

## 面向无线网络容量和覆盖优化的分组调度算法

丰雷\* 李文璟 邱雪松

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

**摘要:** 为了实现无线网络资源的高效利用, 该文基于增强边缘用户调度公平性的目标提出一种通过  $\beta$  参数来调节覆盖和容量目标的比例公平 ( $\beta$ -CCPF) 分组调度算法, 其可用于网络覆盖和容量优化 (CCO)。该文首先证明该算法的收敛性, 之后基于业务量分布、功率调整及该分组调度算法提出 CCO 机制, 并在长期演进 (LTE) 网络下的一个试验的规则场景和一个基于实际网络数据的非规则场景中进行了仿真, 验证了该机制能够在覆盖-容量优化机制下, 实现更合理的资源利用率 (RO), 并同  $\alpha$  比例公平 ( $\alpha$ -PF) 算法相比在理论场景和实际场景下平均用户吞吐量分别提升了 19% 和 33%。

**关键词:** 无线网络; 分组调度; 覆盖容量优化; 边缘用户; 平均吞吐量

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2131-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2014.00002

## A Packet Scheduling Algorithm for Wireless Service Capacity and Coverage Optimization

Feng Lei Li Wen-jing Qiu Xue-song

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In order to get the efficient resource utilization in wireless network, this paper introduces a novel  $\beta$ -Coverage and Capacity Proportional Fairness ( $\beta$ -CCPF) scheduling algorithm for network Coverage and Capacity Optimization (CCO) on the basis of enhancing the fairness of edger users schedule priority. It firstly proves the theoretical convergence of this algorithm and then proposes a coverage-capacity optimization scheme on the basis of this algorithm, traffic distribution and power adjustment. This scheme is simulated in an experimental regular scenario and a real non-regular scenario respectively. The results show that in the use case of CCO, the novel algorithm can ensure the reasonable Resource Occupation (RO) ratio and make the mean user throughput increased by 19% and 33% compared with the  $\alpha$ -Proportional Fairness ( $\alpha$ -PF) algorithm in the experimental and real scenario respectively.

**Key words:** Wireless networks; Packet scheduling; Coverage and Capacity Optimization (CCO); Edge user; Mean throughput

### 1 引言

随着新一代无线通信技术的发展, 用户对于无线网络的服务质量要求越来越高, 覆盖和容量是无线网络性能的两个重要考量指标, 网络的优化工作通常围绕这两者的平衡优化来进行。在 TR36.902<sup>[1]</sup> 中, 3GPP 提出了覆盖-容量优化 (Coverage and Capacity Optimization, CCO) 的准则, 即网络初期覆盖优化而网络成熟期容量优先的方式, 但其并未建议具体的解决方案。

文献[2,3]提出以调整天线电倾角的方式来进行容量和覆盖优化, 主要目的是提升容量的增益, 其认为长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 网络的硬切换替代通用移动通信系统 (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) 的软切换从而有效减少小区交叠的面积, 但忽略 LTE 本身在规划时就采用密集覆盖原则, 所以该方法容易造成小区的覆盖空洞问题, 且天线电倾角的调整空间在实际系统中受限。文献[4]提出了结合天线倾角与功率的联合调整 CCO 方式, 并进行全面的性能验证, 但其也忽略了边缘用户的吞吐量表现。文献[5,6]以宏观系统的学习角度出发, 对网络 CCO 的触发过程进行优化, 这类方法需要网管系统和天线系统的配

2014-01-03 收到, 2014-06-18 改回

国家自然科学基金创新研究群体项目(61121061), 国家自然科学基金(61271187)和国家 863 计划项目(2014AA01A701)资助课题

\*通信作者: 丰雷 fenglei@bupt.edu.cn

合, 另外不关注边缘用户吞吐量的牺牲也是这些文献存在的问题。文献[7]提出以  $\alpha$ -PF(Proportional Fairness)调度算法来实现 CCO, 但其直接以容量的增长来衡量覆盖增益所带来的结果并不准确, SOCRATES 验证了该方法所能实现的增益较低<sup>[8]</sup>。

本文基于以上这些研究, 通过对传统比例公平算法(Proportional Fairness, PF)<sup>[9]</sup>的改善, 提出一种通过  $\beta$  参数来调节覆盖和容量目标的比例公平 ( $\beta$ -Coverage and Capacity Proportional Fair,  $\beta$ -CCPF)分组调度算法, 以改进的分组调度方法配合发射功率调整机制来解决 CCO 问题。首先将用户的业务接收电平作为参数引入到用户调度优先级的评定权值之中, 因为该参数可以直接反映用户在小区中所处的实际位置, 之后采用  $\beta$  参数的线性加权方式, 将其与吞吐量在分组调度时进行综合考虑, 进而提出改进算法并验证其收敛性。之后根据网络的业务负载状况, 采用发射功率调整来控制覆盖范围, 并通过新的分组调度算法来保证小区边缘用户在分配资源时的优先性。仿真结果表明采用该方法可以在满足覆盖质量要求的情况下, 改善小区边缘用户的吞吐量表现, 从而解决网络的 CCO 问题。

