

## 时变信道下基于有效容量的 OFDMA 系统资源分配方案

刘 蓓 邱 玲\*

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

**摘要:** 该文给出时变信道下多用户正交频分多址接入(OFDMA)系统的有效容量表达式。为了最大化系统平均有效容量,该文利用泰勒近似得到了渐近可达的多用户调度准则,根据用户移动速度、业务时延敏感特性和有效容量的关系调度用户。仿真结果表明,该方案能够更好地提高移动用户有效容量。

**关键词:** 无线通信; 服务质量(QoS); 有效容量; 时变信道; 资源分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2312-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01409

## Effective Capacity Based Resource Allocation Scheme in OFDMA for Time-varying Channels

Liu Bei Qiu Ling

(Personal Communication Network and Spread Spectrum Laboratory,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** The effective capacity of the multi-user OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) system for time-varying channel is characterized. Then to maximize the system average effective capacity, through the Taylor approximation, an asymptotical optimal user scheduling is proposed, which selects users based on the relationships among the moving speed, traffic profile and the effective capacity. By means of simulations, it is further shown that the proposed scheme can improve the effective capacity of the mobile hosts.

**Key words:** Wireless communication; Quality of Service (QoS); Effective capacity; Time-varying channel; Resource allocation

### 1 引言

随着无线通信的快速发展和高速移动环境应用需求的日益增长,无线通信对高速移动场景的支持越来越强。作为新型宽带无线通信系统的代表,第 3 代长期演进(3 GPP/LTE)系统对高速移动通信的支持达到了 350 km/h。同时,持有移动设备的用户不仅希望随时、随地接入无线网络,而且希望能享受到同固定用户相同的服务质量。在高速移动环境中,用户的移动性会加剧信道的时变性,进而影响到业务的排队时延分布,如何考虑业务队列时延敏感性和信道质量变化为不同业务用户提供更满意的服务是一个热点问题。

无线通信的发展趋势是支持高速率业务的同时为多种业务提供可靠的服务,因此仅仅基于香农容量来评价系统性能是不够的。而考虑到服务质量

(QoS)约束的有效容量在资源管理方面得到了更为广泛的关注<sup>[1-5]</sup>。在多用户调度方面,文献[6]给出了所有调度算法的队列溢出概率衰减速率的上限,并利用李亚普诺夫(Lyapunov)函数得到了 $\alpha$ 算法的最小溢出代价下界的简化表达,然后根据 $\alpha$ 算法的性质设计了混合调度算法,该算法不仅在溢出概率的渐进衰减速率接近最优而且还能在较宽的队列长度范围内将溢出概率限制在很小。然而文献[6]仅仅关注于队列溢出概率,与此同时,文献[7,8]则关注于经过队列溢出或延时丢包后系统支持的有效容量。文献[7]研究了贪婪调度和最长队列准则调度的有效容量性能,但没有给出有效容量最优的调度方案。因此文献[8]利用有效容量分析了两个用户的有效容量域和有效容量最优调度方案,证明了在没有 QoS 约束时,香农容量是有效容量的特例,且最大化香农容量的机会调度是最大化有效容量最优调度的特例。然而在多用户情况下,文献[8]指出有效容量最优的调度问题是不可解的。因此,尚没有研究给出在多用户情况下有效容量最优的调度方法。

针对文献[8],本文将扩展到了多用户

2010-12-23 收到, 2011-07-11 改回

国家科技重大专项(2008ZX03003-004, 2008BAH30B09, 2009ZX03002-001)和国家 973 计划项目(2007CB310602)资助课题

\*通信作者: 邱玲 lqiu@ustc.edu.cn

OFDMA 系统，并给出了多用户 OFDMA 系统有效容量的表达式，进一步采用泰勒近似得到多用户系统在时变信道下有效容量的渐近最优解。从排队论角度揭示了多用户调度算法中，用户移动速度，时延敏感特性和有效容量的关系；基于此提出有效容量渐近可达的多用户调度算法，为时变信道下最大化用户有效容量的无线资源分配方案设计提供依据。仿真结果证明该方法能够更好的提高 OFDMA 系统移动用户有效容量。

