

## 基站协作 OFDMA 系统中面向混合业务的资源分配

贾亦真 陶晓明 陆建华\*  
(清华大学电子工程系 北京 100084)

**摘 要:** 基站协作是多小区 OFDMA 系统中抑制共信道干扰、提高系统容量的有效手段。如何分配无线资源以实现资源与业务最佳匹配是基站协作 OFDMA 系统中的关键问题。现有的研究大多面向单一业务。该文研究了尽力而为(BE)与有速率约束(RC)两类典型业务共存情况下的子载波与功率分配问题,提出了一种两阶段的启发式算法。算法的第 1 阶段仅为 RC 用户分配资源,通过引入子载波价值矩阵,最小化满足 RC 用户速率约束所需的子载波数;第 2 阶段将剩余子载波分配给 BE 用户以最大化他们的和速率。仿真结果表明,所提算法在系统中断概率及 BE 用户和速率两项指标上均优于已有方法。

**关键词:** OFDMA; 基站协作; 混合业务; 资源分配

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2011)08-2008-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2010.01197

## Resource Allocation for Heterogeneous Services in OFDMA Systems with Base Station Cooperation

Jia Yi-zhen Tao Xiao-ming Lu Jian-hua

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Base Station Cooperation (BSC) is considered as a promising way for Co-Channel Interference (CCI) mitigation and system capacity improvement in multicell OFDMA systems. How to allocate radio resource optimally to guarantee the quality of services is a key problem in OFDMA systems with BSC. Previous research mostly focuses on the case of homogenous service. This paper studies subcarrier and power allocation problem in such a system where users with Best Effort (BE) service and those with Rate-Constrained (RC) service coexist. A two-stage heuristic algorithm is proposed. In the first stage, the algorithm allocates resource to only RC users, trying to minimize the number of subcarriers needed to satisfy their rate requirements with the help of value matrix of subcarriers. In the second stage, the remaining subcarriers are assigned optimally to BE users to maximize their sum rate. Simulation results show that the proposed algorithm outperforms the counterparts in both system outage probability and BE users' sum rate.

**Key words:** OFDMA; Base Station Cooperation (BSC); Heterogeneous services; Resource allocation

### 1 引言

新一代移动通信系统(如 LTE, WiMAX)普遍采用正交频分多址(OFDMA)技术,希望频率复用因子尽可能接近 1 以提高频谱效率。降低复用因子加剧了小区间共信道干扰(CCI),使其成为制约系统容量的瓶颈<sup>[1]</sup>。近年来提出的基站协作技术通过共享多小区用户信息,协同调整多个基站的物理层与链路层参数以降低 CCI,理论性能显著优于传统的抑制 CCI 方法<sup>[2]</sup>。为了实现基站协作在理论上的优异性能,需要对系统的无线资源进行优化分配。

现有关于基站协作 OFDMA 系统无线资源分配的研究基本针对单一业务,如大量文献以最大化用户和速率或加权和速率为目标分配资源<sup>[3-8]</sup>,适用于没有严格传输速率要求的尽力而为(Best Effort, BE)业务;有的文献针对有最低传输速率约束的(Rate-Constrained, RC)业务,分别研究了总发射功率最小化<sup>[9]</sup>及中断概率最小化<sup>[10]</sup>的问题,但未涉及 BE 业务。实际系统中两类业务往往共存。针对混合业务,一种自然的想法是赋予 RC 业务用户更大的权重,沿用现有的最大化加权和速率的算法,然而权重的选择难以兼顾两类用户的利益。近年来,人们针对单小区 OFDMA 系统中面向混合业务的资源分配问题已提出一些算法<sup>[11,12]</sup>。这些算法固然可以结合某种频率复用方式逐小区地应用于多小区系统,但由于缺乏控制 CCI 的有效方式,性能不够理

2010-11-04 收到, 2011-05-20 改回

国家重点基础研究发展计划(2007CB310601)和中国博士后科学基金(20100470332)资助课题

\*通信作者: 陆建华 lhh-dee@mail.tsinghua.edu.cn

想。

基于以上分析, 本文针对采用基站协作的多小区 OFDMA 系统, 研究了 RC 业务与 BE 业务共存时的资源分配问题, 提出了一种两阶段的启发式算法。仿真结果表明, 与现有方法相比, 所提算法能同时改善系统中断概率及 BE 用户和速率。

