

基站协作系统下行链路中基于不同 QoS 的用户调度策略

刘 宇 郑宝玉

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘 要: 在基站协作通信中, 协作用户的调度是关键的问题之一。传统的用户调度方法为了片面追求小区的边缘传输速率与平均传输速率, 造成了资源分配的不合理。本文着眼于最大限度地提升小区用户容量, 提出了一种基于用户服务质量的调度策略, 依据用户的需求速率和允许时延等条件确定优先级合理地调度分配资源, 同时兼顾考虑小区吞吐率的提升。仿真结果表明, 与原有的用户调度策略相比, 该策略能够以较小的吞吐率损失为代价, 大大提高了小区的用户容量。

关键词: 基站协作; 调度策略; 服务质量; 小区容量

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)12-1670-08

An Users Scheduling Policy Based on Different Requirements in the Downlink of Base Station Cooperation Systems

LIU Yu ZHENG Bao-yu

(School of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Jiangsu, Nanjing, 210003, China)

Abstract: The scheduling of cooperative users is one of the key issues in the base station cooperation communication. Traditional scheduling methods for users focus on the edge transmission rate and the average transmission rate of cells unilaterally, resulting in irrational allocation of resources. This paper proposed a new scheduling policy based on different QoS (Quality of Service) of users aiming at maximizing the capacity of cells, which can allocate resources reasonably according to the users' required rate and allowed delay while taking the enhancement of the throughput of cells into account. Simulation results show that compared with traditional users scheduling policies, the new policy can improve the capacity of cells greatly at the cost of a small reduction of throughput.

Key words: base station cooperation; scheduling policy; quality of service; the capacity of cells

1 引言

随着社会的发展和科学技术的不断进步, 无线通信所提供的业务也从单一的低速话音业务向包括语音、视频、数据的宽带多媒体业务扩展。由于无线频谱的日益紧张, 如何最大限度地提高频谱的使用效率便成为人们关注的焦点。传统蜂窝网络中, 相邻的小区进行频谱划分以避免干扰。基站协作(又称协作多点、多小区处理)传输能够充分利用多基站、多天线、多用

户资源将干扰信号转变为有用信号, 能够提高频率复用因子为 1 时小区边缘用户的传输速率, 大大提高了频谱的利用率^[1]。因此, 在近年来引起了业界的广泛关注和研究, 并成为 3GPP LTE-Advanced 标准化工作的重要研究项目^[2]。

协作用户调度是基站协作通信的关键问题之一。协作用户调度通过选择协作用户的分组和分组的优先策略, 完成每个资源块上传输数据的确定。现有文献已经提出了多种协作用户调度方案。文献[3]提出了

一种基于用户信道增益的贪婪用户调度策略 (Greedy User Selection, GUS), 该策略通过依次选取信道增益最优的用户直到和速率出现下降趋势为止。文献[4]利用用户的信道特性, 提出一种基于用户获取传输功率的调度策略 (the "Best" Local received Power, BLP), 该策略在基站协作中可以达到空域满复用传输。文献[5]提出一种基于大尺度信道信息的隔离用户分组方法 (Isolated Based Grouping, IBG), 各小区中心用户被分为一组, 边缘用户被分为另一组, 各协作基站每次只向其中一组用户提供服务, 同时使用轮询调度策略依次调度各组。文献[6]提出了一种基于“强弱组合”条件下大尺度信道的协作用户选择方案 (Strong Weak Grouping, SWG), 将本小区信道条件较好的用户和其他小区信道条件较差的用户分为一组共同传输, 同时同样采用轮询策略依次调度各组。

然而, 现有的协作用户调度方法大多仅考虑小区传输速率和频谱利用率的提高, 而忽视了不同用户不同业务之间资源需求的差异性。本文提出一种新的基站协作通信下行链路调度策略, 依据不同用户服务质量 (Quality of Service, QoS), 在保证小区吞吐率的同时尽量提高小区的用户容量。

本文第一部分为引言; 第二部分为系统模型, 对基站协作通信的原理与信道特性及预编码进行了研究; 在第三部分, 提出并分析了一种新的基于不同用户 QoS 调度策略; 第四部分为性能分析, 计算讨论本文提出协作方案的理论性能; 最后的第五部分为仿真结果, 通过仿真证明该策略能够在不影响小区吞吐率的情况下大大提高小区的用户容量。

2 系统模型

2.1 传输信道

小区不同用户之间通过基站进行信息交互。假设一个无线网络中包含 N_b 个小区, 每个小区包含一个基站, 每个基站架设有 N_i 根天线, 每个小区有 K 个用户。

在传统的非协作小区中, 每个用户只与一个基站相互通信, 假设用户 i 与基站 b_i 相连, 那么用户 i 接受到的信号为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{b_i} \mathbf{x}_{b_i} + \sum_{j \neq i} \mathbf{H}_{b_j} \mathbf{x}_{b_j} + \mathbf{n}_i, \quad i=1, 2, \dots, K \quad (1)$$