## 2 系统模型

系统模型和时序分别如图 1 和图 2 所示。考虑 OFDMA 蜂窝系统单小区下行链路情况。一个下行子帧在频域上分为  $N$  个资源块(RB)。假定每个 RB 内信道是平坦衰落，功率在每个基站的 RB 上均分。应用层将业务的 QoS 特征参数送给媒体接入控制 (MAC)层的调度器，调度器可以得到物理层的信道信息和应用层的 QoS 信息，调度器每子帧工作一次，根据最大化有效容量的准则将 RB 分配给各个用户。

本文假设基站(BS)具有 1 个发送天线。如果基站在 RB  $n$  发送给用户(UE) $k$ 的信号为  $x_{k,n}$ 那么接收的信号  $y_{k,n}$ 为

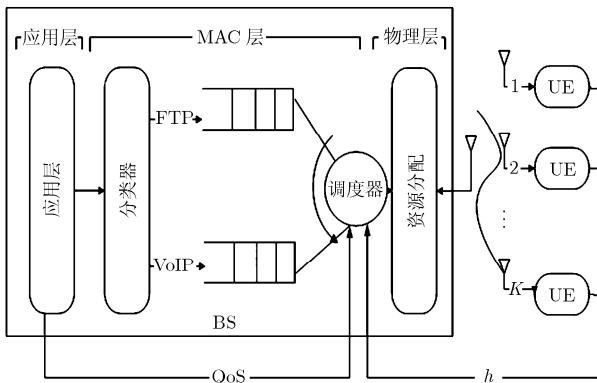


图 1 系统框图

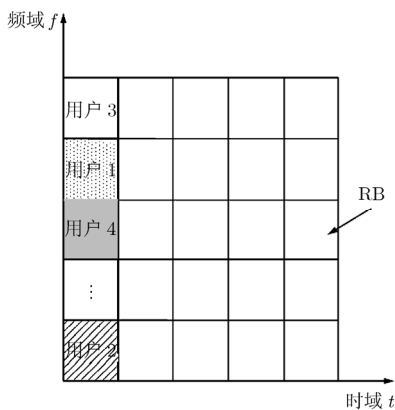


图 2 系统时序图

$$y_{k,n} = h_{k,n}x_{k,n} + w_{k,n}, \quad 1 \leq k \leq K, 1 \leq n \leq N \quad (1)$$

$h_{k,n}$  和  $w_{k,n}$  分别为用户  $k$  在 RB  $n$  的信道增益和噪声。 $h_{k,n}$  和  $w_{k,n}$  服从独立同分布的复高斯分布： $h_{k,n} \sim CN(0,1)$ ,  $w_{k,n} \sim CN(0,\sigma^2)$ ,  $\sigma^2$  为噪声方差。基站发送功率固定为  $E[x_{k,n}x_{k,n}^*]=P$ 。其中  $E[A]$ 表示对变量  $A$  求均值。

用户  $k$  在 RB  $n$  上的速率为

$$R_{k,n} = \lg(1 + Ph_{k,n}/\sigma^2) \quad (2)$$

## 3 有效容量

对于时延敏感业务例如多媒体视频或者 VoIP 等，其关键的 QoS 参数不是频谱效率而是时延，因此考虑 QoS 约束的有效容量比仅考虑数据速率的香农容量变得更为重要。文献[9]提出了排队时延  $D(x)$  可以收敛到一个随机变量  $D(\infty)$ ，即

$$-\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\lg(\Pr\{D(x) > D_{\max}\})}{D_{\max}} = \theta \quad (3)$$

该 QoS 参数  $\theta$  定义了随着时延门限  $D(x)$  趋向于无穷时，超时概率的指数衰减速率。 $\theta$  越大，随时延增加的衰减速率越大，QoS 要求越严格，为了保证更为严格的 QoS 要求，系统可支持的服务速率越小；反之越小 QoS 要求越宽松。时延门限为  $D_{\max}$ ，时延超时会引起丢包，其超时概率为[7]

$$\Pr\{D(x) > D_{\max}\} \approx e^{-\theta D_{\max}} \leq \varepsilon \quad (4)$$