## 2 系统模型与问题描述

如图 1 所示, 考虑一个多小区 OFDMA 系统。每个小区被划分为若干扇区, 相邻小区的相邻扇区组成一个簇。仅限同一簇内的基站协作, 以降低实现复杂度。简明起见, 以下针对一个簇讨论。设簇含有  $B$  个扇区, 扇区  $b$  ( $1 \leq b \leq B$ ) 含有一个单天线基站和  $K_b$  个单天线用户, 其中前  $K_{b,0}$  ( $0 \leq K_{b,0} \leq K_b$ ) 个用户为 RC 用户, 最低传输速率要求为  $R_0$ , 其余用户为 BE 用户。子载波总数为  $M$ , 基站  $b$  在子载波  $m$  ( $1 \leq m \leq M$ ) 上的发射功率为  $P_{b,m}$ 。每个扇区内每个子载波最多分配给一个用户。  $x_{k,b,m}$  为子载波分配变量, 若子载波  $m$  分配给扇区  $b$  中的用户  $k$  则  $x_{k,b,m} = 1$ , 反之  $x_{k,b,m} = 0$ 。令  $G_{i,k,b,m}$  表示基站  $i$  与扇区  $b$  中的用户  $k$  之间的链路在子载波  $m$  上的功率增益(已包含路径损耗), 则该用户在该子载波上的接收信干噪比(SINR)为

$$\text{SINR}_{k,b,m} = \frac{P_{b,m} G_{b,k,b,m}}{N_0 + I_0 + \sum_{i=1, i \neq b}^B P_{i,m} G_{i,k,b,m}} \quad (1)$$

式中  $N_0$  为噪声功率,  $I_0$  为来自其他簇的 CCI 功率,  $\sum_{i=1, i \neq b}^B P_{i,m} G_{i,k,b,m}$  为来自本簇的 CCI 功率。相应地, 该用户在该子载波上的信息传输速率为

$$r_{k,b,m} = x_{k,b,m} \log_2 \left( 1 + \text{SINR}_{k,b,m} / \Gamma \right) \quad (2)$$

其中  $\Gamma = -\ln(5\text{BER})/1.5$  为信噪比差额(SNR gap), BER 为数据的误码率要求。本文的优化目标是在满足 RC 用户最低速率要求基础上最大化 BE 用户和速率, 资源分配问题可描述为

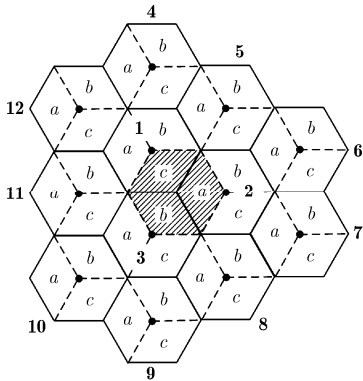


图1 系统模型 (图中数字表示小区编号, 字母表示扇区编号, 实线表示小区边界, 虚线表示簇和扇区边界)

$$\begin{aligned} \max & \sum_{b=1}^B \sum_{k=K_{b,0}+1}^{K_b} \sum_{m=1}^M r_{k,b,m} \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{m=1}^M r_{k,b,m} \geq R_0, 1 \leq b \leq B, 1 \leq k \leq K_{b,0} \\ 0 \leq P_{b,m} \leq P_0, 1 \leq b \leq B, 1 \leq m \leq M \\ \sum_{k=1}^{K_b} x_{k,b,m} \leq 1, 1 \leq b \leq B, 1 \leq m \leq M \\ x_{k,b,m} \in \{0, 1\}, \end{array} \right. \quad (3) \end{aligned}$$

式中优化变量为  $\left\{ x_{k,b,m} \left| \begin{array}{l} 1 \leq b \leq B, 1 \leq k \leq K_b \\ 1 \leq m \leq M \end{array} \right. \right\}$  和

$\left\{ P_{b,m} \left| \begin{array}{l} 1 \leq b \leq B \\ 1 \leq m \leq M \end{array} \right. \right\}$ , 第1项约束表示每个 RC 用户的

传输速率不低于  $R_0$ , 第2项约束表示每个基站在每个子载波上的发射功率不得超过  $P_0$  [13], 第3项约束表示每个扇区内每个子载波最多分配给一个用户。