式中, \mathbf{x}_{b_j} 表示基站 b_j 需要发给用户 i 的信号, \mathbf{n}_i 表示用户 i 处的噪声。 \mathbf{H}_{b_j} 表示基站 b_j 与用户 i 之间的信道响应。如果用 \mathbf{a}_{b_j} 表示用户 i 与基站 b_j 之间的大尺度信道响应, 用 \mathbf{B}_{b_j} 表示用户 i 与基站 b_j 之间的小尺度信道响应, 则有 $\mathbf{H}_{b_j} = \mathbf{a}_{b_j} \mathbf{B}_{b_j}$ 。在本文中, 假设小尺度衰落符

合瑞利 (Rayleigh) 分布。

在基站协作通信系统中, 多个基站共同为一组选定的用户进行数据传输, 假设一组协作通信的基站数目为 N_b 个, 此时用户 i 接受到的信号为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \sum_{j \neq i} \mathbf{H}_j \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i \quad (2)$$

其中, \mathbf{H}_i 表示用户 i 与本组所有参与协作基站天线之间的信道响应, 即 $\mathbf{H}_i = (\mathbf{H}_{1i}, \mathbf{H}_{2i}, \dots, \mathbf{H}_{N_b i})_{1 \times N_b N_i}$ 。

2.2 预编码及功率控制

下行链路采用预编码进行传输, 采用不同的预编码算法, 可以减少用户信道的相关性, 达到降低用户信道之间干扰的目的。

脏纸编码 (Dirty Paper Coding, DPC) 算法是一种非线性的预编码方案, 可以达到预编码的理论上限, 但由于其极高的复杂度, 仅仅存在理论价值。其他线性算法包括迫零 (Zero Forcing, ZF) 算法、块对角化 (Block Diagonalization, BD) 算法、最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 算法等, 各具优缺点, 在实际中常常使用。在本文中, 使用迫零算法作为预编码算法。

经过预编码后, 用户 i 接受到的信号可以表示为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{T}_i \mathbf{s}_i + \sum_{j \neq i} \mathbf{H}_j \mathbf{T}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_i \quad (3)$$

其中, \mathbf{T}_i 表示用户 i 的预编码矩阵。同时, 多基站协作通信的预编码还需要受到基站发射功率的如下限制:

$$E \left[\sum_{k=1}^{N_b} \text{Tr}(\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^H) \right] = \text{Tr} \left(\sum_{k=1}^{N_b} \mathbf{T}_k \mathbf{T}_k^H \right) \leq P_t \quad (4)$$

$$E \left[\sum_{k=1}^{N_i} \text{Tr}(\mathbf{x}_{ik} \mathbf{x}_{ik}^H) \right] = \text{Tr}(\mathbf{T}_i \mathbf{T}_i^H) = \text{Tr} \left(\sum_{k=1}^{N_i} \mathbf{T}_{ik} \mathbf{T}_{ik}^H \right) \leq P_{b_i} \quad (5)$$

式(4)和式(5)分别表示总功率约束和每个基站的功率约束, \mathbf{x}_{ik} 表示基站 i 向用户 k 传输的信号, P_t 和 P_{b_i} 分别表示基站总发射功率和基站 i 的发射功率, $P_t = N_b P_{b_i}$, \mathbf{T}_{ik} 表示用户 k 与基站 i 之间的预编码向量, 即 $\mathbf{T}_k = (\mathbf{T}_{1k}^T, \mathbf{T}_{2k}^T, \dots, \mathbf{T}_{N_b k}^T)^T_{N_b \times N_i}$ 。

单基站功率约束 (Per Base station Power Constraint, PBPC, 即式(5)) 约束了每个基站的发送功率大小, 但容易造成工程设计和性能分析的困难。文献[7]指出, 可以利用单用户功率约束 (Per User Power Constraint, PUPC) 代替 PBPC, 并且在多载波系统中满足 PUPC 则几乎自动满足 PBPC。因此, 本文考虑 PUPC 同时每个用户等功率分配基站功率, 此时有 $\|\mathbf{T}_i\|^2 = P_u$, 同时满足 $P_t = N_b N_i P_u$ 。

此外, 假设每个协作基站组内所有基站通过无时延无误码高速率的光纤骨干网相互连接并能获得完整

的信道信息(Channel State Information, CSI),同时存在一个共享的中央处理单元分析需要传输的数据信息和CSI,控制各基站传输。

3 基于 QoS 的协作调度策略

小区内待服务的用户数远大于经过预编码后小区能够同时服务的用户数,因此需要一定的协作调度策略,确定在相同时频上同时服务的用户。与非协作基站调度策略相比,协作基站调度可以获得全部的频率复用,避免了复杂的频率规划,同时可以获得多用户分集增益。

3.1 面向最大容量的建模

现有的各种调度方案更多地面向小区吞吐率和频率利用率的提高,很少关注小区用户容量的提升。例如在之前提到的调度方案中,CBS 和 GUS 完全以提高小区的吞吐率为基准,因此每次基站都是调度信道条件较好的几个用户,使得信道条件较差的边缘用户完全得不到服务。IBG 和 SWG 虽然采用了轮询策略,提高了小区边缘用户传输速率,适当地兼顾了公平性,但由于不能准确地根据用户需求调整传输策略,因此造成了资源的浪费,如图 1 所示。

