首先将变量进行指数变换 $P_{i,j} = e^{x_{i,j}}$, 将变量变换为 x , 再利用不等式(11)右边进行凸函数近似, 根据参考文献[10]的证明, 经过变量替换后不等式(11)右边求和式子的每个部分都是凸函数, 而对凸函数求和之后并不影响凸函数的性质, 因此右边的求和式子仍是一个凸函数。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \lg (\lg (1 + SINR_{i,j}^{t+1})) \geq \\ & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \lg [\alpha_{i,j} \lg (SINR_{i,j}^{t+1}) + \beta_{i,j}] \quad (11) \end{aligned}$$

其中

$$\alpha_{i,j} = (SINR_{i,j}^t) / (1 + SINR_{i,j}^t) \quad (12)$$

$$\beta_{i,j} = \lg (1 + SINR_{i,j}^t) - \alpha_{i,j} \lg (SINR_{i,j}^t) \quad (13)$$

其中 $SINR_{i,j}^t$ 代表迭代 t 次的信干噪比。

于是, 通过取不等式(11)右边的式子作为目标函数建立式(14)所示的凸优化问题来近似原优化问题:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \lg [\alpha_{i,j} \lg (SINR_{i,j}^{t+1}) + \beta_{i,j}] \\ \text{s. t. } & SINR_{i,j}^{t+1} = (e^{x_{i,j}} G_{i,j}) / \left(\sigma^2 + \sum_{i'=1}^M \frac{1}{N_{i'}} \sum_{j'=1}^{N_{i'}} P_{i',j'} G_{i',j'}^i \right); \\ & i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \\ & SINR_{i,j}^{t+1} \geq \gamma_{\min}; i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \\ & x_{i,j} \leq x_{\max}; i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i \quad (14) \end{aligned}$$

通过 2.2 节中对 UJPC 算法的详细叙述, 采取迭代凸优化方法求解优化问题得出所有用户的最优发射功率。求解优化问题(14)的流程如图 2 所示。

3 系统仿真平台实现

3.1 系统搭建

为了验证本文提出的 UJPC 算法的性能, 进行系统级仿真, 通过 Matlab 搭建 LTE 系统上行链路仿真平台, 上行链路

仿真平台包含的主要功能模块有系统架构配置模块、小区状态更新模块、调度器模块、功率控制模块、干扰计算模块、接收机模块。

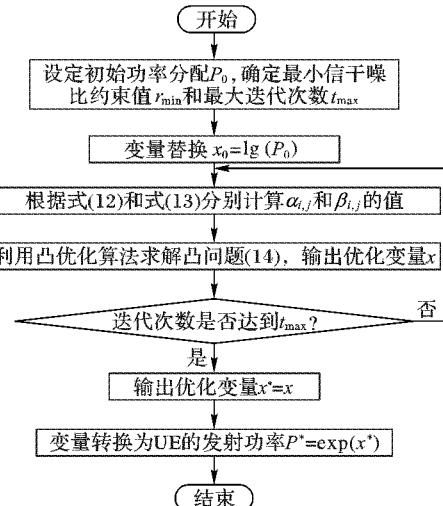


图 2 凸函数近似优化求解算法流程

Fig. 2 Flow chart of convex function approximation optimization algorithm

3.2 仿真参数

为验证 UJPC 算法性能, 进行了 LTE 上行链路系统级的仿真, 具体的参数设置见表 1 所示, 表 1 中包括部分参数的定义和具体参数数值的设置。系统带宽设置为 5 MHz, 带宽分配模式采用固定带宽分配方式, 一个用户占用 4 个资源块。

表 1 系统仿真主要参数

Tab. 1 Main parameters of system simulation

参数	值	参数	值
基站数	7	调度方法	RR 调度
每个基站管理小区数	3	用户最大发射功率	24 dBm(250 mW)
每个扇区 UE 的个数	10	信道传输模型	3GPP Typical Urban ^[15]
带宽分配模式	固定带宽分配(4 RB/UE)	小区间功率控制周期	10 ms
仿真时间	10 s	系统带宽	5 MHz
天线类型	扇区天线	噪声密度	-195 dBm/Hz
最小信干噪比	0 ~ 1.2	预热时间	1 s

4 仿真结果分析

4.1 基准开环方案

本论文采用小区内开环功率控制方案作为基准方案, 采取部分或全部补偿路径损耗, 如式(15):

$$P = \min \{P_{\max}, P_0 + 10 \lg M + \alpha \cdot PL\} \quad (15)$$

其中: M 是资源块数, PL 是路径损耗, P_0 是初始功率, α 是路损补偿因子。这里 P_0 和 α 都是小区级别的特定参数。 α 为 1 的时候则是对路损进行完全补偿, 在 $(0, 1)$ 区间则是对路损进行部分补偿。