由于  $x_{k,b,m}$  是 0-1 变量, 故式(3)是一个非凸的组合优化问题。同时, CCI 的存在使得传输速率不再是发射功率的凸函数, 无法应用松弛或对偶分解[11]等方法将式(3)转化为凸优化问题求解。为此, 我们的目标是设计一种性能良好的启发式算法求解该问题。

## 3 问题求解

注意到当系统中只有 BE 用户时, 式(3)中第1个约束条件将不存在, 该式退化为文献[6]中的问题, 可利用此文献中的算法高效求解。为此, 借鉴文献[11]中的思路, 本文提出一种两阶段的启发式算法, 将 RC 用户与 BE 用户分离进行资源分配。算法的第1阶段仅为 RC 用户分配资源, 目标是以最少的子载波满足所有 RC 用户的速率约束(若全部子载波分配完毕也无法满足 RC 用户的速率约束, 则系统出现中断), 第2阶段为 BE 用户分配剩余资源, 最大化他们的和速率。

与单小区系统不同的是, 多小区系统中每个子载波可能被分配给一个用户集合。在算法第1阶段, 可行的用户集合数量为  $Q_{\text{RC}} = \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_j} \prod_{b \in s} K_{b,0}$ , 其中  $S_j$  表示从  $B$  个扇区编号中选择  $j$  个编号的全部组合构成的集合(例如若  $B = 3$ , 则  $S_2 = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 3\}\}$ )。在算法第2阶段, 可行的用户集合数量为  $Q_{\text{BE}} = \sum_{j=1}^B \sum_{s \in S_j} \prod_{b \in s} (K_b - K_{b,0})$ 。为最小化分配给 RC 用户的子载波数, 算法在第1阶段引入了子载波价值矩阵  $\mathbf{V} = [v_{m,q}]_{M \times Q_{\text{RC}}}$ , 其元素  $v_{m,q}$  表示将子载波  $m$  分配给第  $q$  个 RC 用户集合所带来的价值。为降低运

算复杂度,算法中还做了两点近似:(1)功率分配采用二进制形式,即限定 $P_{b,m} \in \{0, P_0\}, (1 \leq b \leq B, 1 \leq m \leq M)$ 。文献[6]指出,当优化目标为最大化和速率时, $B=2$ 时二进制功率分配是最优的, $B>2$ 时二进制功率分配的性能与最优解相差无几。该近似可将式(3)这一混合规划问题转化为纯离散变量优化问题,可行解仅为有限个。特别地,由于 $P_{b,m}=0$ 等价于扇区 $b$ 不使用子载波 $m$ ,该情形已包含在子载波分配结果中,故算法中统一指定 $P_{b,m}=P_0, (1 \leq b \leq B, 1 \leq m \leq M)$ 。(2)RC用户的子载波分配采用贪婪法,即子载波逐个分配给RC用户直至他们的速率约束均被满足或全部子载波分配完毕,每次执行当前价值矩阵中最大的元素对应的分配决策。相比于理论上最优的遍历搜索法,运算复杂度从 $O(Q_{RC}^M)$ 降低为 $O(Q_{RC}M^2)$ 。由于本算法优先为RC用户分配资源,同时为区别于文献[11]中针对单小区的算法,本算法命名为多小区RC用户优先(MRUF)算法。算法的详细流程如下:

(1)初始化资源分配变量:令 $\Omega_{\text{total}} = \{1, 2, \dots, M\}, \Omega_{RC} = \emptyset, \Omega_{BE} = \emptyset, P_{b,m} = P_0, (1 \leq b \leq B, 1 \leq m \leq M), x_{k,b,m} = 0, (1 \leq b \leq B, 1 \leq k \leq K_b, 1 \leq m \leq M)$ ;

(2)计算 $r_{k,b,m,q}^{(RC)}, (1 \leq b \leq B, 1 \leq k \leq K_{b,0}, 1 \leq m \leq M, 1 \leq q \leq Q_{RC})$ ,即当子载波 $m$ 分配给第 $q$ 个RC用户集合时,扇区 $b$ 中的用户 $k$ 在该子载波上的传输速率;