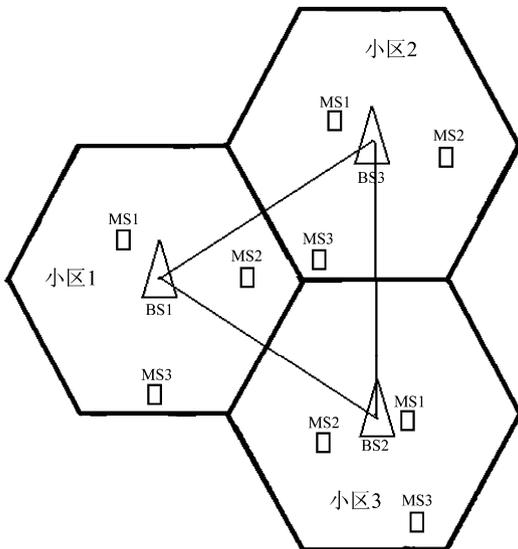


图1 三小区网络用户服务

Fig. 1 Service for users in a 3-cells network

在图1的三小区网络中,每个小区有三个用户。以小区1为例,存在基站BS1和用户MS1、MS2和MS3。由于MS1距离基站BS1最近,因此大多数情况下信道条件最好。传统的方法要么每次调度仅选取MS1作为传输对象,要么采用轮询制度依次服务所有用户。但无论使用哪种调度策略,都会使MS3的平均

传输速率远大于另外两个用户。如果MS3接受的是速率小、允许时延延的低QoS业务,经常性地调度MS1就会造成资源的浪费,此时可以考虑优先调度其他两个用户使一段时间内三个用户调度次数不对称。

为了最大限度地利用资源,本文提出了一种基于用户QoS的协作传输策略(QoS Based User Selection, QBUS),该策略希望利用有限的资源,尽可能地提高小区的用户容量,面向最大容量的调度策略可以建模为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^{N_b} K_i \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} P_i \leq P_{b_i} & i = 1, 2, \dots, N_b \\ I_i \geq I_{r_i} & i = 1, 2, \dots, \sum_{j=1}^{N_b} K_j \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, K_i 表示小区*i*的用户容量, P_i 表示基站*i*的实际消耗功率, I_i 和 I_{r_i} 分别表示用户*i*在基站排队允许时延内实际传输的信息量和需要传输的信息量。

3.2 用户分组与优先级的确定

文献[6]证明,每个被服务用户的平均接受信干噪比与相邻小区内同时被服务用户的大尺度信道响应成递增关系。针对任一用户,其相邻小区内同时被调度用户的大尺度信道响应越大,该用户的平均接受信干噪比越高。因此可以根据几个指定的小区用户与基站之间的大尺度衰落响应作为阈值,确定不同等级用户信道大尺度响应范围,基站同时服务某小区信道等级较高的用户与相邻小区新到等级较低的用户,保证了小区边缘的传输速率。

假设需要将用户的信道条件分为 N_i 个等级,先将小区用户的大尺度信道响应按递减顺序排列(a_1, a_2, \dots, a_k),假设存在 $a_0 > a_1$,则用户*i*信道等级可以表示为

$$\alpha_i = j+1 \quad a_{\lceil \frac{jK}{N_i} \rceil} \leq a_i < a_{\lceil \frac{(j-1)K}{N_i} \rceil} \quad (7)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示取上整数。通过与各信道等级阈值($a_1, a_{\lceil \frac{K}{N_i} \rceil}, \dots, a_{\lceil \frac{jK}{N_i} \rceil}, \dots, a_k$)进行比较,将所有的用户信道均匀地分成不同等级。

假设基站的中央处理单元不但能够获取每个用户的信道信息,而且可以得到每个用户的QoS信息。在此,可以利用需求的平均传输速率 \bar{R}_i 和基站排队最大允许时延 τ 表征不同用户的QoS。根据 \bar{R}_i 和 τ ,计算出每个用户实时需求的传输速率,此速率可以表示为

$$R_i = (\bar{R}_i \tau - I_i) / (\tau - t) \quad (8)$$

其中, t 表示用户在本基站接受服务的时间, I_i 表示在

过去 t 时间内基站向用户传输的信息量。

用户接受调度的迫切程度不仅与其实时需求速率 R_r 有关,而且与其同基站通信的实时速率 R_c 相关: R_c 越大,说明该用户接受调度时可以以较高速率完成数据传输,其接受调度迫切程度越低。因此可以用每个用户的 R_r 与其 R_c 的比值表征用户调度的优先级,此时用户 i 的调度优先级可以表示为

$$\beta_i = \frac{R_{ri}}{R_{ci}} = \frac{\overline{(R_{ri} \tau_i - I_{ii})}}{(\tau_i - t_i) R_{ci}} \quad (9)$$