## 2 $\beta$ -CCPF 分组调度算法

考虑一个拥有  $M$  个用户的小区, 并且假设小区的缓存是无限的(即不存在准入控制问题)<sup>[10]</sup>, 对于小区的下行分组调度而言, 分组调度器在一个很短的时间间隔内来选取一个用户进行资源分配。分组调度符号  $\{W_{t_{n+1}} = m, n \in N, m \in M\}$  表示在时刻  $t_n$  选取用户  $m$  进行传输。定义  $p_{m,t_n}$  和  $r_{m,t_n}$  分别为用户在时刻  $t_n$  的瞬时业务接收功率和瞬时吞吐量,  $\theta_{m,t_n}$  和  $\pi_{m,t_n}$  分别为用户在  $[t_0, t_n]$  时间间隔内的平均吞吐量(kbit/s)和平均业务接收功率(dBm)(调度滑动窗口控制), 其中  $t_0$  为参考开始时间, 根据实际无线网络的物理意义, 本文有  $\theta_{m,t_n} > 0$  和  $\pi_{m,t_n} < 0$ 。之后假设分组调度器拥有完全的信道知识, 从而保证在分组调度过程可以有效参考吞吐量及业务接收功率等信息。根据文献[9], 可以得到用户  $m$  的平均吞吐量递归计算公式

$$\theta_{m,t_{n+1}} = (1 - \varepsilon_n)\theta_{m,t_n} + \varepsilon_n \delta(W_{t_{n+1}}, m)r_{m,t_{n+1}} \quad (1)$$

其中  $\varepsilon_n$  根据服务质量(Quality of Service, QoS)需求用来控制吞吐量的滑动窗口, 通常其是一个较小的值, 这里取  $\varepsilon_n = (n+1)^{-1}$ 。  $\delta$  是克罗内克函数, 表示调度器是否在  $t_{n+1}$  时刻选择该用户。根据文献[9]可以得到在遵循吞吐量的比例公平调度算法下, 调度器对用户的优先级选择为  $m^* = \arg \max_{0 \leq m \leq M} r_{m,t_{n+1}} / \theta_{m,t_n}$ 。由于吞吐量比例公平及其它基于此的衍生算

法(如  $\alpha$ -fairness 算法)仅考虑吞吐量变化带来的影响, 而吞吐量除了受业务接收功率的影响外, 还同资源分配方式, 干扰分布及时间统计窗口等相关<sup>[11]</sup>, 这就造成吞吐量并不能准确反映用户在小区中所处的实际位置, 导致这些算法并不能有效提升小区边缘用户的吞吐量。针对此问题, 本文在保留吞吐量公平影响的基础上, 引入有关用户业务接收功率的因子来对分组调度算法进行改善, 这是因为作为衡量覆盖的因素, 业务接收功率在系统工作频率和传播环境一定的情况下, 主要决定于用户距离基站的距离即用户在小区中的实际位置。同时根据下行业务的功率分配可知当用户得到更多无线业务资源时, 业务接收功率会相应增加, 该因子的引入能尽量保证小区边缘用户可以在比例公平的基础上优先得到调度。首先本文让分组调度器每一次调度时监测平均业务接收电平, 则关于平均业务接收功率的递归计算公式为

$$\pi_{m,t_{n+1}} = (1 - \varepsilon)\pi_{m,t_n} + \varepsilon \delta(W_{m,t_{n+1}}, m)p_{m,t_{n+1}} \quad (2)$$

其中  $\varepsilon$  决定于用户业务信号的时间相关性, 通常认为用户位置不随时间变化, 即业务接收功率的变化只受分配资源多少的影响, 为了便于分析, 取  $\varepsilon = \varepsilon_n = 1/(n+1)$ 。本文期望将业务覆盖和容量在分组调度时进行综合考虑, 因此定义覆盖和容量的综合评定量为  $\zeta_{m,t_n}$ , 其表达式为

$$\zeta_{m,t_n}(\theta, \pi) = (1 - \beta)\theta_{m,t_n} - \beta\pi_{m,t_n} K_1 \geq 0 \quad (3)$$

其中  $0 \leq \beta \leq 1$ , 用于调节覆盖和容量的目标比例,  $K_1$  用来统一两者量纲, 如式(4)所示, 其通过假定公平资源分配下的信道容量获取, 对随机变量干扰  $\psi$  的统一采用均值方式以进一步增加边缘用户的公平性影响。

$$p_{m,t_n} K_1 = w_m(\Omega_{RR}, N_{RE}, M) \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{p_{m,t_n}}{E(\psi) + N_0} \right) \quad (4)$$

$w_{m,t_n}$  表示用户  $m$  在  $\Omega_{RR}$  公平分配策略机制下所获得的带宽资源, 获取该带宽的输入参数还包括系统内的总用户数量  $M$  和资源总量  $N_{RE}$ , 这些参数均与实际小区的情况相关。式(3)的实际网络意义表示当  $\beta$  较大时,  $\zeta$  倾向于平均业务接收电平较低的用户即处于小区边缘位置的用户; 当  $\beta$  较小时,  $\zeta$  倾向于平均吞吐量较高的小区用户。定义  $z_{m,t_n} = (1 - \beta)r_{m,t_n} - \beta p_{m,t_n} K_1$ , 则结合式(3), 在  $t_{n-1}$  到  $t_n$  时刻覆盖和容量的综合评定量变化量为  $\Delta\zeta_m$ 。

$$\Delta\zeta_m = \zeta_{m,t_n} - \zeta_{m,t_{n-1}} = \varepsilon_n (z_{m,t_n} \delta_{m^*(\zeta_{m,t_n})} - \zeta_{m,t_{n-1}}) \quad (5)$$