4.2 仿真结果评估参数

评估参数包括系统平均频谱利用率、小区边界频谱利用



率、小区平均 IoT 和基站平均 IoT。

1) 系统平均频谱利用率(bps/Hz)。该参数定义了中心基站(即1号基站)的所有用户的平均频谱利用率。频谱利用率=用户吞吐率/系统有效带宽。

2) 小区边界频谱利用率(bps/Hz)。该参数定义了中心基站(即1号基站)的位于小区边界的用户平均频谱利用率。小区边界用户定义:平均吞吐率是所有用户中最低的5%的那部分用户。

3) 小区平均 IoT(dB)。该参数定义了系统内各个小区的平均 IoT。

4) 基站平均 IoT(dB)。该参数定义了系统内各个基站的平均 IoT。

4.3 仿真结果和相关分析

在小区间用户数均匀情况下使用轮询(Round Robin, RR)算法调度方式^[16]实现了基准方案即小区内开环功率控制方案以及UJPC方案。

在RR调度下,基准方案和UJPC方案的小区系统平均频谱利用率和小区边界频谱利用率输出结果对比分布如图3所示,基准方案和UJPC方案下中心基站三小区的平均IoT情况如图4所示。

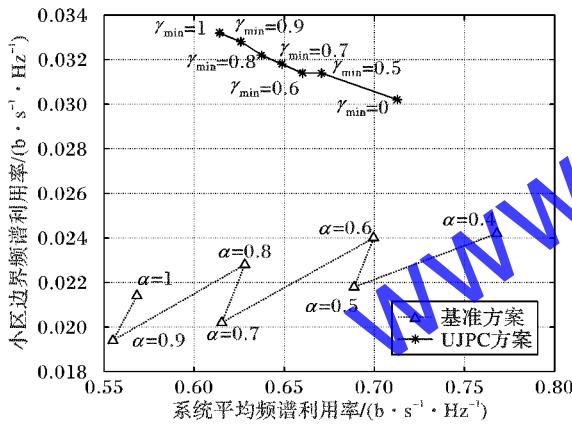


图3 RR调度下UJPC方案与基准方案指标分布

Fig. 3 Indicator distribution of UJPC scheme and baseline scheme under RR scheduling

基于联合功控方案和基准方案的系统平均频谱利用率、小区边界频谱利用率的分布图,按照以下规则可以评估目标方案相对于基准方案的增益。

1) 求已知联合功控方案某一组配置对应的点到基准方案线段的最短距离作为每组配置到基准的增益。根据已知联合功控方案对应的点的坐标,利用两点间的距离公式,求出该点到基准方案线段上的最短距离,将该最短距离作为该组配置相对于基准线段的增益。

2) 联合功控方案相对于基准方案的增益,求增益大小的公式。

已知输入点的坐标为(x_0, y_0),根据求得的最短距离而求出基准线段上的点的坐标为(x, y),记Gain为性能增益,则Gain为:

$$Gain = \pm \sqrt{\left(\frac{x_0 - x}{x}\right)^2 + \left(\frac{y_0 - y}{y}\right)^2} \quad (16)$$

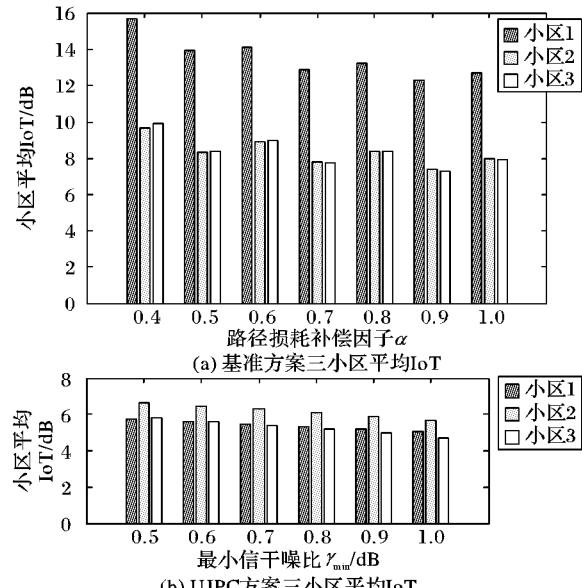


图4 不同功控方案下中心基站三小区平均 IoT 对比

Fig. 4 Three-cell average IoT comparison of central base station under different power control schemes

当输入点在基准方案线段的外部时,Gain为正;输入点在基准方案线段的内部时,Gain为负。在RR调度下,UJPC算法方案相对于基准方案的性能增益如表2。

表2 RR调度下UJPC方案相对于基准方案性能增益

Table 2 Performance improvement of UJPC scheme compared with baseline scheme under RR scheduling

γ_{\min} /dB	相对基准方案的增益/%	γ_{\min} /dB	相对基准方案的增益/%
1.0	49.76	0.6	41.20
0.9	44.42	0.5	38.29
0.8	51.78	0	34.05
0.7	46.35		