$\varepsilon$  为业务因超时允许的最大丢包率。业务时延要求  $D_{\max}$  越小，时延超时概率越大，因此  $\theta$  随  $D_{\max}$  单调递减，即

$$\theta \propto 1/D_{\max} \quad (5)$$

对于常值输入过程和可变服务过程的排队系统而言，有效容量  $E_C(\theta)$  定义为该服务过程在有 QoS 约束的情况下，可以支持最大的到达速率[10]为

$$E_C(\theta) = -\frac{1}{\theta T} \lg(E[e^{-\theta S[0,T]}]) \quad (6)$$

$T$  是服务过程的持续时间，在此期间提供服务速率为  $S[0, T]$ 。在时变信道中，定义  $T_k$  为用户  $k$  的相干时间，在相干时间内信道即用户的服务速率  $R_{k,n}$  保持不变。那么用户  $k$  的有效容量定义为[8]

$$E_{C_k}(\theta_k) = -\frac{1}{\theta_k T_k} \lg(E[e^{-\theta_k T_k R_{k,n}}]) \quad (7)$$

由式(7)可看到，当没有 QoS 约束，即  $\theta \rightarrow 0$  时，式(7)可简化为香农容量。因此香农容量是有效容量在取消 QoS 约束时的特例。由式(7)还可以看到  $E_{C_k}$  对于速率  $R_{k,n}$  为单调递增的函数，即速率越高的用户有效容量越大。 $E_{C_k}$  对于  $T_k$  为单调递减的函数，

因此相干时间越短,即移动速度越快的用户有效容量越大。 $E_{C_k}$  对于  $\theta_k$  为单调递减的函数,由式(5):  $\theta \propto 1/D_{\max}$  得到  $D_{\max}$  越小,时延要求越严格业务因超时造成的有效容量恶化越快。

#### 4 OFDMA 系统中基于有效容量的资源分配

本文将 OFDMA 系统中最大化系统移动用户有效容量的优化问题表示为

$$\max_z \sum_{k=1}^K E_{C_k} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K z_{k,n} \leq 1, \quad n = 1, \dots, N \quad (9)$$

$$z_{k,n} \in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K; \quad n = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$E_{C_k}(\theta_k) = -\frac{1}{\theta_k T_k} \lg(\mathbb{E}[e^{-\theta_k T_k R_{k,n}}]) \quad (11)$$

其中  $z_{k,n}=1$  表示用户  $k$  使用 RB 块  $n$ , 否则为 0。式(9), 式(10)表示一个 RB 块仅分配给一个用户。式(11)中速率  $R_{k,n}$  由式(2)得到。

由式(7), 将求均值展开得到用户  $k$  的有效容量公式为

$$E_{C_k} = -\frac{1}{\theta_k T_k} \lg\left(\int_0^\infty e^{-\theta_k T_k(R_{k,n})} p(R_{k,n}) dR_{k,n}\right) \quad (12)$$

其中  $p(R_{k,n})$  是  $R_{k,n}$  的概率分布。本文定义  $\Upsilon_k$  为用户  $k$  被调度的概率。当用户  $k$  未被 RB  $n$  调度时  $R_{k,n}=0$ , 当用户被调度时,  $R_{k,n}>0$ 。因此式(12)展开为

$$E_{C_k} = -\frac{1}{\theta_k T_k} \lg\left(e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}=0)}(1-\Upsilon_k) + e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}>0)}(\Upsilon_k)\right) \quad (13)$$

在 OFDMA 系统中, 用户  $k$  在  $N$  个 RB 上被调度的概率为  $\Upsilon_k = \sum_{n=1}^N \frac{z_{k,n}}{N}$ , 将其代入式(13), 可得到 OFDMA 系统有效容量公式为

$$\begin{aligned} E_{C_k} &= -\frac{1}{\theta_k T_k} \lg\left[e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}=0)}\left(1 - \sum_{n=1}^N \frac{z_{k,n}}{N}\right) + e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}>0)}\left(\sum_{n=1}^N \frac{z_{k,n}}{N}\right)\right] \\ &= -\frac{1}{\theta_k T_k} \lg\left[1 + \left(e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}>0)} - 1\right)\left(\sum_{n=1}^N \frac{z_{k,n}}{N}\right)\right] \quad (14) \end{aligned}$$

文献[8]证明了多用户有效容量最大化问题是不可解的, 此时本文采用下面的近似, 将该问题转化为凸优化问题, 得到渐近最优调度的准则:

由于  $\theta_k T_k \rightarrow 0$ , 因此  $e^{-\theta_k T_k(R_{k,n})} \rightarrow 1$ , 将优化目标在 1 处进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} &\max \sum_{k=1}^K -\frac{1}{\theta_k T_k} \lg\left(\int_0^\infty e^{-\theta_k T_k(R_{k,n})} p(R_{k,n}) dR_{k,n}\right) \\ &= \max \sum_{k=1}^K -\frac{1}{\theta_k T_k} \left(\left(\int_0^\infty e^{-\theta_k T_k(R_{k,n})} p(R_{k,n}) dR_{k,n} - 1\right) - \frac{1}{2}\left(\int_0^\infty e^{-\theta_k T_k(R_{k,n})} p(R_{k,n}) dR_{k,n} - 1\right)^2 + \dots\right) \quad (15) \end{aligned}$$

根据式(14), 省略高阶无穷小量近似可得

$$\begin{aligned} &\max \sum_{k \in K_b} -\frac{1}{\theta_k T_k} \left(\int_0^\infty e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}>0)} p(R_{k,n}) dR_{k,n} - 1\right) \\ &= \max \sum_{k \in K_b} -\frac{1}{\theta_k T_k} \left(\frac{\sum_{n=1}^N z_{k,n} (e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}>0)} - 1)}{N}\right) \quad (16) \end{aligned}$$

那么已有的优化目标可以转化为

$$\max \sum_{k=1}^K \frac{1}{\theta_k T_k} \left(\sum_{n=1}^N z_{k,n} (1 - e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}>0)}) / N\right)$$

由于上式是凸函数, 而且定义域为凸集, 因此本文采用凸优化方法, 得到拉格朗日程式为

$$\begin{aligned} L &= \sum_{k=1}^K \frac{1}{\theta_k T_k} \left(\frac{\sum_{n=1}^N z_{k,n} (1 - e^{-\theta_k T_k(R_{k,n}>0)})}{N}\right) \\ &\quad - \sum_{n=1}^N \lambda_n \left(\sum_{k=1}^K z_{k,n} - 1\right) \quad (17) \end{aligned}$$

其中  $\lambda_n$  为限制条件式(9)的拉格朗日乘子。通过对  $L$  求偏导, 得到了最优解  $z_{k,n}^*$  的必要条件为

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial z_{k,n}} &= \frac{1}{\theta_k T_k N} (1 - e^{-\theta_k T_k R_{k,n}}) - \lambda_n \\ &\begin{cases} > 0, & z_{k,n} = 1 \\ = 0, & 0 < z_{k,n} < 1 \end{cases} \quad (18) \end{aligned}$$

即

$$z_{k,n}^* = \begin{cases} 0, & U_{k,n} < \lambda_n \\ 1, & U_{k,n} > \lambda_n \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$U_{k,n} = \frac{1}{\theta_k T_k N} (1 - e^{-\theta_k T_k R_{k,n}}) \quad (20)$$

由于满足限制式(10), 从式(19)看到对于每个 RB  $n$ , 只有最大的  $U_{k,n}$  可以使用该子载波。那么最优解为

$$z_{k',n}^* = 1, z_{k,n}^* = 0, \quad k \neq k'$$

其中  $k' = \arg \max_k U_{k,n}$ 。因此本文利用用户移动速度, 业务服务质量(QoS)特性和有效容量的关系, 给出了 OFDMA 系统中有效容量渐进可达的最优多用

户分配准则为  $k' = \arg \max U_{k,n}$ 。

由该分配准则可以得到以下推论:

**推论 1**  $U_{k,n}$  对于速率  $R_{k,n}$  为单调递增的函数, 因此传输速率越高的用户调度权重越大。

**推论 2**  $U_{k,n}$  对于  $T_k$  为单调递减的函数, 移动速度越高的用户调度权重越大。

**推论 3**  $U_{k,n}$  对于  $\theta_k$  为单调递减的函数, 对时延要求较低的用户调度权重越大, 这是因为时延敏感业务因超时丢包现象严重, 因此经过排队超时丢包后, 对最终上层接收到的有效容量贡献较小, 所以在最大化有效容量的调度算法中, 调度的优先级较低。在实际系统中, 需要保证时延敏感业务的最低数据速率要求, 由于调度目标为最大化系统平均有效容量, 本文暂时忽略了此问题, 但是可以看到, 在满足数据速率要求的基础上, 本文的方法仍然可以揭示有效容量和业务特性, 移动速度, 香农容量之间的关系, 为最大化系统有效容量的调度方法提供依据, 具有启示意义。