$\delta_{m^*(\zeta_{m,t_n})}$  指若用户被调度, 则该值为 1, 否则为 0。之后针对  $\zeta_{m,t_n}$  设定如式(6)所示的目标函数, 该目标函数的意义是通过分组资源调度来保证业务覆

盖和容量的综合目标要求。

$$\begin{aligned} U(\zeta(\theta, \pi)) &= \sum_{m=1}^M \lg(\zeta_{m,t_n}) \\ &= \sum_{m=1}^M \lg((1-\beta)\theta_{m,t_n} - \beta K_1 \pi_{m,t_n}) \end{aligned} \quad (6)$$

采用启发式调度容易得到以综合评定量  $\zeta_{m,t_n}$  做判别情况下该目标函数的最优解为

$$\begin{aligned} m^* &= \arg \max_{0 \leq m \leq M} \frac{(1-\beta)r_{m,t_{n+1}} - \beta K_1 p_{m,t_{n+1}}}{(1-\beta)\theta_{m,t_n} - \beta K_1 \pi_{m,t_n}} \\ &= \arg \max_{0 \leq m \leq M} \frac{z_{m,t_{n+1}}}{\zeta_{m,t_n}} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)是  $\beta$ -CCPF 分组调度算法的表达式,其兼顾覆盖和容量的目标,下面详细分析该算法的收敛性。

### 3 收敛性分析

为了方便下文的收敛性分析,本节首先给出以下一些定义:定义  $(x, y) \in (\mathbb{R}^+)^n \times (\mathbb{R}^+)^n$ ,  $x \leq y \Leftrightarrow x_i \leq y_i$ , 其中  $0 \leq i \leq n$ ; 定义函数  $g(x)$  在  $x \in (\mathbb{R}^+)^n$  是连续的,且  $g(x) = h(x) - x$ ; 对于常微分方程  $\dot{x} = g(x)$ ,  $g: (\mathbb{R}^+)^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  在时间  $t$  以  $x$  为初始点存在解  $\zeta(t|x)$ , 定义  $x$  的轨迹  $O(x) = \{\zeta(t|x) | t \geq 0\}$  及  $\zeta(t|x)$  极限的集合  $L(x)$ ; 满足  $O(x) = x$  的  $x$  称为平衡点,  $E$  表示所有平衡点的集; 满足  $L(x) \subset E$  的  $x$  称为拟收敛点,  $Q$  表示所有拟收敛点的集。

由于假设信道满足 Rayleigh 或者 Rice 性质,因此存在期望

$$E(z) = (1-\beta)E(r) - \beta E(p)K_1 \quad (8)$$

令  $g(\zeta) = E(z \cdot \delta_{m^*(\zeta_{m,t_n})}) - \zeta$ , 则根据上述定义有  $h(\zeta) = E(z)E(\delta_{m^*(\zeta_{m,t_n})})$

$$= E(z)E\left[\delta\left(\arg \max_{0 \leq m \leq M} \frac{(1-\beta)r_{m,t_{n+1}} - \beta K_1 p_{m,t_{n+1}}}{(1-\beta)\theta_{m,t_n} - \beta K_1 \pi_{m,t_n}}\right)\right] \quad (9)$$

首先需证明  $g(\zeta)$  即  $h(\zeta)$  的连续性。由于存在  $-\infty < E(p) < 0$  及  $0 < E(r) < +\infty$ , 因此  $h(\zeta)$  为正且有界。对于任意两个连续时刻  $t_N$  和  $t_{N+1}$ , 有

$$\|h(\zeta_{t_{N+1}}) - h(\zeta_{t_N})\| = \|E(z)(\delta_{m^*(\zeta_{m,t_{N+1}})} - \delta_{m^*(\zeta_{m,t_N})})\| \quad (10)$$

若假设  $\|\zeta\| < 1$ , 并对式(10)应用柯西-施瓦泽(Cauchy-Schwarz)不等式有

$$\begin{aligned} &\|h(\zeta_{t_{N+1}}) - h(\zeta_{t_N})\| \\ &\leq E(\|z\|^2)E\left(\|\delta_{m^*(\zeta_{m,t_{N+1}})} - \delta_{m^*(\zeta_{m,t_N})}\|^2\right) \\ &\leq E(\|z\|^2)K_2 \|\zeta_{t_{N+1}} - \zeta_{t_N}\| = L \|\zeta_{t_{N+1}} - \zeta_{t_N}\| \end{aligned} \quad (11)$$

$K_2$  为一个足够大的常数,因此  $h(\zeta)$  在  $\|\zeta\| < 1$  的定义域上满足 Lipschitz 条件,现在放宽  $\zeta$  为正常取值时,对于取定的足够大的常数  $K_3 = 2 \max(\theta_{\text{Max}}, K_1 \pi_{\text{Max}})$ , 有  $\|\zeta / K_3\| < 1$ 。对于  $\delta_{m^*(\zeta)}$  恒存在  $\delta_{m^*(\zeta)} = \delta_{m^*((\zeta-d)/K_3)}$ , 因此有  $h(\zeta) = h(\zeta / K_3)$ , 结合式(11)可以得到对于正常定义域下的  $\zeta$  有

$$\begin{aligned} &\|h(\zeta_{t_{N+1}}) - h(\zeta_{t_N})\| \\ &= \left\| h\left(\frac{\zeta_{t_{N+1}}}{K_3}\right) - h\left(\frac{\zeta_{t_N}}{K_3}\right) \right\| \\ &\leq \frac{L}{K_3} \|\zeta_{t_{N+1}} - \zeta_{t_N}\| = L_1 \|\zeta_{t_{N+1}} - \zeta_{t_N}\| \end{aligned} \quad (12)$$

