

QoS 保证的无线系统资源分配和调度策略

余官定 张朝阳 仇佩亮

(浙江大学信电系信息与通信工程研究所 杭州 310027)

摘要: 该文研究了无线通信系统保证用户服务质量要求(QoS)的资源分配和调度策略,从信道遍历容量角度出发分析基于Round Robin (RR)和多用户分集/RR思想的调度策略,并提出一种性能更好的部分多用户分集调度策略。该策略将一帧分成若干子帧,子帧的大小以及当前用户集合由无线资源分配算法根据用户的速率要求确定,调度机在每个时刻将各子帧分配给当前用户集合中信道增益最好的用户。仿真结果表明,相比于RR调度和多用户分集/RR调度,部分多用户分集调度能够减少信道占用率并且提高平均信道容量。

关键词: 无线通信; 资源分配; 调度策略; 遍历容量; 多用户分集; 服务质量要求

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0138-05

Resource Allocation and Scheduling Algorithm for Wireless Communication System with QoS Guaranteed

Yu Guan-ding Zhang Zhao-yang Qiu Pei-liang

(Institute of Information and Communication Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Providing Quality of Service (QoS) in wireless communication system is studied in this paper. First, the Round Robin (RR) scheduler and the joint K&H/RR scheduler are analyzed by employing the ergodic capacity of fading channel. Then, a novel Partial Multiuser Diversity Scheduler (PMDS) is proposed. A frame is initially divided into several subframes whose size and current users are determined by the bit rate requirement of each user in the resource allocation module. Each subframe is then assigned to the user with the largest channel gain among its current users in the scheduler. Simulation results show that the proposed PMDS takes fewer channel usage and has a higher channel capacity than both the RR scheduler and joint K&H/RR scheduler.

Key words: Wireless communication; Resource allocation; Scheduler; Ergodic capacity; Multiuser diversity; QoS

1 引言

优化分配有限的无线资源以提高系统的整体容量是任何一个无线通信系统设计面临的问题之一。另一方面,在获得高系统容量的同时,必须保证接入用户的质量要求(QoS),包括所需的平均传输速率,误比特率,分组延时等。然而,无线信道的时变衰落特性,体现在不同时刻信道容量不同以及不同用户的信道容量不同,对设计高性能的无线资源分配和调度策略带来了很大的困难。

文献[1-6]提出了各种无线系统的公平分组调度算法,文献[7,8]从信息论角度分别研究上行和下行衰落信道的传输容量以及最佳调度策略。无论是公平调度算法或者最大速率调度算法,都无法提供对用户QoS要求的保证。文献[9]从信道有效容量^[10]角度出发,提出保证用户QoS的多用户分集/RR调度(K&H/RR)策略,算法将一部分信道用多用户分集策略^[11]进行分配,即在每个时刻让信道增益最大的用户使用这部分信道,剩余的信道则用基于Round Robin^[12](RR)的策

略进行调度,通过选择合适部分的信道用于多用户分集调度来保证用户的QoS要求。

文献[10]中的有效容量是一个跨层的量,与网络层的分组队列以及物理层的信道衰落情况都有关系,非常难以计算。本文从另一个角度——信道的遍历容量(平均容量)出发研究保证QoS的无线资源分配和调度策略,分析基于RR和多用户分集/RR思想的调度策略,并提出一种性能更好的部分多用户分集调度策略(Partial Multiuser Diversity Scheduler, PMDS)。

2 系统模型

图1给出了蜂窝系统下行链路的无线资源分配和调度模型。系统中有 M 个用户,基站要发送给用户的数据包缓存在独立的队列中,用户 m 队列的到达速率是 R_m bit/s。信道通过时分的方式复用,一帧包含一定数目的时隙,帧长度的选取满足:(1)用户在一帧之内信道不发生变化;(2)编码长度足够达到信道的香农容量。在调度策略中,一帧被分成若干子帧,为了分析方便,子帧的长度可以是时隙长度的任意正数倍,这是理想的假设,在实际情况中,子帧的长度只能是整数倍的时隙长度。