(3)初始化RC用户的累积速率,即令 $r_{k,b}^{(\text{acc})} = 0, (1 \leq b \leq B, 1 \leq k \leq K_{b,0})$ ;

(4)初始化子载波价值矩阵 $\mathbf{V} = [v_{m,q}]_{M \times Q_{RC}}$ ,即令 $v_{m,q} = \sum_{b=1}^B \sum_{k=1}^{K_{b,0}} \min(r_{k,b,m,q}^{(RC)}, R_0)$ ;

(5)设 $(\hat{m}, \hat{q}) = \arg \max_{1 \leq m \leq M, 1 \leq q \leq Q_{RC}} v_{m,q}$ ,则将子载波 $\hat{m}$

分配给第 $\hat{q}$ 个RC用户集合,即对于扇区 $b(1 \leq b \leq B)$ 中的用户 $k(1 \leq k \leq K_{b,0})$ ,若其包含于该集合,则置 $x_{k,b,\hat{m}} = 1$ ,并令

$$v_{\hat{m},q} = 0, (1 \leq q \leq Q_{RC}), r_{k,b}^{(\text{acc})} = r_{k,b}^{(\text{acc})} + r_{k,b,\hat{m},\hat{q}}$$

$$v_{m,q} = \sum_{b=1}^B \sum_{k=1}^{K_{b,0}} \min(r_{k,b,m,q}^{(RC)}, \max(R_0 - r_{k,b}^{(\text{acc})}, 0))$$

$$(1 \leq m \leq M, m \neq \hat{m}, 1 \leq q \leq Q_{RC})$$

$$\Omega_{RC} = \Omega_{RC} \cup \{\hat{m}\}, \Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{total}} - \{\hat{m}\}$$

(6)若 $\forall 1 \leq b \leq B, 1 \leq k \leq K_{b,0}$ ,都有 $r_{k,b}^{(\text{acc})} \geq R_0$ ,则转入下一步,否则若 $\Omega_{\text{total}} = \emptyset$ 则返回“系统中断”,退出算法,否则,转到步骤(5);

(7)令 $\Omega_{BE} = \Omega_{\text{total}}$ ,计算 $r_{k,b,m,q}^{(BE)}, (1 \leq b \leq B, K_{b,0} + 1 \leq k \leq K_b, m \in \Omega_{BE}, 1 \leq q \leq Q_{BE})$ ,即当子载波 $m$ 分

配给第 $q$ 个BE用户集合时,扇区 $b$ 中的用户 $k$ 在该子载波上的传输速率;

(8)对所有 $m \in \Omega_{BE}$ ,依次执行:设 $\hat{q}(m) = \arg \max_{1 \leq q \leq Q_{BE}} \sum_{b=1}^B \sum_{k=K_{b,0}+1}^{K_b} r_{k,b,m,q}$ ,则将子载波 $m$ 分配给第 $\hat{q}(m)$ 个BE用户集合,即对于扇区 $b(1 \leq b \leq B)$ 中的用户 $k(K_{b,0} + 1 \leq k \leq K_b)$ ,若其包含于该集合,则置 $x_{k,b,m} = 1$ 。

MRUF算法的核心是子载波价值矩阵的计算与更新(即步骤(3)与步骤(4))。注意到式(3)对RC用户仅有最小速率约束,因此对RC用户而言,一个子载波的价值取决于它对用户缩小其现有速率与 $R_0$ 之差的贡献,而非用户在该子载波上的速率大小本身。基于此,步骤(3)与步骤(4)中在计算 $v_{m,q}$ 时同时考虑了用户在子载波 $m$ 上的速率以及用户累积速率与 $R_0$ 之差。

#### 4 仿真结果与分析

本小节对MRUF算法的性能进行仿真分析,并与其他算法进行对比。如图1所示,仿真对象为用阴影标出的簇(称为“参考簇”)。该簇由3个扇区组成,分别是扇区1c(即小区1中的扇区c),扇区2a和扇区3b。对于参考簇内的每个用户,都面临9个簇外干扰源(例如位于扇区1c中的用户,簇外干扰源为扇区4c,5a,6a,7a,8a或8b,9b,10b,11b,12c中的基站)。设参考簇内每个扇区有4个用户,其中1个为RC用户,最小速率约束为200 kbps,用户的误码率要求为 $10^{-6}$ 。系统的子载波数为36,子载波间隔为15 kHz,小区半径为300 m,各基站与用户间的信道按照文献[14]中“Urban Micro”环境下的路径损耗模型与多径信道模型随机生成,各用户到所在扇区的基站距离相等,均为200 m。

