

## 基于 TG-PF 的 LTE-A 中继蜂窝网络下行分层调度方法

曲桦<sup>1</sup>, 宋亚兰<sup>1</sup>, 赵季红<sup>2</sup>, 李熠伟<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 电信学院, 陕西 西安 710048; 2. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:**设计了一种中继蜂窝网络的分层调度模型,将中继蜂窝小区的资源调度过程分为高层调度和低层调度两部分,分别由基站和中继站完成。所设计模型中,高层调度和低层调度分别采用 PF 算法和保障吞吐量的比例公平 (TG-PF 算法),该算法充分利用了最大载干比 (Max C/I) 算法和比例公平 (PF) 算法的优势,能够有效地提升小区边缘的吞吐量,以满足中继蜂窝小区的系统吞吐量和调度公平性要求。仿真结果表明,所提方法能够以较低的调度公平性牺牲换取小区边缘吞吐量的较大提升。

**关键词:** 中继蜂窝网络; 分层调度; 保障吞吐量的比例公平; 边缘吞吐量

中图分类号: TN929.5

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2013)12-0113-07

## Downlink hierarchical scheduling method for relay-enhanced cellular network based on TG-PF

QU Hua<sup>1</sup>, SONG Ya-lan<sup>1</sup>, ZHAO Ji-hong<sup>2</sup>, LI Yi-wei<sup>1</sup>

(1. Electronic and Information Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China;

2. Communication and Information Engineering Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Hierarchical scheduling model for relay-enhanced cellular network was designed to divide the whole process of resource scheduling in relay-enhanced cell into two parts, which are high-level scheduling accomplished by eNode B and low-level scheduling accomplished by Relay Node. Based on this, a throughput guaranteed proportional fair (TG-PF) scheduling algorithm was also proposed. The algorithm fully takes the advantages of Max C/I algorithm and PF algorithm consideration, so that it can effectively improve cell throughput. In downlink hierarchical scheduling method for relay-enhanced cellular network based on TG-PF, PF algorithm and TG-PF algorithm are separately used in high-level and low-level scheduling process to satisfy the system throughput and scheduling fairness requirements of relay-enhanced cell. Simulation results suggest that the proposed method can tremendously improve cell edge throughput with a small size sacrifice in scheduling fairness.

**Key words:** relay-enhanced cellular network; hierarchical scheduling; TG-PF; cell edge throughput

### 1 引言

在 3GPP 提出的增强型 Relay 技术标准中,规定中继站(RN, relay node)可以具备独立的资源调度能力。因而,中继蜂窝小区的无线资源调度过程由基站(eNB, enhanced node B)和 RN 共同完成。eNB 和 RN 各自应用的调度算法组合起来被称为组合调度策略。现有的组合调度策略多由经典的最大载干比 (Max C/I) 算法、轮询(RR, round robin)算法和比例公平(PF, proportional fair)算法两两组合得到<sup>[1]</sup>。

但是,仅应用经典调度算法无法满足 LTE-Advanced 系统对于小区边缘覆盖性能的要求,尤其是边缘用户的吞吐量很难保证。为此,本文设计了一种分层调度模型,将中继蜂窝小区的资源调度过程分为高层调度和低层调度两部分。在此基础上,提出了一种适用于低层调度的保障吞吐量的比例公平 (TG-PF, throughput guaranteed proportional fair) 调度算法。该算法与高层调度应用的 PF 算法进行组合,即得到本文提出的基于 TG-PF 的中继蜂窝网络下行分层调度方法。应用该方法,能够以较低的

收稿日期: 2013-07-25; 修回日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071126)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China(61071126)

调度公平性牺牲换取小区边缘吞吐量的较大提升。

## 2 研究背景

当前,中继蜂窝网络的无线资源调度方式主要有集中式和分布式 2 种<sup>[2]</sup>。二者的主要区别在于,集中式调度不要求 RN 完成资源调度功能,而分布式调度需要 RN(relay node)具备独立的资源调度能力。因此,在分布式调度中,RN 可以独立地对所属用户进行调度,无需向 eNB 上报实时控制中心信息。分布式调度方式以其低信令开销、低调度时延的特性获得了研究者的青睐,逐渐成为中继蜂窝网络的主流资源调度方式。