2005-05-30收到,2005-09-20改回

国家“863”计划基金(2002AA123044)和国家自然科学基金(60472079)资助课题

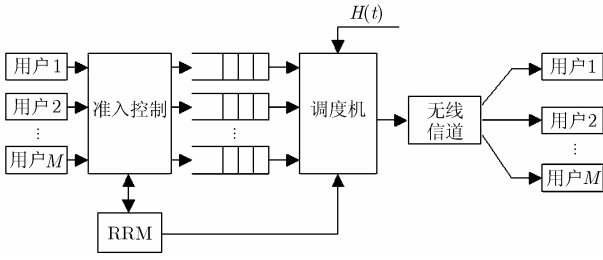


图 1 下行链路无线资源分配和调度模型

假设任何时刻基站通过反馈信道完全知道每个用户的信道增益。在第 t 帧, 用户 m 的信道增益为 $h_m(t)$, 那么将信道分配给用户 m 时的信道容量为

$$C_m(t) = B \log_2 \left(1 + \frac{h_m(t)P}{\sigma^2 B} \right) \quad (\text{bit/s}) \quad (1)$$

式中 P 和 σ^2 分别为发送功率和噪声功率谱密度, B 是信道带宽, 假设每个用户的发射功率和噪声一样。一般认为信道增益是独立、平稳、遍历的随机过程, 在下面的分析中认为用户信道增益满足 Rayleigh 分布, $h_m(t)$ 的概率密度函数(pdf) $f_m(r)$ 和分布函数(cdf) $F_m(R)$ 分别为

$$f_m(r) = \frac{1}{\sigma_m} \exp\left(-\frac{r}{\sigma_m}\right), \quad (0 \leq r < \infty, 0 \leq R < \infty) \quad (2)$$

$$F_m(R) = 1 - \exp\left(-\frac{R}{\sigma_m}\right),$$

其中 σ_m 是 $h_m(t)$ 的均值。

为了保证用户的 QoS, 在一个新用户请求接入时, 基站首先用无线资源分配算法计算满足该用户的 QoS 要求需要的资源, 然后准入控制确定系统能否提供足够的资源, 如果能, 则该用户被准入, 否则不准入, 调度机在每个时刻根据用户分配的资源以及信道增益调度缓存在用户队列中的数据包。

3 无线资源分配和调度策略

时变衰落信道的遍历容量指信道历经所有状态时取得的长期平均信道容量。下面的分析假设每次连接的时间足够长使得信道能够经历大部分的衰落状态, 因此用户得到的平均信道容量近似等于信道的遍历容量, 而无线资源分配至少提供用户速率要求的平均信道容量来保证用户的 QoS。

3.1 基于 RR 思想的调度策略

RR 调度将一帧分成 M 个子帧, 各个子帧的大小为 $\{\beta_m | 0 \leq \beta_m \leq 1, m = 1, 2, \dots, M\}$, 每个帧分别被一个用户使用。如果所有信道都让用户 m 使用, 则它获得的遍历容量为

$$C_m^{RR} = \int_0^\infty B \log_2 \left(1 + \frac{hP}{\sigma^2 B} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_m} \exp\left(-\frac{h}{\sigma_m}\right) dh \quad (3)$$

在系统刚好满足用户速率要求的情况下, 帧大小满足

$$\beta_m = R_m / C_m^{RR} \quad (4)$$

当新用户请求接入时, 准入控制判断总信道占用

$U = \sum_{m=1}^M \beta_m$ 是否不大于 1, 如果是, 表明系统能够保证该用户的速率要求, 否则不准入。基于 RR 思想的调度由于没有使用多用户分集, 每个子帧没有让信道增益最好的用户使用, 所以系统容量不高。

3.2 基于多用户分集/RR 的调度策略

多用户分集调度在每个时刻让信道增益 $h_m(t)$ 最大的用户使用信道, 因此用户 m 的多用户分集遍历容量为

$$C_m^{K\&H} = \int_0^\infty B \log_2 \left(1 + \frac{hP}{\sigma^2 B} \right) \prod_{k \neq m} \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{\sigma_k}\right) \right] \cdot \frac{1}{\sigma_m} \exp\left(-\frac{h}{\sigma_m}\right) dh \quad (5)$$

