

基于满意度准则采用混合波束成型预编码的调度方法

刘涛 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: 为了满足未来无线宽带网络中多种服务质量(QoS)要求业务并存的需求, 该文提出一种多天线下行系统中结合混合波束成型预编码技术基于满意度的调度方法。该调度方法联合考虑用户的 QoS 要求及其信道质量, 灵活地使用随机波束成型和迫零波束成型预编码技术, 并通过惩罚机制避免特定用户占用超出其需求的带宽, 更有效地为用户分配令其满意的资源, 使各种 QoS 要求的用户获得满意的服务。仿真结果证明, 与现有的方法相比, 该文提出的方法在保证用户服务质量的同时, 能更好地利用系统资源。

关键词: 无线通信; 服务质量; 满意度准则; 多用户调度; 随机波束成型; 迫零波束成型

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0013-05

A Satisfaction Based Scheduling Scheme with Hybrid Beamforming Precoding

Liu Tao Qiu Ling

(PCN&SS Lab, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: To meet the requirements of services with various quality of service in future broadband wireless communication systems, a satisfaction based scheduling scheme with hybrid beamforming strategy in multi-antenna downlink system is presented in this paper. This scheduler schedules users with joint considerations of users' QoS requirements and channel quality. The Random beamforming and the Zero-forcing beamforming transmission schemes are selected according to satisfaction criterion. Punishment mechanism is proposed here to avoid users occupying too much more resource than their requirements. Simulation results show that the proposed strategy can guarantee users' QoS requirements and exploit radio resource utilization better than that of the existed scheduling methods.

Key words: Wireless communication; Quality of Service (QoS); Satisfaction criterion; Multiuser scheduling; Random beamforming; Zero-forcing beamforming

1 引言

在无线系统中, 常见的多用户调度方法可以大体分为两大类, 智能调度和盲调度^[1]。前者需要基于用户的信道质量反馈信息, 包括最大载波干扰比(MAX-CI)调度, 正比公平(PF)调度, 快速公平吞吐(FFTH)调度^[1], 加权公平队列(WFQ)等; 后者则基于某种用户的平均性能参数或者不考虑任何用户性能参数, 包括轮询(RR)调度^[2], 最大最小公平(MMF)调度^[3], 最先超时优先(EDF)等^[4]。

上述调度方法, 目标是最大化系统吞吐率, 或最大化系统公平度, 或者两者的折衷。对于不同 QoS 需求的业务, 通过调度获得相同的带宽可能对应着不同的满意程度。为此, 本文引入业务满意度和系统平均满意度, 并提出基于最大化系统平均满意度的多用户调度方法。该方法联合考虑业务的 QoS 需求和用户的通信链路质量, 灵活使用随机波束成型和迫零波束成型预编码技术, 并通过与惩罚机制结合, 既保证

业务获得满意的服务, 又能避免其占用超出需求的带宽, 从而充分有效地利用频谱资源, 提高系统性能。

脏纸编码(DPC)是多用户多天线下行系统中容量可达策略, 但其高复杂度使得其难以实用; 波束成型是一种低复杂度的线性预编码技术, 它在保持较好性能的同时易于实现^[5,6], 常见的波束成型技术有随机波束成型技术(RBF)^[7,8]和迫零波束成型技术(ZFBE)^[6]。采用随机波束成型技术, 调度时仅需要用户反馈其在各波束上的等效信道增益, 而迫零波束成型技术需要知道所有用户的信道矢量, 反馈量远大于随机波束成型技术。但随机波束成型技术的吞吐率较迫零波束成型技术有明显的损失, 特别是在用户数目较少的时候。

为此, 本文结合满意度调度准则, 将随机波束成型与迫零波束成型混合使用, 在满足所有用户 QoS 需求的同时, 有效减少用户反馈开销并保持较高的系统吞吐率。

2 系统模型

系统中基站具有 N_t 个发送天线, 发射总功率为 P , 移动台具有 1 根接收天线; 调度器可以得到物理层的信道信息(包括用户的等效信噪比或某个用户的信道矢量)和应用层的