在分布式调度中,由于 eNB 和 RN 具有各自独立的无线资源调度功能,因而在 eNB 和 RN 的调度器中可以应用相同或不同的调度算法对各自所属区域内的用户进行调度。eNB 和 RN 应用的调度算法的组合称为组合调度策略。

目前对分布式调度的研究中,主要有以下几种组合调度策略:1) eNB 应用 Max C/I 算法,RN 应用 PF 算法<sup>[2]</sup>;2) eNB 应用 PF 算法,RN 应用 PF 算法。但是,这 2 种组合调度策略中,策略 1) 的调度公平性不够理想,策略 2) 无法保障边缘用户的吞吐量。因而,需要研究新的组合调度策略,提升中继蜂窝小区的边缘吞吐量以及中心和边缘区域之间的调度公平性。

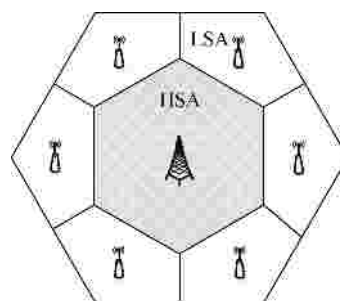
为了达到上述要求,本文对中继蜂窝网络的无线资源调度策略进行了深入研究,以增强小区边缘的覆盖性能,如用户吞吐量、频率资源利用率等为目的设计了分层调度模型。分层调度,是对分布式调度方式的具体实现。在分层调度模型中,小区内的无线资源调度被分为高层调度和低层调度两部分,高层调度由 eNB 负责完成,低层调度由 RN 负责完成。为了提升小区边缘用户的吞吐量,本文充分利用了 Max C/I 算法保障吞吐量和 PF 算法保障公平性的特点,提出了适用于低层调度的 TG-PF (throughput guaranteed proportional fair) 算法。同时,eNB 应用传统 PF 算法完成高层调度。这种高、低层调度分别应用 PF 和 TG-PF 算法的组合调度策略即为本文提出的基于 TG-PF 的中继蜂窝网络下行分层调度方法。

在传统的 PF 调度算法中,折中考虑了系统吞吐量和调度公平性的指标<sup>[3]</sup>。但是,由于 PF 调度算法在换取公平性提升的同时,较多地牺牲了系

统吞吐量性能,因而直接将 PF 调度算法应用于低层调度中,难以对边缘吞吐量起到较大的提升作用<sup>[3]</sup>。为了进一步提升中继蜂窝小区边缘的吞吐量,本文提出了 TG-PF 调度算法。该算法充分利用了 Max C/I 调度算法和 PF 调度算法的优势:由于 Max C/I 算法始终能够为信道条件最佳的用户提供服务,TG-PF 算法利用这一特点来提升资源调度后的系统吞吐量;同时,由于利用 PF 算法能够充分考虑信道时变性为更多用户分配资源,TG-PF 算法利用这一特点提升资源调度的公平性。与传统的下行组合调度策略相比,本文所提下行分层调度方法能够满足小区边缘用户的无线资源调度需求,并且以较小公平性牺牲换取了边缘吞吐量的较大提升,使小区中心用户与边缘用户之间达到相近的吞吐量。

## 3 分层调度模型

中继蜂窝小区被分为高层调度区域(HSA, high-level scheduling area)和低层调度区域(LSA, low-level scheduling area)。HSA 中的用户被称为中心用户(C-UE, central UE),LSA 中的用户被称为边缘用户(R-UE, relay UE);C-UE 的资源调度由 eNB 负责完成,R-UE 的资源调度由其接入的 RN 负责完成。在图 1 所示分层调度模型中,eNB 位于小区的\*\*中心,小区内部部署 6 个 RN,各个 RN 位于小区半径上距中心  $2R/3$  处 ( $R$  为小区半径)。根据下文提出的边界设计规则可以得出,此时能获得最佳的中继传输性能<sup>[4]</sup>。



HSA—高层调度区域 LSA—低层调度区域  
图 1 中继蜂窝小区的分层调度模型示意

### 3.1 HSA 和 LSA 的边界设计

对 HSA 和 LSA 的边界进行设计,有 2 个目的:首先,明确 eNB 和各个 RN 调度权限的适用范围;其次,尽量提升小区边缘的吞吐量。

为了保证每个用户能够公平地获得资源,且基

站与中继站的边缘用户获得信号质量相同。HSA 和 LSA 的边界设计应当遵循 2 个规则：规则 1，每个 C-UE (central UE) 和每个 R-UE (relay UE) 等概率地获得资源块，以保障调度的公平性；规则 2，边界处 UE 的接收信号强度相等，以提升小区边缘的吞吐量。