文献[9]指出在多用户分集调度中, 平均信道增益大的用户得到过多的信道使用时间, 而平均信道增益小的用户得到的信道时间过少, 因此单纯的多用户分集调度不能保证用户的 QoS。多用户分集/RR 调度策略将 γ 部分信道用多用户分集调度, 而 $1-\gamma$ 部分信道做 RR 调度。因此用户 m 得到的平均信道容量包括多用户分集调度得到的容量和 RR 调度得到的容量:

$$R_m = \gamma C_m^{K\&H} + \beta_m C_m^{RR} \quad (6)$$

式中 β_m 为用户 m 获得的 RR 调度子帧大小, C_m^{RR} 由式(3) 确定。在系统刚好满足用户速率要求的情况下, 帧大小满足

$$\beta_m = \left(\frac{R_m - \gamma C_m^{K\&H}}{C_m^{RR}} \right)^+ \quad (7)$$

其中 $(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$ 因此, 总的信道占用:

$$U(\gamma) = \gamma + \sum_{m=1}^M \left(\frac{R_m - \gamma C_m^{K\&H}}{C_m^{RR}} \right)^+ \quad (8)$$

从式(8)知 $U(\gamma)$ 是 γ 的函数, 通过选择合适的 γ 可使 $U(\gamma)$ 最小, 见附录 1。

当新用户请求接入时, 准入控制策略判断总信道占用 $U(\gamma)$ 是否不大于 1, 如果是, 准入, 否则不准入。基于多用户分集/RR 的资源分配和调度过程是: 首先将一帧分成 $M+1$ 个子帧, 其中子帧 $m(m=1, 2, \dots, M)$ 大小为 β_m , 而子帧 $M+1$ 的大小为 γ , 调度机在每个时刻让用户 m 使用子帧 m , 让信道增益最大的用户使用子帧 $M+1$ 。

3.3 部分多用户分集调度策略

在部分多用户分集调度中, 一帧被分成大小为 $\{\beta_i | 0 \leq \beta_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, M\}$ 的 M 个子帧, 但不同于 RR 调度固定让某个用户使用一个子帧, 部分多用户分集调度允许特定的一部分用户使用一个子帧, 称为子帧的当前用户集合, 在每个时刻, 调度策略将各子帧分配给当前用户集合中信道增益最大的用户, 而子帧的大小以及当前用户集合则由无线资源分配策略根据用户的速率要求决定。

令 π 是集合 $E = \{1, 2, \dots, M\}$ 上的一个排列, 规定子帧 i

的当前用户集合为

$$E_i = \{\pi_i, \pi_{i+1}, \dots, \pi_M\} \quad (9)$$

即对于子帧 1, 所有的用户都可以使用, 而子帧 2 只让除用户 π_1 之外的其他用户使用。为了确定每个子帧的大小, 首先计算各用户在部分多用户分集调度中得到的平均信道容量。令 $C_{E_i, m}^{K\&H}$ 表示在用户集合 E_i 中用多用户分集调度时用户 m 得到的平均信道容量:

$$C_{E_i, m}^{K\&H} = \int_0^\infty B \log \left(1 + \frac{hP}{\sigma^2 B} \right) \prod_{k \in E_i} \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{\sigma_k} \right) \right] \cdot \frac{1}{\sigma_m} \exp \left(-\frac{h}{\sigma_m} \right) dh \quad (10)$$

则用户 π_i 的平均信道容量为

$$\sum_{k=1}^i \beta_k C_{E_k, \pi_i}^{K\&H}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

为了保证用户速率要求, $\beta_i, i = 1, 2, \dots, M$ 须满足

$$\sum_{k=1}^i \beta_k C_{E_k, \pi_i}^{K\&H} = R_i, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

上式可以解出所有的 $\{\beta_i, i = 1, 2, \dots, M\}$, 而 π 必须是 $E = \{1, 2, \dots, M\}$ 上使 $\beta_i > 0, \forall i$ 成立的排列, 可以通过下面的算法确定 π 以及 β_i :

无线资源分配算法:

$$(1) \pi_1 = \arg \min_{m \in E_1} \frac{R_m}{C_{E_1, m}^{K\&H}}, \quad \beta_1 = \frac{R_{\pi_1}}{C_{E_1, \pi_1}^{K\&H}};$$