由于调度用户不同对用户实时传输速率影响很大,用户与不同的其他小区用户共同传输时速率不同,要计算某用户在所有的用户组的实时速率复杂且不现实。因此,可以设计一种用户随机强弱搭配协作传输时能达到的速率 R_n 代替参与协作通信时的实时速率 R_c 进行处理。此处先叙述 R_n 计算方式,对其合理性和有效性的分析将在之后的 3.3 节阐述。用户 i 的随机强弱搭配速率 R_{ni} 可以通过如下方法得到:

① 选定用户 i 后,在本小区本信道等级(假设为 l_i) 随机选出另外 $N_i - 1$ 个用户。如果本小区本信道等级用户数目小于 N_i 个,则寻找本小区相邻信道等级用户直至选出 N_i 个用户。

② 随机选择之前未被选择的一个小区并随机选择信道等级为 $N_i - l_i$ 的 N_i 个用户。如果本小区本信道等级用户数目小于 N_i 个,则寻找本小区相邻信道等级用户直至选出 N_i 个用户。

③ 随机选择之前未被选择的小区并随机选择信道等级(假设为 l_i) 的 N_i 个用户。如果本小区本信道等级用户数目小于 N_i 个,则寻找本小区相邻信道等级用户直至选出 N_i 个用户。

④ 重复②和③,直到所有的 $N_b N_i$ 个用户被选出

⑤ 对其进行预编码后传输,用户 i 所能达到的速率即为随机强弱搭配速率 R_{ni} 。

此时,式(9)可以表示为

$$\beta_i = \frac{R_{ri}}{R_{ni}} = \frac{\overline{(R_{ri} \tau_i - I_{ii})}}{(\tau_i - t_i) R_{ni}} \quad (10)$$

式(10)即为协作调度时实用的调度优先级计算方式。

3.3 协作调度策略

空域满复用可以充分利用多基站多天线提供的空间自由度,因此,在同一时频资源上同时接受服务的用户应与发射端天线数相同以获得最佳的传输性能。在本文设定的条件下,每个基站应该同时服务 N_i 个用户以达到空域满复用。为了最大限度提高小区的用户容量,可以利用之前设定的调度优先级 β ,根据与计算随

机强弱搭配速率 R_n 类似的方法进行调度。QBUS 协作用户调度方法具体步骤如下:

① 基站及中央处理单元获得小区各用户的大尺度信道响应、用户需求的平均传输速率和最大允许时延。

② 每小区用户的信道大尺度信道响应按递减顺序排列(a_1, a_2, \dots, a_k),根据式(7),将用户的信道条件分为 N_i 个等级。

③ 计算每个用户的随机强弱搭配速率 R_n ,同时利用各用户已经传输的信息量,根据式(10)计算用户调度的优先级。

④ 搜寻所有未选择过的小区,找到调度优先级最高的一个用户,选择该小区并找出与之同小区同信道等级(假设为 l_i) 的剩余用户中调度优先级最高的 $N_i - 1$ 个。如果本小区本信道等级用户数目小于 N_i 个,则寻找本小区相邻信道等级用户直至选出 N_i 个用户。

⑤ 在剩余未选择过的小区中随机选择一个,选取等级信道为 $N_i - l_i$ 中调度优先级最高的 N_i 个用户。如果本小区本信道等级用户数目小于 N_i 个,则寻找本小区相邻信道等级用户直至选出 N_i 个用户。

⑥ 重复步骤④和步骤⑤,直到所有的 $N_b N_i$ 个用户被选出。

⑦ 通过基站协作完成对选定 $N_i N_b$ 个用户的联合传输。

可以看出,计算 R_n 策略与 QBUS 调度策略仅存在每个信道等级上具体调度用户的差别。由于每次进行 QBUS 调度时在每个信道等级上选取用户由用户 QoS 决定,并且各用户 QoS 随机分布,每个用户接受调度时可以认为其他用户是随机选择的。当用户数量足够多时,计算 R_n 时随机选取的其他调度用户和进行 QBUS 调度时根据优先级选取的其他调度用户对于该用户的实时传输速率影响一致。因此,利用 R_n 代替 R_c 是合理的。

4 性能分析

考虑某小区中用户 i 的传输性能。由于采用了迫零预编码,用户间的互相干扰完全消除,因此 $\sum_{j \neq i} \mathbf{H}_j \mathbf{T}_j \mathbf{s}_j = 0$,此时式(3)可以变为

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{T}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{n}_i \quad (11)$$

由于采用迫零预编码,根据迫零预编码原理,被选择用户的预编码矩阵为

$$\mathbf{T} = \lambda \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{F} \quad (12)$$

其中, λ 是一个常数,用以保证基站协作通信的功率约

束条件(即式(4)和式(5)) $\mathbf{T} = (\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_i, \dots, \mathbf{T}_{N_b N_t})_{N_b N_t \times N_b N_t}$ 和 $\mathbf{H} = (\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_{N_b N_t})_{N_b N_t \times N_b N_t}^T$ 分别表示被选择用户的预编码矩阵和信道矩阵, $\mathbf{F} = \text{diag}(f_1, f_2, \dots, f_{N_b N_t})$ 表示功率归一化矩阵。