2007-06-22 收到, 2007-12-10 改回

国家自然科学基金重大项目(60496314)和国家 863 计划项目(2006AA01Z266)资助课题

QoS 信息。假设每个用户只有一种业务，调度器通过业务特征识别，将应用层的用户业务 QoS 参数映射为调度器需要的满意度权系数 w_k ，并计算和周期性地更新该权系数。根据发送端采用随机波束成型或迫零波束成型预编码方案，基站在每个时隙会得到所有用户反馈的等效信噪比或某个用户的反馈信道矢量。满意度权系数每一帧更新一次，调度器每时隙工作一次。调度器每次调度完成后，立即更新获得调度的用户的满意度权系数 w_k ，并将发送波束矢量告知物理层。由于满意度权系数更新周期大于调度器调度周期，当用户在一帧中已经获得令其满意的带宽，并且超出一个门限 Δ 时，在该帧中的剩余几个时隙中该用户将不再获得调度，由此实现了对获得超出 QoS 带宽需求用户的惩罚，避免了某些用户长期占用过多系统资源，提高了系统资源利用率。

2.1 波束成型技术

MISO 随机波束成型系统用户 k 等效接收信噪比为

$$r_k = \|\mathbf{h}_k \mathbf{b}_k\|^2 / \left(M_t / \rho + \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_k \mathbf{b}_j \right) \quad (1)$$

其中 M_t 为发送子流数， \mathbf{b}_k 为波束成型矢量。 \mathbf{h}_k 是用户 k 的信道矢量， ρ 为信噪比。MISO 迫零波束成型系统用户的接收信号与随机波束成型相同，仅波束成型矢量的构造方法不同，这也使得迫零波束成型和随机波束成型的混合使用成为可能。

2.2 服务质量(QoS)

对于不同的应用，不同业务的 QoS 可分为两个大类，保证(guaranteed)和尽力传输(best effort)^[4]。对于保证类业务，系统提供统计意义上的高于某个值的吞吐量及低于某个门限的时延，对于尽力传输类业务，系统不提供任何服务承诺，仅“尽力”去服务。用户的 QoS 特征可以用最大业务速率，最小业务速率，最大传输时延等参数描述^[9]。典型业务包括恒定速率(CBR)，实时可变速率(RT-VBR)，非实时可变速率(NRT-VBR)，不指定速率(UBR)等。

3 多天线下行系统中结合混合波束成型预编码技术基于满意度的调度

3.1 满意度的定义

本文引入描述业务 QoS 需求的满意度定义。定义用户对业务的满意度 $s_k \in [0,1]$ ，如果业务的速率和传输时延需求都得到满足，则 $s_k=1$ ；反之如果业务的最小传输速率或者传输时延需求未得到满足，则 $s_k=0$ ；如果业务获得的传输速率处于最大和最小速率之间，同时传输时延小于最大时延，则应该用一个最小速率和最大速率的函数来描述此时的取值，此时采用一个幂次函数来描述满意度的取值，得到满意度的如下表达式：

$$s_k = \begin{cases} 1, & \bar{r}_k \geq r_{k,\text{tar}}, \bar{d}_k \leq d_{k,\text{tar}} \\ ((\bar{r}_k - r_{k,\text{min}}) / (r_{k,\text{tar}} - r_{k,\text{min}}))^\phi, & r_{k,\text{min}} \leq \bar{r}_k \leq r_{k,\text{tar}}, \bar{d}_k < d_{k,\text{tar}} \\ 0, & \bar{r}_k < r_{k,\text{min}} \text{ 或 } \bar{d}_k > d_{k,\text{tar}} \end{cases} \quad (2)$$

其中 k 表示用户编号， \bar{r}_k 表示该业务获得的平均速率， $r_{k,\text{tar}}$ 表示该业务的最大目标速率， $r_{k,\text{min}}$ 表示业务的最低保证速率。 \bar{d}_k 表示该业务获得调度的平均时延。 $d_{k,\text{tar}}$ 表示该业务的目标时延。对不同的业务，式(2)中参数的取值不同，以两种典型的业务为例，即实时视频会议和 FTP 业务，它们分别代表了保证型和尽力传输型两类业务。FTP 业务用户的最低保证速率为 0，可令式(2)中的 $r_{k,\text{min}}=0$ 。对于视频会议类的实时变速率业务，其对目标速率和最低保证速率^[9]都有要求，式(2)中的第 2 种情况下满意度的定义超出了本文的范围，在此不妨设其中 $\phi=2$ 。设某个实时变速率业务的 $r_{k,\text{tar}}=1\text{Mbps}$ ， $r_{k,\text{min}}=0.5\text{Mbps}$ ， $d_{k,\text{tar}}=60\text{ms}$ ，则根据式(2)得出的满意度与平均速率和平均时延的关系如图 1 所示。