**推论 4** 当没有 QoS 约束时, 即  $\theta \rightarrow 0$ , 那么, 式(20)中  $\theta_k T_k N \rightarrow 0, 1 - e^{-\theta_k T_k R_{k,n}} \rightarrow 0$ , 采用洛比达法

$$\text{则, 对分子分母求导得: } U_{k,n} = \left. \frac{\partial (1 - e^{-\theta_k T_k R_{k,n}})}{\partial \theta_k} \right|_{\theta_k=0} \\ \left. \frac{\partial (\theta_k T_k N)}{\partial \theta_k} \right|_{\theta_k=0} = \frac{T_k R_{k,n}}{T_k N} = \frac{R_{k,n}}{N}, \text{ 那么该调度准则}$$

即变为最大化香农容量的机会调度(MaxR)。

根据之前的推导, 调度算法可以根据如下的流程得到:

(1)初始化  $i = 0$ , 将所有 RB 上所有用户的标志位清零, 即  $z_{k,n} = 0, 0 \leq k \leq K, 0 \leq n \leq N$ 。

(2)如果  $i < N, i = i+1$ ; 否则跳转到步骤(3)。对于第  $i$  个 RB, 将所有用户的效用  $U_{k,i}$  排序, 从中选择最大的用户  $k' = \arg \max_k U_{k,i}$ , 占用该 RB, 将标志位置 1, 即  $z_{k',i} = 1$ , 其余用户在 RB  $n$  上的标志位清零, 即  $z_{k,i} = 0, k \neq k'$ 。执行步骤(2)。

(3)算法结束。

## 5 仿真分析

使用 Matlab 作为仿真工具, 考虑单小区 LTE 系统<sup>[1]</sup>的信道带宽为 10 MHz, 载波频率为 2 GHz, 信道采用瑞利信道模型。系统包含共 1024 个子载波, 其中除去左右保护带、直流子载波及导频子载波后, 共剩余 600 个数据子载波, 分为 50 个 RB, 每个 RB 包含 12 个相邻的数据子载波。下行子帧共 14 个数据 OFDM 符号, 1 帧(10 ms)包含 10 个子帧。因此 1 个 RB 为  $12 \times 14 = 168$  个子载波。设定所有

用户的接收信噪比(SNR)为 20 dB, 移动速度为  $v$ 。

定义两种业务, QoS 参数  $\theta_k$  分别为  $0.6\beta$  和  $1.2\beta$ , 分别对应时延要求宽松和时延要求严格业务。 $\beta$  为 QoS 系数。使用两类业务的用户数目分别为 1 和 3。

图 3 是采用最大化香农容量的机会调度(MaxR)的方法、文献[8]中多用户调度次优算法和本文提出的有效容量渐近可达的调度算法 3 种算法的系统平均有效容量性能比较。可以看到, 当没有 QoS 约束时(QoS 系数  $\beta$  趋近于 0), 取消了时延约束, 本文所提方法即变为 MaxR 算法, 和推论 4 的结论一致。随着 QoS 参数增大, 输入到达过程受限, 进而影响到缓冲队列长度和排队时延, 时延敏感业务因时延约束丢包现象增多, 有效容量恶化, 符合推论 3 的结论。而随着移动速度的增大, 相干时间缩短, 有效容量增加, 这和推论 2 的结论一致。有效容量可以很好地揭示业务时延敏感特性, 用户速度和信道信息对上层接收到的有效容量的影响, 而香农容量不能。本文所提有效容量渐近可达调度方法在其调度时考虑了信道质量、业务的时延约束和用户移动速度, 而 MaxR 调度仅仅考虑了信道质量。因此在用户接收到的有效容量上, 本文所提有效容量渐近可达调度具有明显的性能增益。

图 4 是在 QoS 系数  $\beta$  为  $10^{-7}$  到  $10^4$  时, 3 种算法的系统平均香农容量性能比较。由图可以发现 MaxR 算法的性能和 QoS 系数无关。在 QoS 系数较大时, 信道衰落速度变快时, 文献[8]和本文算法香农容量增加。而本文算法在忽略业务 QoS 约束时其性能和 MaxR 算法一致, 这和推论 4 的结论是相符的。在业务 QoS 约束增强时, 本文方法会由于尽量调度不易超时丢包的业务, 因而会在物理层损失一部分香农容量, 但在经过业务时延超时丢包之后在 MAC 层接收到的有效容量上是最大的。