同时由于本文预编码功率控制采用 PUPC, 将 $\|\mathbf{T}_i\|^2 = P_u$ 和 $P_t = N_b N_t P_u$ 代入式(12), 可得

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_b N_t P_u}{\|\mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{F}\|^2}} \quad (13)$$

然后将式(13)代入式(12), 可得预编码矩阵

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{N_b N_t P_u}{\|\mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{F}\|^2}} \mathbf{H}^H (\mathbf{H} \mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{F} \quad (14)$$

假设噪声 \mathbf{n}_i 是均值为 0, 方差为 σ_n^2 的随机高斯白噪声, 那么用户 i 的平均接收 SNR 可以表示为

$$\bar{\gamma}_i = E\left(\frac{|\mathbf{H}_i \mathbf{T}_i|^2}{\sigma_n^2}\right) = \frac{E(|\mathbf{H}_i \mathbf{T}_i|^2)}{\sigma_n^2} \quad (15)$$

由于所有小尺度信道响应相互独立, 因此由式(15)可以得到

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_i &= \frac{E(|\mathbf{H}_i \mathbf{T}_i|^2)}{\sigma_n^2} = \frac{E\left(\sum_{j=1}^{N_b} |a_{ji} \mathbf{B}_{ji} \mathbf{T}_{ji}|^2\right)}{\sigma_n^2} \\ &= \frac{E\left(\sum_{j=1}^{N_b} a_{ji}^2 \sum_{k=1}^{N_t} |b_{jik}|^2 |t_{jik}|^2\right)}{\sigma_n^2} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, b_{jik} 、 t_{jik} 分别表示基站 j 的天线 k 与用户 i 之间的小尺度衰落响应和预编码值, 即有 $\mathbf{B}_{ji} = (t_{ji1}, t_{ji2}, \dots, t_{jiN_t})_{1 \times N_t}$ 和 $\mathbf{T}_{ji} = (t_{ji1}, t_{ji2}, \dots, t_{jiN_t})_{N_t \times 1}^T$ 。信道的小尺度衰落符合瑞利分布, 瑞利分布可以由两个相互独立的零均值高斯随机变量组成实虚两部的复随机变量建立

$$b = b_i + b_q j \quad (17)$$

式中, b_i 和 b_q 为两个独立同分布的随机变量, 且有 $b_i \sim N(0, \frac{\sigma_b^2}{2})$, $b_q \sim N(0, \frac{\sigma_b^2}{2})$ 。记做 $b \sim CN(0, \sigma_b^2)$, 即零均值, 方差为 σ_b^2 的复高斯分布。因此, 式(16)可以重新写为

$$\bar{\gamma}_i = \frac{E\left(\sum_{j=1}^{N_b} a_{ji}^2 \sum_{k=1}^{N_t} |b_{jik}|^2 |t_{jik}|^2\right)}{\sigma_n^2} = \frac{\sigma_b^2 E\left(\sum_{j=1}^{N_b} a_{ji}^2 \sum_{k=1}^{N_t} |t_{jik}|^2\right)}{\sigma_n^2} \quad (18)$$

根据香农公式, 用户 i 被调度时的传输速率可以表示为

$$R_{ci} = B_i \log_2(1 + \bar{\gamma}_i) = B_i \log_2\left[1 + \frac{\sigma_b^2 E\left(\sum_{j=1}^{N_b} a_{ji}^2 \sum_{k=1}^{N_t} |t_{jik}|^2\right)}{\sigma_n^2}\right] \quad (19)$$

因此, 所有被调度用户的平均速率即可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{R}_c &= \frac{R_{c1} + R_{c2} + \dots + R_{cN_b N_t}}{N_b N_t} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{N_b N_t} B_i \log_2\left[1 + \frac{\sigma_b^2 E\left(\sum_{j=1}^{N_b} a_{ji}^2 \sum_{k=1}^{N_t} |t_{jik}|^2\right)}{\sigma_n^2}\right]}{N_b N_t} \end{aligned} \quad (20)$$

假设一个调度传输周期为 Δt , 同时基站相邻两次调度之间切换时间不计, 在一段较长时间(如 $M\Delta t$) 内网络的平均传输速率可以表示为

$$\bar{R} = \frac{\bar{R}_{c1} + \bar{R}_{c2} + \dots + \bar{R}_{cM}}{M\Delta t} \quad (21)$$

其中 $\bar{R} = \bar{R}_{ci}$ 表示第 i 次调度时所有被调度用户的平均速率。

由于 QBUS 调度策略在用户选择方面为最大化小区用户容量考虑了用户需求, 当用户较多时, 不同用户的 QoS 不同, 需求速率和允许时延也不尽相同, 因此在计算小区吞吐率时仅会因为信道大尺度响应的差异化划分优于随机选择用户调度, 劣于传统的调度策略。同时由于不同用户的差异, 在用户选择方面存在较大的随机性, 因此很难定量分析 QBUS 调度策略的吞吐率和小区容量。在此, 本文仅给出 QBUS 的吞吐率计算方法, 具体性能结果通过系统仿真进行分析。