因此  $h(\zeta)$  是 Lipschitz 连续的,进而容易得到  $g(\zeta)$  也是 Lipschitz 连续的。对于任意时刻  $t_N$ , 对  $g(\zeta)$  构建方程组柯西问题有

$$\left. \begin{aligned} \dot{\zeta} &= g(\zeta) = h(\zeta) - \zeta \\ \zeta_{t_N} &= (1-\beta)\theta_{t_N} - \beta\pi_{t_N}K_1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

根据皮卡德(Picard)存在唯一性定理,在区间  $t_n \in [t_N, t_N + T]$ , 存在以  $\zeta_{t_N}$  为初始条件下的唯一解  $\zeta(t_n | \zeta_{t_N})$ 。特殊地对于  $t_N = 0$  和  $T \rightarrow \infty$ , 则在  $t_n \in [0, +\infty)$ , 有唯一解  $\zeta(t_n | \zeta_0 = 0)$ 。下面讨论  $\zeta(t_n | \zeta_{t_N})$  的单调性,取任意两个时刻  $t_N$  和  $t_N + T$ , 存在  $\zeta_{t_N} \leq \zeta_{t_N+T}$ , 若对于同一用户  $i$  而言有  $\zeta_{i,t_N} = \zeta_{i,t_N+T}$ , 则根据式(7)可知用户在  $t_N + T$  时刻被调度的概率更大,即  $E(\delta_{i^*(\zeta_{t_N})}) \leq E(\delta_{i^*(\zeta_{t_N+T})})$ , 因此  $g_i(\zeta_{t_N}) \leq g_i(\zeta_{t_N+T})$ , 因此常微分方程  $\dot{\zeta} = g(\zeta)$  满足卡姆克(Kamke)条件。对于有  $\zeta_{t_{N1}}$  和  $\zeta_{t_{N2}} = \zeta_{t_{N1}} + \xi$  两个初始条件存在

$$(t_{N2} - t_{N1})^2 + (\zeta_{t_{N1}} - \xi - \zeta_{t_{N1}})^2 \leq \delta(\varepsilon_{\zeta, t_{N1}, t_{N2}}) \quad (14)$$

根据贝尔曼(Bellman)不等式,对于式(13)有

$$\begin{aligned} &\|\zeta(t_n | \zeta_{t_{N1}} + \xi) - \zeta(t_n | \zeta_{t_{N1}})\| \\ &< \left\| \xi + \int_{t_{N1}}^{t_{N2}} g(\zeta_s) ds \right\| e^{L_1 T} < \varepsilon_{\zeta, t_{N1}, t_{N2}} \end{aligned} \quad (15)$$

因此,  $\zeta(t_n | \zeta_{t_N})$  对初值的扰动具有连续依赖性。根据文献[12]可知,  $\zeta(t_n | \zeta_{t_N})$  在  $\zeta_{t_N}$  上是单调的,当  $t_n = 0$  时,对于任意用户,存在  $g(\zeta_0) = h(\zeta_0) - \zeta_0 > 0$ ,  $\zeta(t_n | \zeta_0)$  对于每一个  $t_n$  收敛于一个平衡点  $\zeta^*$ , 现在证明对于任意初始条件  $\zeta_{t_N} \leq \zeta^*$ ,  $\zeta(t_n | \zeta_{t_N})$  都收敛于  $\zeta^*$  [9]。在拟收敛集  $Q$  中取一个元素  $\hat{\zeta}$ , 由于  $Q$  集是稠密的,则有  $0 < \zeta_{t_N} \leq \hat{\zeta}$ , 由上述定义可知  $L(\hat{\zeta}) \subset E$ , 假设在  $E$  集中的  $L(\zeta_0 = 0) = \{\zeta^*\} < L(\hat{\zeta})$ , 对于  $\tilde{\zeta} \subset L(\hat{\zeta})$ , 根据  $h(\zeta^*) = \zeta^*$  的收敛特性和平衡点的特征,同时存在  $\tilde{\zeta} = \zeta^*$  和  $\tilde{\zeta} > \zeta^*$ , 因此根据文献[12]可以得到,  $L(0) = \{\zeta^*\} = L(\hat{\zeta})$ , 即对于任意初始条件  $\zeta_{t_N} \leq \zeta^*$ ,  $L(\zeta_{t_N}) = \zeta^*$ 。最后说明  $\zeta^*$  可以实现

最大的效用目标函数, 假设各用户在初始时刻  $t_n = 0$  已经达到  $\zeta^*$ , 对式(6)的目标函数进行微分可以得到

$$\dot{U}(\zeta)|_{t_n=0} = \sum_{m=1}^M \frac{\dot{\zeta}_{m,t_n}}{\zeta_{m,t_n}} \Big|_{t_n=0} = \sum_{m=1}^M \frac{h(\zeta_m^*) - \zeta_m^*}{\zeta_m^*} = 0 \quad (16)$$