为评估MRUF算法的性能,本节对两种已有算法也进行了仿真。第1种算法为文献[11]中的次优算法,该算法最初针对单小区OFDMA系统设计,同时也基于RC用户优先的思想,故称之为SRUF算法。SRUF需结合某种的频率复用方式才能应用于多小区系统,本节对频率复用因子为1与3两种情况均进行仿真(以下简称为“全复用”与“正交复用”,仿真曲线分别标记为SRUF\_1与SRUF\_3)。第2种算法为文献[6]中的算法,该算法最初未考虑业务的差异性,仅以最大化和速率为目标优化资源分配。为适应混合业务场景,此处通过对RC用户赋予更大的权重来体现业务的差异性。具体来说,修正后的算法以最大化加权和速率为目标,将载波逐个分配给可行的用户集合,一旦发现有RC用户的速率

达到了  $R_0$  则将该用户的权重置零, 使其不再参与剩余子载波的分配。该算法在仿真中用 WSRM (Weighted Sum Rate Maximization) 表示, 其中 BE 用户的权重为 1, RC 用户的权重为算法的可选参数, 本节对 RC 用户权重为 2, 5 和  $\infty$  分别进行仿真 (仿真曲线分别标记为 WSRM\_2, WSRM\_5 和 WSRM\_ $\infty$ ), 取值为  $\infty$  表示首先以最大化 RC 用户和速率为目标, 仅对 RC 用户分配资源, 直至所有 RC 用户均满足最小速率约束后再对 BE 用户分配资源。

图 2 给出了各种算法的中断概率性能, 图中横轴表示扇区边缘处的平均信噪比, 定义为  $P_0L/N_0$ , 其中  $L$  表示基站到扇区边缘处的路径损耗。从图中看出, MRUF 算法的性能最优。SRUF 算法的性能与频率复用因子有关。在低信噪比区, 制约系统性能的主要因素是噪声, 此时全复用优于正交复用。在高信噪比区, 制约系统性能的主要因素是干扰, 由于全复用将面临严重的 CCI 且 SRUF 本身没有控制 CCI 的措施, 故中断概率曲线很快出现平底; 正交复用本身具有一定的抗 CCI 能力, 性能优于全复用, 但由于限制了每个扇区的可用频谱, 与基于基站协作的 MRUF 相比性能差距明显, 在中断概率为 10% 时 SNR 损失约为 8 dB。WSRM 算法的性能则严重依赖于 RC 用户的权重。不难理解, 中断概率随该权重的增大而减小。当该权重为 2 时, 在典型的信噪比范围内 (小于 20 dB) 中断概率均在 30% 以上; 当该权重为  $\infty$  时, 与 MRUF 相比性能相当, 在中断概率为 10% 时 SNR 损失不到 0.5 dB。

图 3 给出了系统中中断概率不超过 10% 的约束

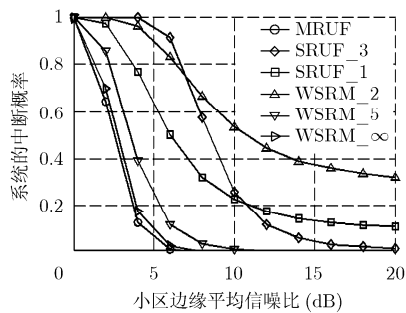


图 2 系统中断概率与信噪比的关系 (“中断”指参考簇内至少有一个 RC 用户的最低速率要求未被满足)

下, 各种算法的 BE 用户和速率性能。由于 SRUF\_1 及 WSRM\_2 在典型的信噪比范围内 (小于 20 dB) 中断概率达不到 10% 的要求, 故本图未画出此两种方案。从图中可见, MRUF 的性能依然最优。基于正交复用的 SRUF 仅在高信噪比区性能接近于 MRUF, 在中低信噪比区其中断概率无法达到要求。当 RC 用户权重足够高时, WSRM 算法虽然在较大的 SNR 范围内能满足中断概率要求, 但 BE 用户的和速率明显低于 MRUF。特别是随着 RC 用户权重增大, BE 用户和速率将降低。这是因为 RC 用户权重越大, 在所有 RC 用户的速率约束满足之前, BE 用户能分配到子载波的可能性越小。相应地, BE 用户能参与分配的子载波就越少, 频率分集增益越小。特别地, 尽管 WSRM\_ $\infty$  与 MRUF 在中断概率性能上相差不多, 但在 BE 用户和速率性能上, MRUF 的相对性能增益约为 80%。