规则 1 可表示为

$$\frac{P \times N}{S_H} = \frac{(1-P) \times N}{S_L} \quad (1)$$

规则 2 可表示为

$$\frac{Pwr_{eNB}/(P \times N)}{(\sqrt{3}r/2)^2} = \frac{Pwr_{RN}/[(1-P) \times N]}{(2R/3 - \sqrt{3}r/2)^2} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中， $P$  为高层调度可用资源占总资源的比例； $N$  为系统总资源块数目； $S_H$  为 HSA 所占的面积，取值为  $3\sqrt{3}r^2/2$ ； $S_L$  为 LSA 所占的面积，取值为  $3\sqrt{3}(R^2 - r^2)/2$ ； $R$  和  $r$  分别为宏小区和 HSA 的半径； $Pwr_{eNB}$  和  $Pwr_{RN}$  为 eNB 和 RN 的发射功率，取值分别为 46 dBm 和 37 dBm； $Pwr_{eNB}/(P \times N)$  表示被 eNB 调用的资源块平均分得的发射功率； $Pwr_{RN}/[(1-P) \times N]$  表示被 RN 调用的资源块平均分得的发射功率；接收功率与距离的平方成反比， $\sqrt{3}r/2$  表示区域分界线到 eNB 的距离， $2R/3 - \sqrt{3}r/2$  近似表示 LSA 中 6 个小扇区内中继站到小区边缘的距离，则等式 (2) 表示区域边界线处每个资源块的接收功率相等，由规则一知 HSA 与 LSA 中每个用户获得的资源块概率相等，所以边界处 UE 的接收信号功率相等。

联立式(1)和式(2)可以解得

$$\begin{cases} r = 0.6063R \\ Per = 0.3676 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知，当 HSA 的半径约为宏小区半径的 0.6 倍时，边界上 UE 对 eNB 和 RN 的接收功率相等，LSA 中远离小区中心的一侧与靠近小区中心的一侧能够获得相同的覆盖性能。此时，高层调度和低层调度可用资源占总资源的比例分别为 37% 和 63%，实际中可看做 40% 与 60% 的资源配比。

### 3.2 用户区分策略

在资源调度启动阶段，eNB 将所有的 RN 和向它发送下行资源调度请求的 UE 都可以看作自己的“用户”。因此，在分层调度模型中，需要将 C-UE、

R-UE 和 RN 区分开来，方便在后续的调度周期按照调度权限由 eNB 或 RN 完成资源调度过程。

用户区分主要分为 2 个步骤。

1) 区分 RN 和 UE。在这个步骤中，eNB 根据接收到的资源请求报文中的相应字段确定报文来源，将“用户”分为 RN 和 UE，并按照适当的调度算法对它们进行下行资源调度。

2) 区分 C-UE 和 R-UE。对于步骤 1) 中被确定为 UE 的“用户”，eNB 通过式(4)计算它们的路损值  $PL^{[5]}$ 。

$$PL = 128.1 + 37.6 \lg d \quad (4)$$

其中， $d$  为 eNB 到被测用户的距离。

得到各个 UE 的路损值后，与距离宏小区中心  $0.6R$  处 UE 的路损阈值  $PL_{th}$  进行比较：当  $PL < PL_{th}$  时，UE 为 C-UE，可以直接与 eNB 通信，由 eNB 负责其资源调度过程；当  $PL > PL_{th}$  时，UE 为 R-UE，由 RN 负责其资源调度过程。

### 3.3 分层调度模型中的小区吞吐量计算

在分层调度模型中，将宏小区分为 HSA 和 LSA 两部分。因而，需要分别计算 HSA 和 LSA 的吞吐量，再进行求和得到中继蜂窝小区的总吞吐量。式(5)所示计算公式由香农公式进行修正后得到。

$$C = \sum_{i=1}^{N_{sc}^{eNB}} x_i^{(k)} \frac{B}{N_{sc}} \lg \left( 1 + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M SINR_m \right) + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{N_{sc}^{RN_i}} y_j^{(k)} \frac{B}{N_{sc}} \lg \left( 1 + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N SINR_n \right) \quad (5)$$