假设系统可以实现最大的评定量  $\zeta^{\text{Max}}$ , 根据  $Q$  集的稠密定义存在  $\zeta^{\text{Max}} \geq \zeta^*$ , 对于  $\zeta^{\text{Max}}$  的调度函数存在  $\delta'_{m^*(\zeta_{m,t_n})}$ , 有

$$E(\delta'_{m^*(\zeta_{m,t_n})}) \leq E(\delta_{m^*(\zeta_{m,t_n})}) = E \left[ \delta \left( \arg \max_{0 \leq m \leq M} \frac{z_{m,t_n+1}}{\zeta_{m,t_n}} \right) \right]$$

则  $\zeta^*$  可使  $U(\zeta)$  实现效用的最大目标, 因此本文采用的业务覆盖和容量综合评定的比例公平算法是收敛的。

## 4 覆盖-容量优化机制

### 4.1 系统模型

本文选取 OFDMA 无线系统来进行说明, 双工方式采用频分双工(Frequency Division Duplex, FDD)。假设每一个时隙内下行总带宽为  $W$ , 对于一个有  $M$  个用户的小区, 并认为该小区的参考信号和业务信号发射功率一致, 大小为  $P^s$  (dBm)。则对于一个用户  $m$  而言, 其在单位带宽资源内所能实现的速率为

$$r_m = \log_2(1 + \text{SINR}_m \cdot \rho_m^2) \quad (17)$$

其中,  $\rho_m$  为快衰落影响因子,  $\text{SINR}_m$  表示用户  $m$  的单位子载波的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR), 其可由式(18)得出

$$\text{SINR}_m(\text{dB}) = \frac{P^s + G^a - L_m(F, D_m, H, \lambda)}{N_0 + \sum_j I_{m,j}} \quad (18)$$

其中  $G^a$  为发射天线增益;  $L_m$  为用户  $m$  的路径损耗, 其主要和下行工作频率  $F$ , 用户  $m$  同基站的距离  $D_m$ , 基站高度  $H$  及阴影衰落余量  $\lambda$  相关;  $N_0$  为高斯白噪声;  $I_{m,j}$  为相邻基站  $j$  对用户  $m$  造成的干扰, 相邻基站集中元素判断标准是其干扰强度不淹没于白噪声  $N_0$  之中。由于信道具有 Rayleigh 性质, 则对于  $U = \rho_m^2$  存在指数的概率密度函数, 从而可以得到  $E(r_m)$  和  $E(p_m)$  为

$$E(p_m) = 10 \lg \left( \int_0^{+\infty} \frac{P^s G^a}{L_m(F, D_m, H, \lambda)} u e^{-u} du \right) \quad (19)$$

$$E(r_m) = \int_0^{+\infty} \log_2(1 + \text{SINR}_m u) \cdot e^{-u} du \quad (20)$$

根据式(19)和式(20)可以计算得到  $E(z_m)$ 。本文同实际系统一样采用边缘用户的接收功率来对一个用户是否被覆盖进行衡量, 定义  $p_{\min}$ , 若用户  $m$  的业务接收功率  $p_m > p_{\min}$ , 则认为该用户被小区覆

盖; 同时定义  $r_{\min}$  来限定用户的最小业务速率, 若  $r_m < r_{\min}$ , 则认为接入该小区的用户无法获得良好的业务体验。

### 4.2 控制机制

下面采用发射功率调整及  $\beta$ -CCPF 算法来制定自适应的 CCO 解决方案, 其主要步骤为: (1) 首先系统衡量本小区与邻小区之间的业务量  $\eta(t)$  差异, 当本小区的业务量在一定时间范围  $\Delta T$  内均低于或高于邻区的业务量在一定阈值时, 其会触发发射功率调整, 通常  $\Delta T$  会在时间尺度上远远大于传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)的调度量级, 否则 CCO 优化的触发会过于频繁且与调整过程容易造成相互冲突; (2) 按照已设定的功率步长  $P_{\text{step}}$  增大或者减小发射功率, 并计算小区新的用户覆盖集; (3) 根据小区新的用户集, 按照规定步长  $\beta_{\text{step}}$  调整新的分组调度算法中的  $\beta$  参数, 以使小区中的用户可以满足吞吐量的需求, 之后重复步骤(2)继续覆盖其它小区的用户或者切换本小区的用户到其它空闲小区, 直到每个小区的用户都可以满足吞吐量服务的要求, 具体 CCO 触发及控制方案如表 1 和表 2 所示(恢复过程类似)。

表 1 覆盖-容量自优化用例的解决机制

步骤 1	衡量本小区与邻小区之间的业务量差别。在 $\Delta T$ 时间范围内, 若本小区的业务量均低于邻区的业务量达到一定的门限, 则进入步骤 2;
步骤 2	调节小区的发射功率, 吸纳邻小区的用户。本小区以一定步长 $P_{\text{step}}$ 增加发射功率。通过式(18)计算邻小区任意用户 $k$ 的接收功率 $E(p_k)$ , 若该值大于等于可以服务的最低功率 $p_{\min}$ , 则认为用户 $k$ 可以被本小区覆盖。将这些用户添加到本小区的用户覆盖集合中, 并进入步骤 3;
步骤 3	调节 $\beta$ 增强小区边缘用户的调度公平性, 使用表 2 的 $\beta$ -CCPF 算法进行调度。重复步骤 2 直到即使当 $\beta$ 等于 1 时步骤 3 也不能使所有在覆盖集中的用户满足速率要求, 之后重复步骤 1。