5 系统仿真

下面通过系统级仿真, 分别分析不同协作小区数目(三小区协作和七小区协作)下采用 BLP、IBG、SWG 和 QBUS 等不同调度策略时系统的性能。系统仿真各参数设置如表 1 所示^{[8][9]}, 设置信道小尺度衰落服从瑞利分布, 利用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟系统性能。对于不同仿真, 依次增加用户数量直到用户数量达到小区容量上限。实际系统中, 由于有不同用户接入和断开, 因此小区用户是动态变化的。为简便分析, 在本仿真中, 每次仿真开始后假定用户数量固定, 即没有新增用户的加入和原有用户的退出, 如果系统能在各用户允许时延内传送完需要的信息量, 即认定系统能够容纳该数量的用户。另外, 本仿真仅分析单载波通信系统的系统性能; 在多载波通信系统中, 由于每个子载波调度策略与单载波通信系统类似, 因此采用不同调度策略其系统性能变化趋势与单载波系统基本一致。

表 1 仿真参数设置
Tab.1 Configuration of the simulation parameters

参数	仿真设置
小区半径	200m
基站最大发射功率	46dBm
接收端噪声功率	-95dBm
与基站距离为 d 处路径损耗	$35.3+37.6 \times \log_{10}(d)$
阴影衰落	8dB
用户需求的平均传输速率	10kbps ~ 1000kbps 随机
用户允许的基站排队时延	50ms ~ 50s 随机
时隙长度	0.667ms

5.1 三小区协作时系统性能

三小区协作中,三个小区的三个基站共同为三个小区的所有用户进行服务,分别考虑不同基站天线数目情况下采用不同协作策略的系统性能,当采用 QBUS 策略信道分为两个等级时,三小区系统不同协作策略的系统平均吞吐量、系统的系统容量、用户平均速率分别如图 2、图 3、图 4 所示。

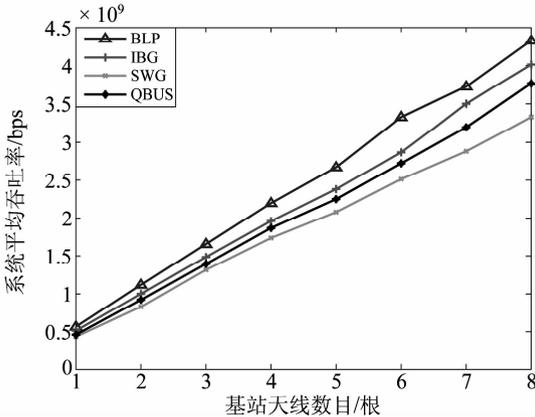


图 2 三小区网络不同基站天线数目下的系统平均吞吐量
Fig.2 System's average throughput for different number of basestation antenna in a 3-cells network

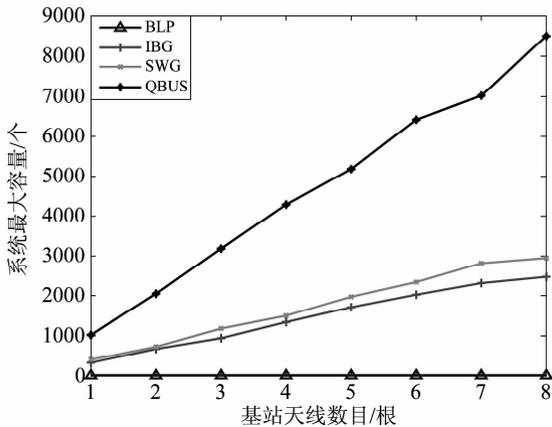


图 3 三小区网络不同基站天线数目下的用户容量
Fig.3 Capacity of users for different number of basestation antenna in a 3-cells network

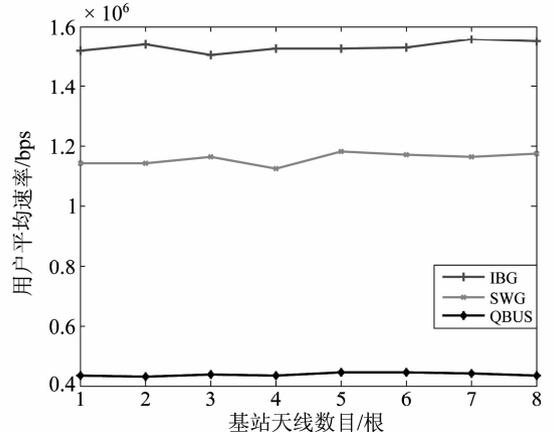


图 4 三小区网络不同基站天线数目下的用户平均速率
Fig.4 Users' average throughput for different number of basestation antenna in a 3-cells network

由图 2 可知,三小区基站协作通信条件下,无论采用哪种调度方法,由于可以达到满复用传输,系统的平均吞吐量随天线数目增多几乎呈现线性增长的趋势。BLP 策略每次调度仅选择信道条件好的用户服务,因此系统平均吞吐量最高。但由于不同策略仅仅是采用的调度方式不同,因此其系统平均吞吐量差别不大。