其中， $N_{sc}^{eNB}$  和  $N_{sc}^{RN_i}$  分别为 eNB 和  $RN_i$  的资源集合中包含的子载波数目； $x_i^{(k)}$  和  $y_j^{(k)}$  分别为待服务的 C-UE<sub>k</sub> 和 R-UE<sub>k</sub> 分得的子载波  $i$  和子载波  $j$ ； $B$  为系统总带宽， $N_{sc}$  为系统的子载波总数； $\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M SINR_m$  和  $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N SINR_n$  分别为所有 C-UE 和所有 R-UE 的平均信干噪比。

## 4 TG-PF 调度算法

### 4.1 算法设计

该算法在均衡考虑公平性与吞吐量 2 个指标的基础上，设计了 2 个影响用户调度优先级的因子——公平性因子和吞吐量因子。

1) 公平性因子。在 TG-PF 算法中，通过计算

用户  $k$  在上一调度周期结束时的实时传输比特速率和整个调度周期平均比特传输速率的比值来表征公平性。公平性因子  $F_k$  的数学表示为

$$F_k = \frac{r_k(t)}{R_k(t)} \quad (6)$$

其中,  $r_k(t)$  和  $R_k(t)$  分别为用户  $k$  在  $t$  时刻的实时传输比特速率和在上一调度周期内的平均传输比特速率。由式(6)可以看出, 用户  $k$  的实时传输比特速率越高、平均传输比特速率越低,  $F_k$  的值越大, 公平性因子对用户  $k$  的调度优先级影响越大; 反之, 公平性因子对用户  $k$  的调度优先级影响越小。事实上, 式(6)即为 PF 算法的调度规则。

2) 吞吐量因子。在 TG-PF 算法中对吞吐量的考量, 继承了传统 Max C/I 调度算法的思想, 通过用户  $k$  在上一调度周期结束时的实时传输比特速率来表征吞吐量。吞吐量因子  $T_k$  的数学表示为

$$T_k = r_k(t) \quad (7)$$

其中,  $r_k(t)$  为用户  $k$  在  $t$  时刻的实时传输比特速率。

由式(7)可以看出, 用户  $k$  的实时传输比特速率越高, 吞吐量因子  $T_k$  的值越大, 吞吐量因子对用户  $k$  的调度优先级影响越大; 反之, 吞吐量因子对用户  $k$  的调度优先级的影响越小。事实上, 式(7)即为 Max C/I 算法的调度规则。

综合考虑用户调度的公平性因子和吞吐量因子之后, 可以得出用户  $k$  的调度优先级  $Pr_k$  的计算公式, 来表征 TG-PF 算法的调度规则, 为

$$Pr_k = (F_k)^a \cdot (T_k)^b \quad (8)$$

其中,  $a$  和  $b$  分别为公平性因子和吞吐量因子的调整指数, 取值区间为[1,2]。通过调整  $a$  和  $b$  的值, 可以满足 TG-PF 算法在不同网络场景下对于吞吐量和公平性的不同配比需求:

1) 当  $a = b = 1$  时, 为基本 TG-PF 算法, 此时, 是 TG-PF 算法在公平性和吞吐量之间做折中处理最好的情况;

2) 当  $a = 1, b = 2$  时, 为增强公平性的 TG-PF 算法, 适用于在中继蜂窝小区边缘吞吐量较好的场景下, 提升调度的公平性;

3) 当  $a = 2, b = 1$  时, 为提升吞吐量的 TG-PF 算法, 适用于在中继蜂窝小区公平性较好的场景下进一步提升小区的吞吐量。

## 4.2 基于 TG-PF 的下行分层调度方法流程

基于 TG-PF 的中继蜂窝网络下行分层调度方法分资源初始分配和分层资源调度 2 个阶段进行<sup>[6]</sup>。在资源初始分配阶段, 系统根据用户的下行资源请求, 为用户分配资源; 在分层资源调度阶段, 系统根据资源初始分配的结果, 在 HSA 中应用 PF 调度算法, 在 LSA 内应用 TG-PF 调度算法, 完成资源的动态调度, 提升小区边缘的覆盖性能。2 个阶段的具体实施步骤如下。