表 2  $\beta$ -CCPF 调度算法

在覆盖集中的所有用户的速率 $E(r_m)$ 均大于等于最低速率要求 $r_{\min}$ 之前, 执行以下过程:
(1) 以一定步长 $\beta_{\text{step}}$ 增加参数 $\beta$ 的值;
(2) 在收敛 TTI 所规定的时间内, 以式(7)来判断用户 $m$ 是否被调度;
(3) 如果用户 $m$ 是最优用户, 计算 $z_{m,t_n}$ 且令 $\delta_{m^*(\zeta_{m,t_n})}$ 为 1, 并通过式(5)获得用户 $m$ 在下一时刻的综合评定量 $\zeta_{m,t_n}$ ;
(4) 否则, 令 $\delta_{m^*(\zeta_{m,t_n})}$ 为 0, 并通过式(5)获得用户 $m$ 在下一时刻的综合评定量 $\zeta_{m,t_n}$ ;
(5) 更新系统时间;

### 5 仿真及分析

本文通过仿真在 LTE 网络下验证了 CCO 优化下采用本文方法分组调度的性能表现, 仿真场景包括“6+1”基站的理论规则场景及一个基于中国某运营商数据的实际网络非规则场景。

#### 5.1 理论“6+1”站模式

**仿真环境设置** 理论“6+1”场景站型分布如图 1(a)所示, 由 1 个中心基站和周围 6 个邻基站构成, 基站均采用单天线模式, 且拥有相同的资源总数。假定用户的初始位置随机生成且在触发算法前后保持静止, 传播模型采用 COST-231-HATA 模型, 理想业务量  $\eta(t)$  曲线通过文献[13]的方法进行生成, 如图 1(b)所示, 虚线表示中心基站的业务到达强度随时间的变化情况, 而实线表示其它邻基站的业务到达强度随时间的变化情况, 具体参数设置如表 3 所示。

**仿真结果分析** 仿真场景中的中心基站首先执行表 1 中的覆盖-容量自优化过程, 从图 1(b)中可以看到在一段时间段  $\Delta T$  内中心基站对邻基站满足业务量差别门限, 因此其会执行表 1 的步骤 1 来触发容量覆盖优化步骤, 中心基站通过步骤 2 会增强自身的覆盖功率, 仿真数据统计中其边缘场强达到了 -87 dBm, 已可以保证用户基本业务通信, 功率的增加使得中心小区可以吸纳其余邻区的用户, 从图 2 中可以看到在 CCO 优化之后中心小区吸收了邻小

区的用户, 并当作边缘用户为它们提供服务。CCO 的目标是使资源能够得到更好的利用, 在 CCO 优化之前, 所有的邻小区表现为较高的资源占用率 (Resource Occupation, RO), 而中心小区表现出较低的 RO。在 CCO 优化之后, 由于用户由中心小区吸收, 所有的小区资源利用率更均衡化, 即覆盖和容量达到了有效的平衡。但不可避免的问题就是中心基站的小区执行了 CCO 优化之后, 边缘用户占比会提升较多, 如果采用通常的分组调度算法必然会降低小区整体的吞吐量。因此对所有的基站采用表 1 的步骤 3 来根据覆盖容量的综合情况调整  $\beta$  参数, 使资源的分配也得到合理化, 即边缘用户的公平性得到倾斜, 从而提升整体的用户吞吐量。图 3 反映了  $\beta$ -CCPF 同最大载干比(Max Carrier to Interference Ratio, MaxC/I), PF 及轮询(Round Robin, RR)这些经典调度算法<sup>[14,15]</sup>及同样针对 CCO 问题的  $\alpha$ -PF 算法的吞吐量比较情况, 从图中可以看到  $\beta$ -CCPF 的边缘吞吐量达到了 7.2 Mbit/s, 相较于  $\alpha$ -PF, PF 和 RR 分别提升了 1.53 倍、2.11 倍和 2.57 倍。对于平均吞吐量,  $\beta$ -CCPF 达到了 10.1 Mbit/s, 相较于  $\alpha$ -PF, PF 和 RR 分别提升了 1.19 倍, 1.34 倍和 1.61 倍, 这是由于 CCO 之后, 边缘用户在所有用户中的比重增加, 因此增强边缘用户的吞吐量就意味着平均吞吐量的提升。而对于单用户峰值吞吐量而言, MaxC/I 由于其的机制决