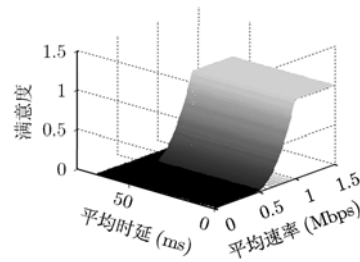


图 1 满意度与平均速率及平均时延的关系

3.2 调度方法

基于满意度的调度方法(简称 SBS)可以归结为最大化系统平均满意度的问题：

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^I (U_i / K_i) \sum_{k=1}^{K_i} s_{k,i} \right\} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{K_i} q_{k,i} = M_t, \forall n \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I U_i = 1 \quad (5)$$

式(4)中 n 是时隙号， T 是系统运行时间内时隙的集合， M_t 是系统中并行发射的子流数。式(3)的优化目标中， U_i 是第 i 种业务的权重， K_i 是第 i 种业务用户的数目， I 是业务类型数，在特定的系统中通过准入控制和优先级设定 U_i 和 K_i 可以视为常数， $s_{k,i}$ 即业务满意度，其值与业务获得的平均速率和调度时延有关。式(3)中 $\sum_{i=1}^I U_i / K_i \sum_{k=1}^{K_i} s_{k,i}$ 即系统平均满意度。

为了在满足用户 QoS 的同时，尽可能减少因调度 QoS 需求高而链路性能差的用户带来的系统吞吐率的损失，在调度器选择用户时还应考虑用户当前的信道状况。同时，在调度中，式(2)的平均时延对满意度的影响是一个阶跃函数，即当平均时延达到最大时延时，使满意度为 0；而平均传输时延小于最大时延时，则对满意度没有影响。由于式(2)中的平均时延并不能严格地反映出用户的瞬时时延，调度时如依式(2)中的满意度，很难严格保证用户的时延需求，为此，需对上述满意度进行修正。考虑这样一个函数，用户的平均时延越接近最大时延，该值越小，且越接近最大时延该值减小的

速率越快, 考虑到满意度是一个 0 到 1 间的值, 该函数可以为 $(1 - (\bar{d}_k / d_k)^\psi)$ 。其中 \bar{d}_k 为用户的平均调度时延, d_k 为用户的最大时延需求。

为了避免用户占用超出其需求的带宽, 需引入惩罚机制, 即当用户的平均速率超出目标速率后, 在保证时延的情况下, 不再调度该用户。考虑以上所述的需求, 引入广义满意度 s'_k , 在时延和速率要求都满足时, 令广义满意度为平均速率与目标速率的比, 即广义满意度会出现大于 1 的情况。当广义满意度大于 1 时, 表明该业务获得了超出需求的带宽, 调度器可以据此减少向该业务分配的资源, 从而避免频带资源被无效占有。广义满意度 s'_k 的定义为

$$s'_k = \begin{cases} (\bar{r}_k / r_{k,\text{tar}})^\Omega \times (1 - (\bar{d}_k / d_k)^\psi), & \bar{r}_k \geq r_{k,\text{tar}}, \bar{d}_k \leq d_{k,\text{tar}} \\ ((\bar{r}_k - r_{k,\text{min}}) / (r_{k,\text{tar}} - r_{k,\text{min}}))^\Phi \times (1 - (\bar{d}_k / d_k)^\psi), & r_{k,\text{min}} \leq \bar{r}_k \leq r_{k,\text{tar}}, \bar{d}_k < d_{k,\text{tar}} \\ 0, & \bar{r}_k < r_{k,\text{min}} \text{ 或 } \bar{d}_k > d_{k,\text{tar}} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 Ω, Ψ, Φ 的选择超出了本文的研究范围, 在此设 $\Omega=1, \Psi=2, \Phi=4$ 。

设系统中用户按照业务类型排序, $1, 2, \dots, k_1$ 为第 1 种业务用户, k_1+1, \dots, k_1+k_2 为第 2 种业务用户, 以此类推, 总用户数为 K 。调度方法如下:

(1) 找出所有用户中广义满意度最低的用户 $k^* = \min_{1 \leq k \leq K} (s'_k)$;

(2) 比较该用户 k^* 广义满意度是否小于满意度门限 Th (默认为 1), 如果大于该门限则不采用 ZF 波束成型, 而是采用随机波束成型预编码, 即如果 $s'_k \geq \text{Th}$ 则转到(4);