### 1) 资源初始分配阶段

在资源初始分配阶段, 进行的主要是用户区分、中继选择和资源的初始分配过程, 步骤如下。

(a) 资源分配流程开始后, 宏小区内所有待服务的 UE 都向 eNB 发出下行资源请求。同时, 在初始化阶段, 宏小区内所有的 RN 也将向 eNB 发送资源请求来获得其可以独立调度的频率资源。该步骤中, eNB 将所有发出请求的 RN 和 UE 都看作自己的“用户”, 将请求存入资源请求队列  $Q$  中, 如式(9)所示。

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} C-UE_1, L, C-UE_M, R-UE_1, L, \\ R-UE_N, RN_1, L, RN_6 \end{array} \right\} \quad (9)$$

队列中, 包含  $C-UE_1$  至  $C-UE_M$  等  $M$  个  $C-UE$  的资源请求,  $R-UE_1$  至  $R-UE_N$  等  $N$  个  $R-UE$  的资源请求以及  $RN_1$  至  $RN_6$  等 6 个 RN 的资源请求。

(b) 按照 2.2 节所述用户区分策略将 RN、 $C-UE$  和  $R-UE$  区分开来, 并由 eNB 向 RN 分配 60% 的系统资源, 供 RN 对  $R-UE$  进行低层调度。剩余的 40% 系统资源, 由 eNB 对  $C-UE$  进行高层调度。该步骤完成后, 资源请求队列用  $Q'$  表示为

$$Q' = \{C-UE_1, L, C-UE_M, R-UE_1, L, R-UE_N\} \quad (10)$$

(c) 对于每个  $R-UE$ , 需要向宏小区内所有 RN 发送参考信号, RN 计算每个  $R-UE$  的路损值, 并将结果反馈给  $R-UE$ 。 $R-UE$  根据各 RN 的反馈信息, 选出路损值最小的 RN 作为自己的接入 RN, 发送资源请求。

(d) 用户区分和中继选择过程结束后, 由 eNB 为 HSA 内的  $C-UE$  分配初始资源; 同时, LSA 内各 RN 为所属区域内的  $R-UE$  分配初始资源, 并通知 eNB 该  $R-UE$  的资源请求已得到处理, 请从资源请求队列中剔除。该步骤完成后, 资源请求队列用  $Q''$  表示为

$$Q^* = Q' \setminus \left\{ \left( \mathbf{U}_{C-UE_i} \right) \mathbf{U} \left( \mathbf{U}_{R-UE_j} \right) \right\} \quad (11)$$

(e) 检查资源请求队列是否为空，若  $Q = \Phi$ ，则表示所有的资源请求都得到了处理，资源初始分配阶段结束；若  $Q \neq \Phi$ ，则转至步骤(a)继续进行资源初始分配直至资源请求队列为空时结束。

2) 分层资源调度阶段

分层资源调度阶段，分 2 个子阶段进行：eNB 负责的高层调度阶段和 RN 负责的低层调度阶段。2 个子阶段的实施步骤类似，具体如下。

(a) 资源初始分配阶段结束后，eNB 或 RN 利用分得的资源块在指定下行子帧上分别向所属的 C-UE 或 R-UE 进行下行数据传输。eNB 或 RN 分别根据预设的调度周期  $T_s$  (每个  $T_s$  长度为一个 TTI，每个 TTI 为 1 ms)，进行高层或低层调度。在上一调度周期结束时，eNB 或 RN 独立获取待服务 C-UE 或 R-UE 的实时传输比特速率。

(b) eNB 或 RN 根据式(12)所示规则独立更新待服务 C-UE 或 R-UE 的平均传输比特速率<sup>[7]</sup>。

$$R_k(t+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T}\right)R_k(t) + \frac{r_k(t)}{T}, & k = k^*(t) \\ \left(1 - \frac{1}{T}\right)R_k(t), & k \neq k^*(t) \end{cases} \quad (12)$$

其中， $R_k(t+1)$ 和  $R_k(t)$ 分别为用户  $k$  在本调度周期和上一调度周期内的平均传输比特速率； $r_k(t)$ 为用户  $k$  在  $t$  时刻的实时传输比特速率； $T$  为一个调度周期的长度； $k^*(t)$ 为  $t$  时刻选出的被调度用户。