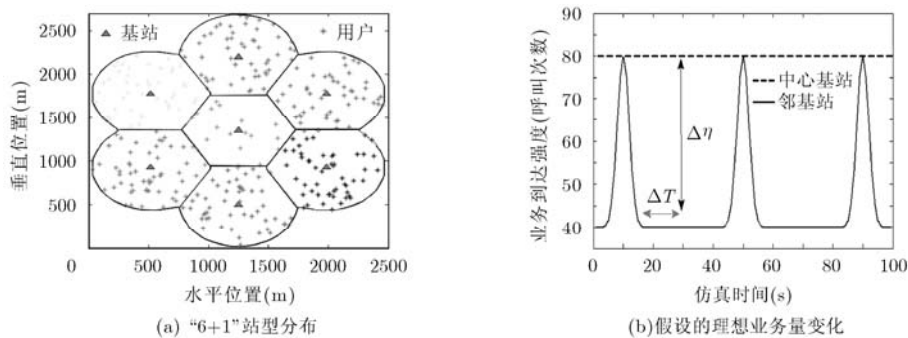


图 1 理论“6+1”仿真场景

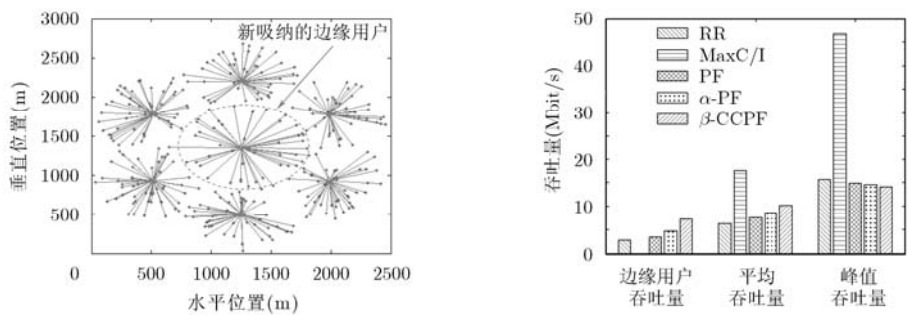


图 2 覆盖-容量优化后的用户关联情况

图 3 理论场景下  $\beta$ -CCPF 算法下的吞吐量表现

表 3 理论场景下的仿真参数设置

参数名称	参数值
基站初始发射功率(dBm)	43
发射功率调整步长 $P_{\text{step}}$ (dB)	$\pm 1$
每小区资源数量(PRBs)	100
基站方位角( $^{\circ}$ )	0:120:240
工作频率(MHz)	2600
天线增益 $G^a$ (dBi)	17.5
$\beta$ 初始值	0.5
$\beta$ 调整步长 $\beta_{\text{step}}$	$\pm 0.05$
最低用户速率 $r_{\text{min}}$ (Mbit/s)	3
最小允许业务覆盖电平 $p_{\text{min}}$ (dBm)	-105
阴影衰落余量 $\lambda$ (dB)	3
基站高度 $H$ (m)	35

表 4 实际场景下的仿真参数设置

参数名称	参数值
传输模式	闭环空间复用(CLSM)
MIMO 数量 nTX:nRX	2:2
每小区资源数量(PRBs/MHz)	100/20
用户(UE)接收噪声系数(dB)	9
用户(UE)移动速度(km/h)	5
调度收敛 TTI 数量 $\text{TTI}_{\text{ps}}$	10
发射功率调整步长 $P_{\text{step}}$ (dB)	$\pm 1$
工作频率(MHz)	2600
天线极化方式( $^{\circ}$ )	[-45, +45]
$\beta$ 初始值	0.5
$\beta$ 调整步长 $\beta_{\text{step}}$	$\pm 0.05$

定其远远高于其它算法,  $\beta$ -CCPF 的峰值吞吐量分别是  $\alpha$ -PF, PF 和 RR 的 97.2%, 95.2%和 90.3%。这是因为虽然  $\beta$ -CCPF 算法下资源被更公平合理地分配给边缘用户, 但由于峰值点本身具有较高的载干比, 因此其只是略低于 PF 和 RR。

## 5.2 实际场景

**仿真环境设置** 选取中国北京某一个区域作为仿真场景, 其实际站型数据和业务统计均来自中国某运营商的 OMC 系统, 该区域共含有 24 个宏站(本文暂不考虑热点微站造成的影响), 本文选取某一个周三的忙时时间点即上午 10:00 的业务量来作为仿真数据, 图 4(a)反映了该时间点下该区域整体基站的 RO 分布情况, 从图中可以看到一些基站由于业务量较高而资源占用 RO 较高。由于 OMC 系统只能统计到整点数据, 而执行覆盖-容量优化机制工作在 TTI 毫秒级别上, 因此我们选取文献[16]中的 TTI 级仿真器来实现本文所提出的机制, 从而构成整个实际仿真场景。在仿真器中采用 Winner II 信道模型, 基站的初始发射功率, 天线的增益及倾角等无线参数均采用现网数据, 具体参数设置如表 4 所示。

**仿真结果分析** 图 4(a)和图 4(b)分别表示的是 CCO 优化前后的网络覆盖和 RO 资源占用的情况, 从图中可以看到, 采用 CCO 机制后, 低 RO 的小区通过业务覆盖功率的调节, 去均衡高 RO 的小区, 使整个区域网络的资源占用更趋近于合理化。同样, 本文还关注 CCO 下的边缘用户吞吐量状况, 图 5 中给出了不同资源分配算法下的吞吐量累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)曲线, 由于在仿真系统中无法获取真实的边缘用户数量, 同其它研究一样, 本文通过吞吐量 CDF 曲线的 5% 来定义该值, 可以看到  $\beta$ -CCPF 要高于  $\alpha$ -PF, PF, RR 以及 MaxC/I, 而在平均吞吐量方面, 除了 MaxC/I(只保证中心用户从而获取较高的平均吞吐量)算法以外,  $\beta$ -CCPF 算法相较于  $\alpha$ -PF, PF 和 RR 分别提升了 1.33 倍, 1.54 倍和 1.96 倍, 可以看到由于网络规模的增大, 其优化效果比理论场景下要好。