(2) for $i=2$ to M

$$\pi_i = \arg \min_{m \in E_i} \frac{R_m - \sum_{j=1}^{i-1} \beta_j C_{E_j, m}^{K\&H}}{C_{E_i, m}^{K\&H}}, \quad \beta_i = \frac{R_{\pi(i)} - \sum_{j=1}^{i-1} \beta_j C_{E_j, \pi_i}^{K\&H}}{C_{E_i, \pi_i}^{K\&H}}.$$

附录 2 证明了本算法解出的 $\{\beta_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ 肯定大于 0, 因此是一种可行的资源分配。

部分多用户分集调度和无线资源分配策略过程:

资源分配 将一帧分成 M 个子帧, 子帧 i 的大小是 $\beta_i, i = 1, 2, \dots, M$, 由式(9)确定子帧 i 的当前用户集合 E_i 。

准入控制 判断 $U = \sum_{i=1}^M \beta_i$ 是否不大于 1, 如果是, 准入控制通过, 否则不通过。

分组调度 在任何时刻, 将子帧 i 分配给 E_i 中信道增益最大的用户, $i = 1, 2, \dots, M$ 。

4 仿真结果

仿真环境是单蜂窝下行链路, 用户的位置和速率要求随机分布, 各用户的信道增益平均值与用户与基站之间距离的 4 次方成反比, 本文以系统信道带宽 $B=1\text{kHz}$ 为例, 对于其它的带宽值, 将会有类似的仿真结果。仿真实验比较 3 个算法——RR 的调度、多用户分集/RR 调度和部分多用户分集调度的信道使用率和平均信道容量。

图 2 是不同系统负荷下的信道使用概率(U), 图中 SNR 指的是蜂窝边缘处的平均信噪比。对于 RR 调度和部分多用户分集调度, 信道使用概率 $U = \sum_{m=1}^M \beta_m$, 对于多用户分集/RR 调度信道使用概率为式(8)中 $U(\gamma)$ 的最小值。系统总负荷为所有用户的速率要求之和:

$$\text{系统总负荷(offered load)} = \sum_{m=1}^M R_m \quad (13)$$

从图 2 中看到, 在相同的系统总负荷下, 部分多用户分集调度占用的信道最少, 多用户分集/RR 调度略少于 RR 调度。信道占用率小说明满足一定用户的速率要求需要的信道资源少, 意味着系统可以容纳更多的用户。系统最大负荷为信道全部被使用时的系统负荷, 图 2 中 3 个调度算法的系统最大负荷分别为 0.75, 0.8 和 1.2 左右(单位是 k bit/s)。

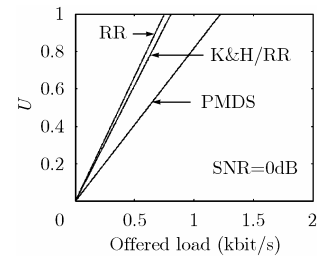


图 2 信道使用率与系统负荷关系曲线

图 3 给出平均信道容量与信噪比的关系, 图中用户数目为 10, SNR 指的是蜂窝边缘处的平均信噪比。部分多用户分集调度具有较高的平均信道容量, 这是因为算法将每一个子帧让该子帧当前用户集合中信道增益最大的用户使用; 多用户分集/RR 调度的平均信道容量略高于 RR 调度, 也是因为多用户分集/RR 调度中有 γ 部分的信道是分配给信道增益最大的用户; 而 RR 调度每个时刻用户不管信道增益的大小, 都占用一定部分的信道, 所以平均信道容量相比其它运用了多用户分集思想的算法小。信道容量的大小影响系统容量的大小, 在用户速率要求相同的情况下, 信道容量越大, 则系统能容纳的用户数目也越多。

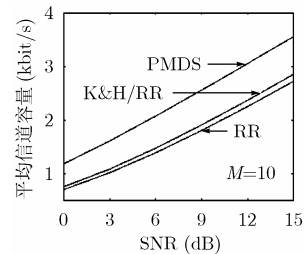


图 3 平均信道容量与信噪比关系曲线

图 4 是不同用户数目下的平均信道容量。从图中看出, 随着用户数目的增大, RR 调度的平均信道容量基本不变, 多用户分集/RR 调度的平均信道容量则有较小的增幅, 而部分多用户分集调度的平均信道容量随着用户数目增大的增幅比较明显, 这是由于在多用户分集中增益最大的用户使