通过观察上述系统平均频谱利用率和小区边界频谱利用率指标分布图以及小区IoT分布图的总体趋势,可以发现:UJPC方案的频谱利用率分布在基准开环方案的上方,在保证系统平均频谱利用率的情况下,UJPC方案能够较大幅度地提高边缘频谱利用率,但是,对于最小信噪比的设定要适当,增大最小信噪比约束值能够提升边缘频谱利用率,同时也导致了一定程度的系统平均频谱利用率的下降。随着最小信噪比约束值的增加,系统平均IoT呈下降趋势,即为了满足边缘用户对于最小信噪比的需求,必须控制小区受到的平均干扰处于一个较低的水平,在提升边缘用户发射功率的同时也要降低小区中心用户的发射功率,因此牺牲了非边缘用户的性能,而这部分用户正好是对系统平均频谱利用率贡献比较大的,所以系统平均频谱利用率会降低。为了兼顾边缘用户和系统的性能,最小信噪比约束值不宜设置过高。另外,观察性能增益表可以看出,在RR调度下,基于大尺度信息UJPC方案相对于基准方案的增益能达到40%~50%。综上所述,本文提出的算法相比基准开环方案有较大的性能增益。



5 结语

本文提出一种LTE系统上行链路功率控制算法,该算法以最优化系统吞吐量比例公平函数为目标,设立约束条件(最小信干噪比约束和最大发射功率约束)求解优化问题得出各个基站所管辖的小区内所有用户的最优发射功率。后通过搭建LTE系统级Matlab仿真平台,分析结果表明,提出的算法相比开环功控方案有较大的性能增益,在系统平均频谱利用率和小区边缘频谱利用率方面均有较大提升。

参考文献 (References)

- [1] 陈飞. LTE 上行链路 SC-FDMA 仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 27 – 36. (CHEN F. Research on SC-FDMA simulation of LTE uplink [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 27 – 36.)
- [2] KWAN R, LEUNG C. A survey of scheduling and interference mitigation in LTE [J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2010, 2010: Article No. 1.
- [3] MUHAMMAD B, MOHAMMED A. Performance evaluation of uplink closed loop power control for LTE system [C]// Proceedings of the 2009 Vehicular Technology Conference Fall. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 1 – 5.
- [4] RAO A M. Reverse link power control for managing inter-cell interference in orthogonal multiple access systems [C]// Proceedings of the 2007 Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1837 – 1841.
- [5] LUO Z Z, GILIMYANOY R, ZHUANG H C, et al. Network-wide optimization of uplink fractional power control in LTE networks [C]// Proceedings of the 2015 Vehicular Technology Conference Fall. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1 – 5.
- [6] 张菲. LTE 上行功率控制技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 1 – 60. (ZHANG F. Research on LTE uplink power control technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 1 – 60.)
- [7] LEE H W, CHONG S. Downlink resource allocation in multi-carrier systems: frequency-selective vs. equal power allocation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7 (10): 3738 – 3747.
- [8] LI P Q, YING J Z, HUANG J. MAPEL: achieving global optimality for a non-convex wireless power control problem [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8 (3): 1553 – 1563.
- [9] MARTIN B, CORREIA M, CRUZ J. A certified branch & bound approach for reliability-based optimization problems [J]. Journal of Global Optimization, 2017, 69 (2): 461 – 484.
- [10] VENTURINO L, PRASADN, WANG X. A successive convex approximation algorithm for weighted sum-rate maximization in downlink OFDMA networks [C]// Proceedings of the 2008 Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 379 – 384.
- [11] CHIANG M, TAN C W, PALOMAR D P, et al. Power control by geometric programming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6 (7): 2640 – 2651.
- [12] WEERADDANA P C, CODREANU M, JOSHI S, et al. Multicell downlink weighted sum-rate maximization: A distributed approach [C]// Proceedings of the 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1368 – 1375.
- [13] 赵新胜, 尤肖虎. 未来移动通信系统中的无线资源管理 [J]. 中兴通讯技术, 2002, 8 (6): 7 – 10. (ZHAO X S, YOU X H. Wireless resource management in future mobile communication system [J]. ZTE Communication Technology, 2002, 8 (6): 7 – 10.)
- [14] 李运会. LTE 上行功率控制的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 27 – 31. (LI Y H. Research on the uplink power control of LTE [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 27 – 31.)
- [15] Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced [FB/3L]. [2018-03-15]. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf.
- [16] 秦玉娟, 周彬. MIMO 无线通信系统中调度算法分析 [J]. 信息技术, 2011 (6): 102 – 104. (QIN Y J, ZHOU B. Analysis of scheduling algorithm in MIMO wireless communication system [J]. Information Technology, 2011 (6): 102 – 104.)

This work is partially supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015B18914), the Wireless Sensor Network and Communication Key Laboratory Open Project Fund of Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences (2016001).

ZHANG Roujia, born in 1995, M. S. candidate. Her research interests include LTE system power control.

ZHAN Qingxiang, born in 1992, M. S. candidate. His research interests include signal and information processing.

ZHU Yuhang, born in 1998. His research interests include mobile edge computing.

TAN Guoping, born in 1975, Ph. D., professor. His research interests include mobile Ad Hoc network, wireless multimedia communication, random network optimization and control, network information theory.