由图 3 可知,由于系统的平均吞吐量随天线数目增多近似线性增长,系统最大容量也会随天线数目增多基本呈现线性增长。BLP 调度策略没有采用轮询,除了信道条件好的用户外其他用户完全得不到服务,因此系统容量极低。IBG 和 SWG 两种调度策略采用了轮询,提高了系统容量;同时,SWG 通过强弱组合,提高了小区边缘用户平均速率,有利于系统满足小区边缘用户需求,因此大于使用 IBG 策略的系统容量。而 QBUS 策略兼顾了系统速率和用户公平,所以其系统最大容量远大于使用其他调度策略时的系统容量。

由于 BLP 调度策略系统吞吐量最大,但系统容量极低,因此每个用户的传输速率远大于其他调度策略的用户传输速率,在仿真图中不易表示,故仿真图仅表示了剩余三种调度方式的用户平均传输速率。由图 4 可知,IBG 策略比 SWG 策略系统吞吐量略高而用户容量略低,因此用户平均速率稍高。而 QBUS 策略在保证系统吞吐量同时大大提高了系统容量,因此每个用户平均速率最低。

5.2 七小区协作时系统性能

七小区协作中,七个小区的七个基站共同为七个小区的所有用户进行服务,分别考虑不同基站天线数目情况下采用不同协作策略的系统性能,当采用 QBUS 策略信道分为两个等级时,七小区系统不同协作策略

的系统平均吞吐率、系统的系统容量、用户平均速率分别如图5、图6、图7所示。

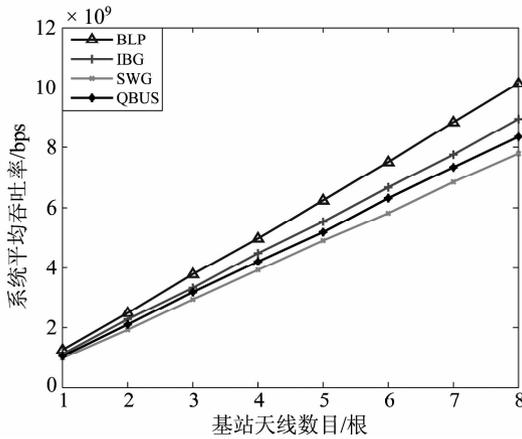


图5 七小区网络不同基站天线数目下的系统平均吞吐率

Fig. 5 System's average throughput for different number of basestation antenna in a 7-cells network

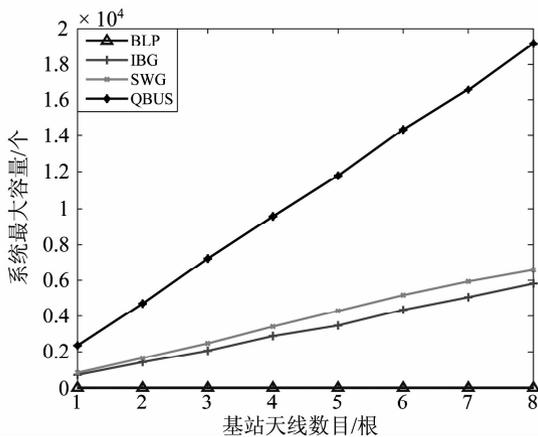


图6 七小区网络不同基站天线数目下的用户容量

Fig. 6 Capacity of users for different number of basestation antenna in a 7-cells network

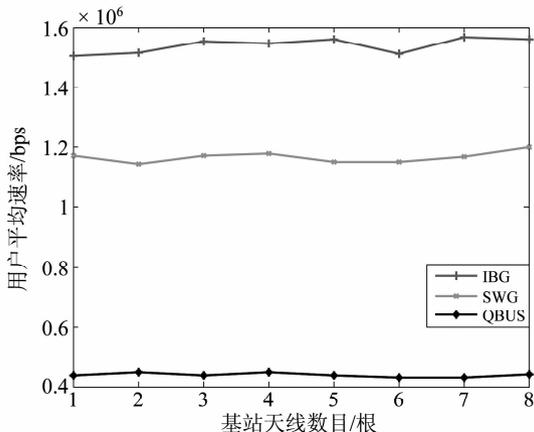


图7 七小区网络不同基站天线数目下的用户平均速率

Fig. 7 Users' average throughput for different number of basestation antenna in a 7-cells Network

由图5、图6、图7可知,七小区协作情况与小三小区协作情况类似。无论采用何种调度策略,系统平均吞吐率和系统最大容量都随基站天线数目的增加呈现近乎线性增长的趋势。BLP、IBG、SWG和QBUS的系统平均吞吐率相差不大,但系统容量依次增高,其用户平均传输速率也依次降低。