(c) eNB 根据式(6)所示的 PF 调度规则计算出各待服务 C-UE 的高层调度优先级  $P_{r_k^{(1)}}$ ，并根据式(13a)选出高层优先级最高的用户  $k_1^*(t)$ ，为其调度资源；同时，RN 根据式(8)所示的 TG-PF 调度规则计算出各待服务 R-UE 的低层调度优先级  $P_{r_k^{(2)}}$ ，并根据式(13b)选出低层优先级最高的用户  $k_2^*(t)$ ，为其调度资源。

$$k_1^*(t) = \arg \max_{k \in \{C-UE\}} \{P_{r_k^{(1)}}\} \quad (13a)$$

$$k_2^*(t) = \arg \max_{k \in \{R-UE\}} \{P_{r_k^{(2)}}\} \quad (13b)$$

该步骤完成后，用  $Q_C$  和  $Q_R$  分别表示待服务 C-UE 和 R-UE 的集合。高层调度和低层调度的资源请求队列分别用  $Q_1'$  和  $Q_2'$  表示为

$$Q_1' = Q_C \setminus \{k_1^*(t)\} \quad (14a)$$

$$Q_2' = Q_R \setminus \{k_2^*(t)\} \quad (14b)$$

(d) eNB 继续按照高层调度优先级由高到低的顺序为  $Q_1'$  中的 C-UE 调度资源，直至  $Q_1' = \Phi$  为止；同时，RN 继续按照低层调度优先级由高到低的顺序为  $Q_2'$  中的 R-UE 调度资源，直至  $Q_2' = \Phi$  为止。

至此，基于 TG-PF 的中继蜂窝网络下行分层调度方法的 2 个步骤均已完成。应用该方法，能够以较低的调度公平性牺牲换取小区边缘吞吐量的较大提升。

### 5 仿真与性能分析

在本节中，将首先建立分层调度模型，并利用该模型对基于 TG-PF 的中继蜂窝网络下行分层调度方法进行仿真与性能分析。

#### 5.1 分层调度模型的建立

本文模拟城区环境中的中继蜂窝小区环境对无线资源调度算法进行仿真，具体的仿真参数如表 1~表 4 所示。在仿真过程中 LSA 资源调度引入了软频率复用的概念，在理想状态下认为 6 个 LSA 扇区中，不相邻的扇区之间不存在同频干扰，即可以同时调用同一个频率资源块<sup>[8]</sup>。在 6 个小扇区内有 3 个两两不相邻扇区可以复用资源，故复用因子是 3<sup>[9]</sup>。

表 1 系统参数

仿真参数	参数值配置
基站间距离	500 m
RN 部署位置	2R/3
载频	2 GHz
系统带宽	20 MHz
子帧长度	1 ms
业务模型	满队列模型
路损计算公式	$PL=128.1+37.6\lg d$
噪声功率谱密度	-70 dBm
阴影衰落	eNB? UE: 8 dB RN? UE: 10 dB
仿真时长	1 000 TTI

表 2 用户参数

用户分布	均匀分布
站点与用户最小距离	eNB: 35 m RN: 10 m

表 3 站点参数

仿真参数	参数值配置
站点发射功率	eNB : 46 dBm RN : 37 dBm
天线增益	eNB : 15 dBi RN : 5 dBi
HSA 半径	0.6R

表 4 资源参数

仿真参数	参数值配置
系统资源块总数	100
HSA 内资源块数目	40
LSA 内资源块数目	60
LSA 频率复用因子	3

### 5.2 算法仿真与性能分析

本节中,根据表 1~表 4 中的参数,建立分层调度模型后,利用分层调度模型对基于 TG-PF 的中继蜂窝网络下行分层调度方法进行了仿真,并从用户平均吞吐量、系统频谱利用率和区域公平性<sup>[10]</sup>3 个方面与表 5 中所示的组合调度策略进行了对比。其中,策略 4 为本文所提调度方法。

表 5 4 种组合调度策略

调度策略	高层调度算法	低层调度算法
策略 1	无中继小区, PF 算法	无中继小区, PF 算法
策略 2	PF 算法	PF 算法
策略 3	Max C/I 算法	PF 算法
策略 4	PF 算法	TG-PF 算法