综合分析两项性能指标的仿真结果可知, MRUF 算法与已有算法相比具有明显优势, 可兼顾 RC 用户与 BE 用户的利益。

## 5 结论

本文提出了一种基站协作 OFDMA 系统中面向 BE 与 RC 混合业务的资源分配算法。算法包含两个阶段。第 1 阶段基于贪婪法为 RC 用户分配资源, 通过引入子载波价值矩阵, 最小化满足 RC 用户速率要求所需的子载波数; 第 2 阶段将剩余子载波分配给 BE 用户, 最大化他们的和速率。仿真结果表明, 该算法在系统中中断概率及 BE 用户和速率两项指标上均优于现有方法, 兼顾了两类用户的利益。

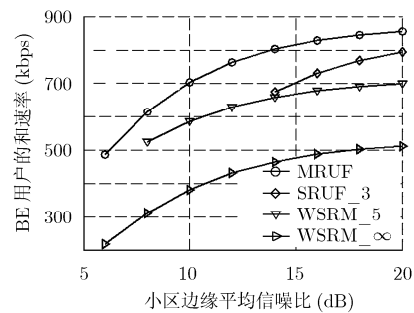


图 3 BE 用户和速率与信噪比的关系 (中断概率不超过 10%)

## 参考文献

- [1] Boudreau G, Panicker J, Guo N, et al. Interference coordination and cancellation for 4G networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(4): 74-81.
- [2] Gesbert D, Hanly S, Huang H, et al. Multi-Cell MIMO cooperative networks: a new look at interference [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(9): 1380-1408.
- [3] Zhang H and Dai H. Cochannel interference mitigation and

- cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2004, 2004(2): 222–235.
- [4] Zhang J, Chen R, Andrews J, *et al.* Networked MIMO with clustered linear precoding [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(4): 1910–1921.
- [5] Gesbert D, Kiani S, Gjendemsjø A, *et al.* Adaptation, coordination, and distributed resource allocation in interference-limited wireless networks [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(12): 2393–2409.
- [6] Gjendemsjø A, Gesbert D, Oien G, *et al.* Binary power control for sum rate maximization over multiple interfering links [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(8): 3164–3173.
- [7] Venturino L, Prasad N, and Wang X. Coordinated scheduling and power allocation in downlink multicell OFDMA networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(6): 2835–2848.
- [8] Yu W, Kwon T, and Shin C. Joint scheduling and dynamic power spectrum optimization for wireless multicell networks [C]. 2010 44th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Princeton, NJ, USA, Mar. 17–19, 2010: 1–6.
- [9] Pischella M and Belore J. Distributed resource allocation for rate-constrained users in multi-cell OFDMA networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(4): 250–252.
- [10] Hanly S, Andrew L, and Thanabalasingham T. Dynamic allocation of subcarriers and transmit powers in an OFDMA cellular network [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(12): 5445–5462.
- [11] Tao M, Liang Y, and Zhang F. Resource allocation for delay differentiated traffic in multiuser OFDM systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(6): 2190–2201.
- [12] Bashar S and Ding Z. Admission control and resource allocation in a heterogeneous OFDMA wireless network [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4200–4210.
- [13] Lee J, Sonalkar R, and Cioffi J. Multiuser bit loading for multicarrier systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(7): 1170–1174.
- [14] Baum D, Hansen J, and Salo J. An interim channel model for beyond-3G systems: extending the 3GPP spatial channel model (SCM) [C]. 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference, Stockholm, Sweden, May 30–June 1, 2005, Vol. 5: 3132–3136.
- 贾亦真: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为协同无线通信、无线资源管理。
- 陶晓明: 女, 1981 年生, 博士后, 研究方向为协同无线通信、绿色通信。
- 陆建华: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线多媒体通信、深空通信、协同无线通信及通信网络等。