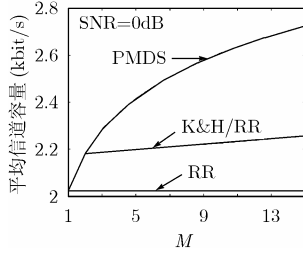


图 4 平均信道容量随用户变化曲线

用信道, 随着用户数目的增大, 信道会被具有更大增益的用户使用, 即多用户分集带来的信道容量增益随用户数目的增加而增大。多用户分集/RR 调度只有少部分的信道用于多用户分集, 其平均信道容量基本上接近 RR 调度, 而部分多用户分集调度所有的子帧都用多用户分集调度, 因此平均信道容量随用户数目的增加明显增大。

5 结束语

随着多媒体业务在未来无线通信系统中的应用越来越广泛, 如何在系统对业务质量的保证基础上充分利用有限的无线频谱资源已经成为一个迫切需要解决的问题。本文从信道的遍历容量出发, 分析基于 RR 思想、多用户分集/RR 思想的保证用户 QoS 要求的无线资源分配和调度策略并提出基于多用户分集的部分多用户分集调度。仿真结果表明, 部分多用户分集调度相比于其它两种调度策略, 具有较高的信道利用率和系统容量。

附录 1 $U(\gamma)$ 最小值的求解

设 π 是使式(A-1)成立的一个 $E = \{1, 2, \dots, M\}$ 上的排列:

$$\frac{R_{\pi(1)}}{C_{\pi(1)}^{K\&H}} \leq \frac{R_{\pi(2)}}{C_{\pi(2)}^{K\&H}} \leq \dots \leq \frac{R_{\pi(M)}}{C_{\pi(M)}^{K\&H}} \quad (\text{A-1})$$

则由式(7)和式(8), $U(\gamma)$ 是如下的一个分段函数:

$$U(\gamma) = \begin{cases} \gamma + \sum_{j=1}^M \frac{R_{\pi(j)} - \gamma C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}}, & 0 \leq \gamma < \frac{R_{\pi(1)}}{C_{\pi(1)}^{K\&H}} \\ \gamma + \sum_{j=i}^M \frac{R_{\pi(j)} - \gamma C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}}, & \frac{R_{\pi(i-1)}}{C_{\pi(i-1)}^{K\&H}} \leq \gamma < \frac{R_{\pi(i)}}{C_{\pi(i)}^{K\&H}}, \\ & i \geq 2 \\ \gamma, & \gamma \geq \frac{R_{\pi(M)}}{C_{\pi(M)}^{K\&H}} \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

将 $U(\gamma)$ 对 γ 求导:

$$U'(\gamma) = \begin{cases} 1 - \sum_{j=1}^M \frac{C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}}, & 0 \leq \gamma < \frac{R_{\pi(1)}}{C_{\pi(1)}^{K\&H}} \\ 1 - \sum_{j=i}^M \frac{C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}}, & \frac{R_{\pi(i-1)}}{C_{\pi(i-1)}^{K\&H}} \leq \gamma < \frac{R_{\pi(i)}}{C_{\pi(i)}^{K\&H}}, \quad i \geq 2 \quad (\text{A-3}) \\ 1, & \gamma \geq \frac{R_{\pi(M)}}{C_{\pi(M)}^{K\&H}} \end{cases}$$

注意到

$$1 - \sum_{j=1}^M \frac{C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}} \leq 1 - \frac{\sum_{j=1}^M C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_m^{RR}} < 0, \quad (m^* = \arg \max_m C_m^{RR}),$$

这是由于多用户分集调度得到的平均信道容量大于 RR 调度的信道容量, 即 $\sum_{j=1}^M C_{\pi(j)}^{K\&H} > C_m^{RR}, \forall m$; 而随着 i 从 1 增大