## 6 结束语

在高速移动环境中, 用户的移动性会加剧信道的时变性, 如何考虑业务队列时延敏感性和信道质量最大化系统平均有效容量是一个热点问题。本文给出多用户 OFDMA 系统的有效容量表达, 并采用泰勒近似得到多用户有效容量的渐近最优解。通过利用多用户调度算法中, 用户移动速度, 业务 QoS 特性和有效容量的关系, 提出最大化有效容量的多用户调度算法渐近最优调度准则, 为时变信道下最大化用户有效容量提供依据。仿真结果表明当没有 QoS 约束时, 最大化香农容量的机会调度算法是本

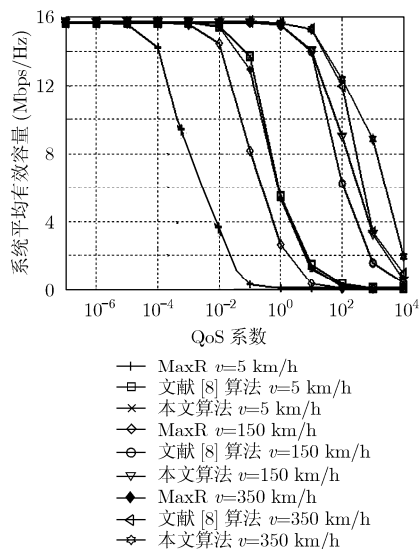


图3 系统平均有效容量

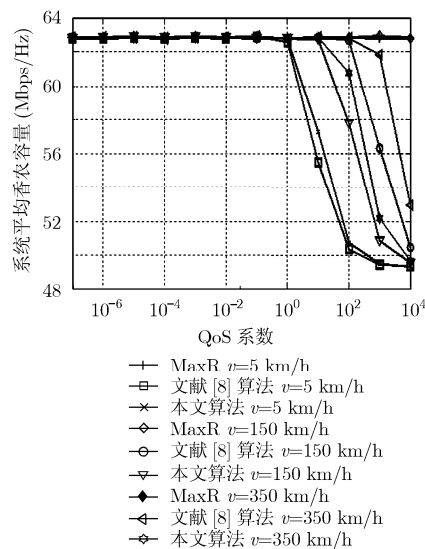


图4 系统平均香农容量

文所提有效容量渐近可达算法的特例。考虑到业务特性时, 本文所提有效容量渐进可达算法和已有算法比较, 显著提高了系统平均有效容量。

### 参考文献

- [1] Gunawardena S and Zhuang Wei-hua. Voice capacity of cognitive radio networks[C]. *IEEE International Conference on Communications*, Cape Town, 2010: 1-5.
- [2] Tang Jia and Zhang Xi. Cross-layer resource allocation over wireless relay networks for quality of service provisioning[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2007, 25(4): 645-656.
- [3] Musavian L, Aïssa S, and Lambotaran S. Effective capacity for interference and delay constrained cognitive radio relay channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(5): 1698-1707.
- [4] Ahn Seong-woo, Wang Hano, Han Seungyoun, et al. The effect of multiplexing users in QoS provisioning scheduling[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2575-2581.
- [5] Liu Ling-jia, Parag P, Tang J, et al. Resource allocation and quality of service evaluation for wireless communication systems using fluid models[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(5): 1767-1777.
- [6] Venkataramanan V J and Lin Xiao-jun. On wireless scheduling algorithms for minimizing the queue-overflow probability[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2010, 18(3): 788-801.
- [7] Shakkottai S. Effective capacity and QoS for wireless scheduling[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(3): 749-761.
- [8] Balasubramanian A and Miller S L. The effective capacity of a time division downlink scheduling system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(1): 73-78.
- [9] Chang Cheng-shang and Thomas J A. Effective bandwidth in high-speed digital networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1995, 13(6): 1091-1100.
- [10] Wu D and Negi R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 2(4): 630-643.
- [11] 3 GPP. E-UTRA Physical Channels and Modulation[M]. TR36.211 V8.8.0, 2009.9.

刘 蓓: 女, 1985年生, 博士生, 研究方向为基于业务特征的无线资源管理。

邱 玲: 女, 1963年生, 博士, 教授, 研究方向为宽带、空时无线通信方法, 包括OFDM技术、空时编解码方法、中继协作系统、MIMO-OFDM信道估计以及自适应均衡、多用户MIMO(MIMO-OFDM)无线通信系统中的收发处理方法和多用户调度算法以及跨层协议和跨层优化算法。