#### 1) 用户平均吞吐量

图 2 为 4 种调度策略的用户平均吞吐量对比图。从策略 1~策略 4,用户的平均吞吐量依次提升。策略 1 下的用户平均吞吐量远低于其余 3 种策略下的用户平均吞吐量,是因为传统蜂窝小区中没有应用 Relay 技术提升覆盖性能;策略 2 与策略 3 相比,用户平均吞吐量较低,是因为策略 3 在高层调度中应用了 Max C/I 调度算法,应用该算法获得的吞吐量性能远好于 PF 算法;在 4 种策略中,策略 4,也即本文所提调度方法获得了最佳的用户平均吞吐量,是因为 TG-PF 算法对 R-UE 平均吞吐量的提升高于 PF 算法对 R-UE 平均吞吐量的提升,而小区中 R-UE 的数目多于 C-UE,因而策略 4 在提升边缘吞吐量的同时,提高了用户的平均吞吐量。

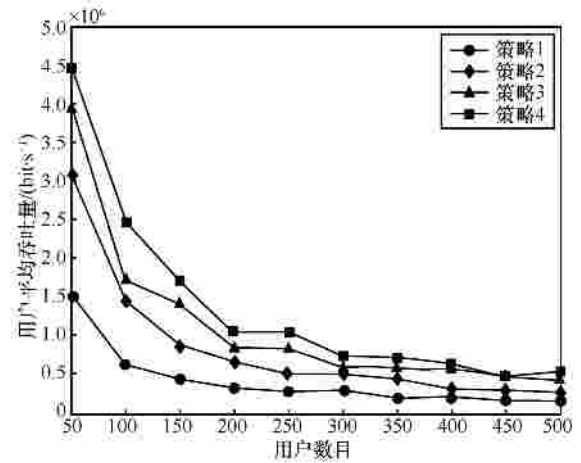


图 2 4 种调度策略的用户平均吞吐量对比

#### 2) 系统频谱利用率

图 3 为 4 种调度策略的系统频谱利用率对比图。从策略 1~策略 4,系统频谱利用率依次提升。也即,在单位频带上,利用基于 TG-PF 的下行分层调度方法可以获得最高的系统吞吐量。在图 1 所示的用户平均吞吐量指标与系统总吞吐量成正比例关系。策略 4 带来用户平均吞吐量提升的同时,将带来系统总吞吐量的提升。由于系统带宽是一定的,因而系统总吞吐量的提升将带来频谱利用率的提升。

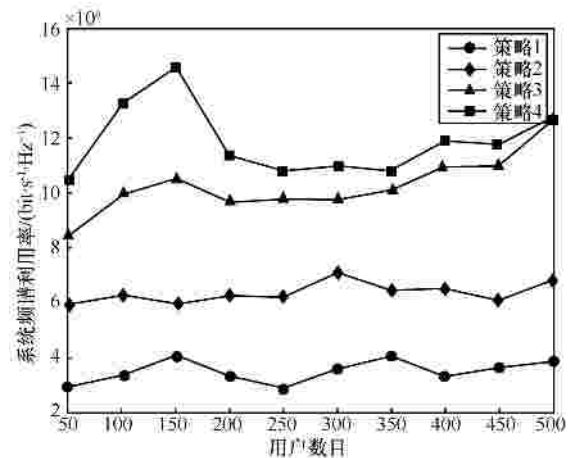


图 3 4 种调度策略的系统频谱利用率对比

#### 3) 区域公平性

图 4 为 4 种调度策略的区域公平性对比图。区域公平性表征的是 HSA 内用户和 LSA 内用户之间的调度公平性。图中,策略 2 的公平性最好,策略 4 次之,策略 3 再次之,策略 1 最差。将本文中提出的策略 4 与现有的方案策略 2 和策略 3 对比,不难发现,策略 4 在吞吐量和公平性方面的性能均好于

策略 3；与策略 2 相比，策略 4 牺牲了少量公平性，换来了吞吐量和频谱利用率的大幅提升。并且，策略 3 所用最大载干比 (Max C/I) 算法达到了公平性的下界，由图中对比可知，调度策略 4 的公平性优于策略 3，即本文所提调度策略为了换取吞吐量与频谱利用率所做出的少量公平性牺牲是可以被接受的。