5.3 不同信道等级数量下的系统性能

采用QBUS策略进行基站协作通信时,信道等级数量对系统性能也存在影响,以每基站架设两根天线为例,不同信道等级数量对小区容量影响如图8所示。

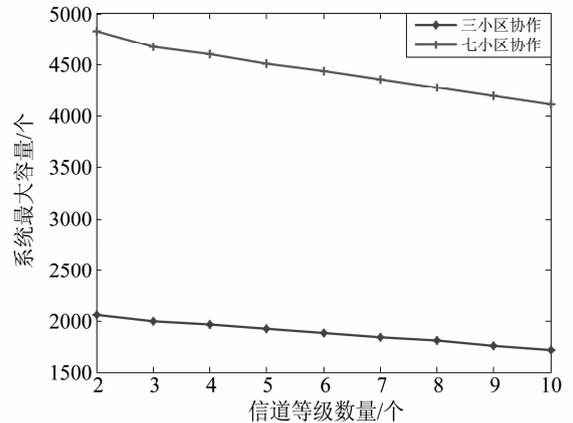


图8 采用QBUS调度策略时不同信道等级数量下用户容量

Fig. 8 Capacity of users for different number of channel levels using QBUS scheduling policy

由图8可知,无论三小区协作还是七小区协作系统,系统最大容量均随信道等级数量的增多而减少。这是由于信道等级数量越多,每个信道等级包括的用户数越少,此时选取的优先级最高的用户是整个系统中最迫切需要被调度的用户的概率越低,因此系统最大容量越低。但随着信道等级数量的增多和每个信道等级包含用户数量的减少,中央处理单元进行用户比较的次数降低,有助于运算次数的降低和系统开销的减少。

6 结语

在基站协作通信过程中,用户调度方法直接决定系统性能,为了尽可能利用有限的资源,本文提出了一种基于不同用户QoS的调度策略,根据不同用户QoS确定用户的调度优先级,避免了资源浪费,并且通过对用户信道进行等级划分,保证了用户的传输速率,同时满足空域复用传输,充分利用了基站协作通信提供的空间自由度。利用系统仿真可以看出,与传统调度策略相比,该策略能在不影响系统吞吐率的情况下,将资源最

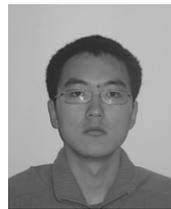
大限度地“按需分配”,大幅提高了系统的用户容量。

参考文献

- [1] FOSCHINI G Y, KARAYALI M K, VALENZUELA R A. Coordinating multiple antenna cellular networks to achieve enormous spectral efficiency [J]. IEE Proc Commun., 2006, vol. 153(4): 548-555.
- [2] 林辉, 焦慧颖, 刘思杨, 许芳丽, 杜滢. LTE-Advanced 关键技术详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012. 205-268.
Lin Hui, Jiao Huiying, Liu Siyang, Xu fangli, Du ying. LTE-Advanced Key Technologies Detailed Analysis [M]. Beijing: POSTS & TELECOM PRESS, 2012. 205-268. (in Chinese)
- [3] G. Dimic, N. D. Sidiropoulos, On downlink beamforming with greedy user selection: performance analysis and a simple new algorithm [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2005, vol. 53: pp. 3857-3868.
- [4] Somekh O., Simeone O., Bar-ness Y., Haimovich A. M., Shamai S. Cooperative multicell zeroforcing beamforming in cellular downlink channels [J]. IEEE Trans. Info. Theory, 2009, vol. 55: pp. 3206-3219.
- [5] Marsch P., Fettweis G.. A framework for optimizing the downlink performance of distributed antenna systems under a constrained backhaul [C]. Proc. 2007 European Wireless Conference (EW 2007), Paris, 2007.
- [6] 孙璨, 杨晨阳. 下行多点协作传输系统中基于大尺度信道的协作用户选择 [J]. 信号处理, 2011, 27(10): 1489-1497.

- SUN Can, Yang Chen-yang. Cooperative User Selection Based on Large Scale Channel Information in Downlink Coordinated Multi-Point Transmission Systems [J]. Signal Processing, 2011, 27(10): 1489-1497. (in Chinese)
- [7] Zhang H., Mehta N. B., Molisch A. F., Zhang J., Dai H.. Asynchronous interference mitigation in cooperative base station system [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, vol. 7: pp. 155-165.
- [8] 3GPP TR 36. 814. --2009, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects [S].
- [9] VICTOR FIROIU, JEAN-YVES LE BOUDEC, DON TOWSLEY, ZHI-LI ZHANG. Theories and Models for Internet Quality of Service [C]. Proceedings of the IEEE, 2002, vol. 90(9): 1565-1591.

作者简介



刘 宇(1988-),男,南京邮电大学通信与信息工程学院,信号与信息处理专业,硕士生在读,主要研究方向为基站协作通信技术。

E-mail: goutoudashi@126.com



郑宝玉(1945-),男,南京邮电大学教授、博士生导师,上海交通大学兼职教授、博士生导师,中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会主任委员,IEEE 南京分会主席。主要研究方向为智能信号处理、通信信号处理和量子信号处理等。

E-mail: zby@njupt.edu.cn