到 M , $1 - \sum_{j=i}^M \frac{C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}}$ 从负数变成正数, 直到 $i = M$ 时,

$$1 - \frac{C_{\pi(M)}^{K\&H}}{C_{\pi(M)}^{RR}} > 0, \text{ 所以 } U(\gamma) \text{ 的最小值发生在 } \gamma = \frac{R_{\pi(i^*-1)}}{C_{\pi(i^*-1)}^{K\&H}}, \text{ 其}$$

中 i^* 是使得 $1 - \sum_{j=i}^M \frac{C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}} > 0$ 成立的最小的 i 。而 $U(\gamma)$ 的最

小值 U_{\min}

$$U_{\min} = U\left(\frac{R_{\pi(i^*-1)}}{C_{\pi(i^*-1)}^{K\&H}}\right) = \frac{R_{\pi(i^*-1)}}{C_{\pi(i^*-1)}^{K\&H}} + \sum_{j=i^*}^M \frac{R_{\pi(j)} - \frac{R_{\pi(i^*-1)}}{C_{\pi(i^*-1)}^{K\&H}} C_{\pi(j)}^{K\&H}}{C_{\pi(j)}^{RR}} \quad (\text{A-4})$$

附录 2 无线资源分配算法合理性证明

$$\text{显然 } \beta_1 > 0; \quad \therefore \beta_i = \min_{m \in E_i} \frac{R_m - \sum_{j=1}^{i-1} \beta_j C_{E_j, m}^{K\&H}}{C_{E_i, m}^{K\&H}},$$

$$\therefore R_m - \sum_{j=1}^{i-1} \beta_j C_{E_j, m}^{K\&H} \geq \beta_i C_{E_i, m}^{K\&H}, \forall m \in E_{i+1},$$

$$\therefore \beta_{i+1} = \min_{m \in E_{i+1}} \frac{R_m - \sum_{j=1}^i \beta_j C_{E_j, m}^{K\&H}}{C_{E_{i+1}, m}^{K\&H}} \geq 0. \quad \text{证毕}$$

参考文献

- [1] Ng T, Stoica I, and Zhang H. Packet fair queueing algorithms for wireless networks with location-dependent errors [A]. IEEE Infocom 1998 [C]. San Francisco, USA, 1998: 1103-1111.
- [2] Ramanathan P and Agrawal P. Adapting packet fair queueing algorithms to wireless networks [A]. ACM Mobicom 1998 [C]. Dallas, Texas, 1998: 1-9.
- [3] Vaduvur B, Lu Songwu, and Thyagarajan N. Fair queuing in wireless networks: issues and approaches [J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(1): 44-53.
- [4] Lu Songwu, Vaduvur B, and Srikant R. Fair scheduling in wireless packet networks [J]. *IEEE Trans. on Networking*, 1999, 7(4): 473-489.
- [5] Liu X, Chong E, and Shro N. Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks [J]. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 2001,

- 19(10): 2053–2064.
- [6] Park D, Seo H, Kwon H, and Lee B G. A new wireless packet scheduling algorithm based on the CDF of user transmission rates [A]. IEEE GLOBECOM'2003 [C], San Francisco, USA, 2003: 528–532.
- [7] Tse D N C and Hanly S V. Multiaccess fading channels—Part I: Polymatroid structure, optimal resource allocation and throughput capacities [J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1998, 44(7): 2796–2815.
- [8] Li Lifang and Goldsmith A J. Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels—Part I: Ergodic capacity [J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2001, 47(3): 1083–1102.
- [9] Wu DaPeng and Negi R. Technical report: Utilizing multiuser diversity for efficient support of quality of service over a fading channel [EB/OL], <http://www-2.cs.cmu.edu/~dpwu/publications.html>, 2002.
- [10] Wu DaPeng and Negi R. Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service [J]. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2003, 2(4): 630–643.
- [11] Knopp R and Humblet P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications [A]. IEEE ICC 1995 [C], Seattle, USA, 1995: 331–335.
- [12] Hahne E L. Round robin scheduling for fair flow control in data communications networks [J]. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1991, 9 (7): 1024–1039.
- 余官定: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为多用户信息论、无线资源优化分配.
- 张朝阳: 男, 1973 年生, 教授, 研究方向为宽带接入、无线通信、无线网络.
- 仇佩亮: 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息论与编码、无线数字通信.