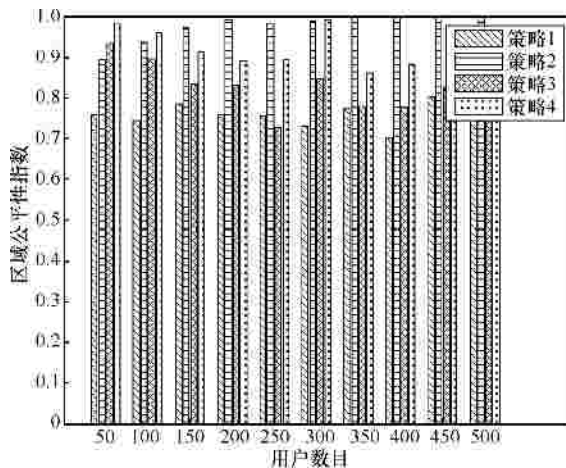


图 4 4 种调度策略的区域公平性对比

## 6 结束语

为了提升中继蜂窝小区边缘用户吞吐量及系统频谱利用率等性能，本文提出了一种基于 TG-PF 的中继蜂窝网络下行分层调度方法。该方法中，以增强小区边缘覆盖性能为目的设计了分层调度模型，将中继蜂窝小区内的无线资源调度过程分为高层调度和低层调度两部分，明确了 eNB 和各个 RN 的调度权限。同时，该方法将本文提出的 TG-PF 调度算法应用于分层调度模型的低层调度中，与高层调度中应用的 PF 算法共同构成一种新的组合调度策略。通过仿真实验，验证了所提下行分层调度方法在吞吐量、频谱利用率和调度公平性方面对系统性能，特别是小区边缘区域性能的提升作用。

## 参考文献：

- [1] 刘立君, 罗志年. 中继蜂窝系统联合调度的公平性优化[J]. 计算机工程, 2012, 38(19):64-70.  
LIU L J, LUO Z N. Fairness optimization of joint schedule for relay cellular system[J]. Computer Engineering, 2012, 38(19):64-70.

- [2] 郑佩, 彭岳星, 龙航等. 协作通信及其在 LTE-Advanced 中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.  
ZHENG K, PENG Y X, LONG H, *et al.* Collaborative Communication and Its Application in LTE-Advanced[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2010.
- [3] MA Z, XIANG W, LONG H, *et al.* Proportional fair resource partition for LTE-advanced networks with type I relay nodes[A]. 2011 IEEE International Conference on Communications[C]. Kyoto, 2011.1-5.
- [4] SALEM M, ADINOYI A, RAHMAN M, *et al.* An overview of radio resource management in relay-enhanced OFDMA-based networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2010, 12(3):422-438.
- [5] 3GPP TR36.942 V9.0.1. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF)[S]. 2010.
- [6] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKOLD J. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband[M]. Salt Lake City: Academic Press, 2011.
- [7] 任敏. LTE-A 中的小区选择和用户调度算法研[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.  
REN M. The Research of Cell Selection and Users Scheduling[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science Technology University, 2010.
- [8] KWAN R, LEUNG C. A survey of scheduling and interference mitigation in LTE[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2010, 2010: 1.
- [9] SALEM M, ADINOYI A, RAHMAN M, *et al.* An overview of radio resource management in relay-enhanced OFDMA-based networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2010, 12(3):422-438.
- [10] 范文鹏, 徐昌彪, 鲜永菊. LTE-A 系统载波聚合情况下改进的 PF 算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(3):1032-1037.  
FAN W P, XU C B, XIAN Y J. Improved proportional fair algorithm for LTE-Advanced system with carrier aggregation[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(3):1032-1037.

## 作者简介：



曲桦 (1961-)，男，陕西杨凌人，博士，西安交通大学教授、博士生导师，主要研究方向为现代通信网、计算机网络体系结构。

宋亚兰 (1988-)，女，河南洛阳人，西安交通大学硕士生，主要研究方向为通信网络中无线资源管理与调度。

赵季红 (1963-)，女，陕西西安人，博士，南京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为宽带通信网、新一代网络的管理与控制。

李熠伟 (1989-)，男，河北石家庄人，西安交通大学硕士生，主要研究方向为 LTE-A 系统中无线资源调度。