## 6 结束语

本文提出了可增强用户公平性调节的分组调度算法  $\beta$ -CCPF, 理论证明了该算法的收敛性, 并以

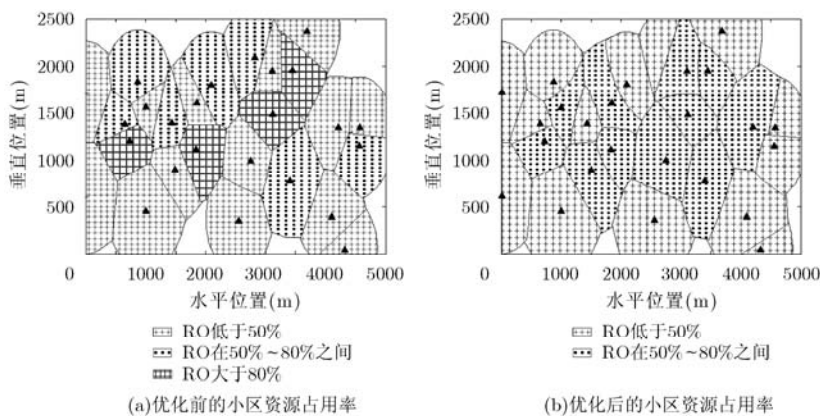
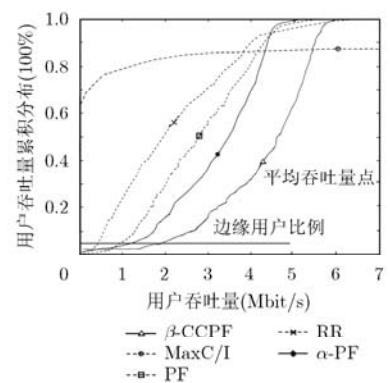


图 4 覆盖-容量优化前后的小区资源占用率情况对比

图 5 实际场景下  $\beta$ -CCPF 算法下的吞吐量 CDF

此分组调度为基础, 研究结合基站发射功率调整的CCO优化机制, 该机制分别在基于规则基站布局的场景和基于实际基站数据的非规则场景中进行了仿真, 通过仿真结果发现该机制可优化基站的资源利用率, 同时与其它分组调度算法相比 $\beta$ -CCPF可获得更好的用户吞吐量性能。

### 参考文献

- [1] 3GPP TR 36.902. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuring and self-optimizing network (SON) use cases and solutions[S]. 2011.
  - [2] Yilmaz O N C, Hamalainen J, and Hamalainen S. Self-optimization of remote electrical tilt[C]. Proceedings of IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2010), Istanbul, Turkey, 2010: 1128-1132.
  - [3] Kasem F, Haskou A, and Dawy Z. On antenna parameters self optimization in LTE cellular networks[C]. Proceedings of 3rd International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT 2013), Beirut, Lebanon, 2013: 44-48.
  - [4] Engels A, Reyer M, Xu X, *et al.* Autonomous self-optimization of coverage and capacity in LTE cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(5): 1989-2004.
  - [5] Razavi R, Klein S, and Claussen H. Self-optimization of capacity and coverage in LTE networks using a fuzzy reinforcement learning approach[C]. Proceedings of IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2010), Istanbul, Turkey, 2010: 1865-1870.
  - [6] Ul Islam M N and Mitschele-Thiel A. Reinforcement learning strategies for self-organized coverage and capacity optimization[C]. Proceedings of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012), Shanghai, China, 2012: 2818-2823.
  - [7] Combes R, Altman Z, and Altman E. Scheduling gain for frequency-selective Rayleigh-fading channels with application to self-organizing packet scheduling[J]. *Performance Evaluation*, 2011, 68(8): 690-709.
  - [8] FP 7 SOCRATES Project. Final report on self-organisation and its implications in wireless access networks[R]. 2010: 63-69.
  - [9] Kushner H J and Whiting P A. Convergence of proportional-fair sharing algorithms under general conditions[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(4): 1250-1259.
  - [10] 丰雷, 李文璟, 邱雪松. 适应自相似业务的无线网络自主CAC策略[J]. *通信学报*, 2013, 34(8): 27-34.  
Feng Lei, Li Wen-jing, and Qiu Xue-song. Self-organized CAC mechanism adopting for self-similarity service in wireless network[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(8): 27-34.
  - [11] Agrawal R, Bedekar A, La R J, *et al.* Class and channel condition based weighted proportional fair scheduler[C]. Proceedings of the International Teletraffic Congress ITC-17, Salvador da Bahia, Brazil, 2001: 553-565.
  - [12] Smith H L. Monotone Dynamical Systems: An Introduction to the Theory of Competitive and Cooperative Systems (Mathematical Surveys and Monographs)[M]. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 2008: 19-36.
  - [13] Hossain M F, Munasinghe K S, and Jamalipour A. An eco-inspired energy efficient access network architecture for next generation cellular systems[C]. Proceedings of 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2011), Quintana Roo, Mexico, 2011: 992-997.
  - [14] Necker M C. A comparison of scheduling mechanisms for service class differentiation in HSDPA networks[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2006, 60(2): 136-141.
  - [15] 郑培超, 贾韶军, 宋瀚涛. OFDMA系统保证服务质量的分组调度算法[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(8): 1779-1782.  
Zheng Pei-chao, Jia Shao-jun, and Song Han-tao. A QoS guaranteed packet scheduling algorithm for OFDMA systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1779-1782.
  - [16] Vienna LTE Simulators-LTE Downlink System Level Simulator[OL]. <http://www.nt.tuwien.ac.at/ltesimulator>, 2013.
- 丰雷: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为无线网络管理、自主管理与优化。  
李文璟: 女, 1973年生, 副教授, 研究方向为通信软件与网络管理。  
邱雪松: 男, 1973年生, 教授, 研究方向为通信软件与网络管理。