(3) 要求广义满意度小于 1 的各用户反馈其信道矢量 \mathbf{h}_k , 并计算若对其采用 ZF 波束成型预编码的可达速率 $R_k = \log_2(1 + r_k)$, r_k 可根据式(1)计算, 其中的波束成型矢量为 $\mathbf{b}_k = \mathbf{h}_k^H / \|\mathbf{h}_k\|$ 。跳过(4)并转到(5);

(4) 选择一个随机的波束 $\mathbf{b}_{\text{random}}$, 且 $\|\mathbf{b}_{\text{random}}\|^2=1$, 并要求所有用户反馈等效信噪比, 基站由此计算每个用户的可达速率 $R_k = \log_2(1 + r_k)$;

(5) 调度器根据调度效用函数计算各用户的效用:

$$F_k = U_k \times w_k \times R_k \quad (7)$$

其中 U_k 是第 k 用户的业务类型权重, 默认为不同业务类型权重相同。 w_k 为满意度权系数。调度器选择效用最大的用户作为本次获得调度的用户 k^* :

$$k^* = \arg \max_{1 \leq k \leq K} (F_k) \quad (8)$$

(6) 调度器将本次发送的波束成型矢量告知物理层, 如本次发送采用随机波束成型预编码, 则波束为 $\mathbf{b}_{\text{random}}$, 若采用迫零波束成型预编码, 则波束为 \mathbf{b}_{k^*} ;

(7) 调度器根据广义满意度式(6)更新获得调度用户的广义满意度 s'_{k^*} 和其满意度权系数 w_{k^*} , 并判断如果当前为一帧的第一个时隙, 则更新所有用户的广义满意度 s'_k 和满意度权系数 w_k 。其中 w_k 根据下式计算:

$$w_k = f(1 + \Delta - s'_k) \quad (9)$$

$$f(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (10)$$

(8)转(1)。

式(9)中 Δ 为权重更新时的惩罚门限, $f(x)$ 为惩罚函数。当用户的广义满意度超出 $1+\Delta$ 时, 调度器认为用户获得了超出其 QoS 需求的资源, 为此将该用户的满意度权系数置为零, 在下一帧满意度权系数更新前不再对其进行调度; 采用这种惩罚机制, 避免了过多的资源被某些优先级高(信道好或时延要求严格等)的用户长期占有。通过合理的设计调度周期和满意度权系数更新周期及惩罚函数的门限 Δ 可以在保证用户业务服务质量的同时, 实现对获得超出需求速率用户的惩罚。

在广义满意度 s'_k 的计算中, \bar{r}_k 是该业务经调度获得的平均传输速率, 在此采用加权指数低通(exponentially weighted low-pass)^[8]方法计算。

本调度方法, 首先根据系统中广义满意度最低用户的广义满意度是否小于满意度门限 Th 来判断是否采用迫零波束成型预编码。调度中采用基于满意度调度准则的随机波束成型或迫零波束成型预编码, 选择效用函数最大的用户获得调度, 该效用函数中同时考虑了用户的满意度因素和信道质量因素, 在保证满意度的情况下, 可以尽可能地减少系统吞吐率的损失。在采用迫零波束成型预编码时, 根据用户反馈的信道矢量给出迫零波束, 大大提高了该用户的传输速率, 并使系统吞吐率也维持在较高水平。同时, 由于采用基于满意度的准则, 在采用迫零波束成型预编码时, 仅要求不满意的用户反馈其信道, 可减少反馈开销。

4 性能仿真与分析

仿真时, 部分参数参照中国 FUTURE 计划 B3G FDD 系统, 基站端 8 根发送天线, 移动台端 1 根接收天线, 下行发送预编码采用随机波束成型或迫零波束成型技术, 信噪比 ρ 取 10dB。假设系统是一个宽带的非频率选择性(假设经过正交频分复用等技术平坦化)衰落信道, 带宽为 20MHz。帧长 8.375ms, 每帧有 10 个时隙, 调度器每时隙调度一次, 调度间隔为 0.8375ms。假设每个用户只有一种业务, 并假设系统中只有两种业务: 视频会议(实时变速率)业务和 FTP 业务, 两种业务的业务权重相同, 都为 0.5; 系统中 75%的用户是 FTP 用户, 25%为视频会议业务用户。两种业务参数如表 1 所示:

表 1 FTP 和视频业务的业务参数

	$r_{k,\text{tar}}$	$r_{k,\text{min}}$	$d_{k,\text{tar}}$
FTP	10Mbps	0Mbps	1000ms
视频会议	2Mbps	1Mbps	50ms

4.1 系统吞吐率和满意度性能

图 2(a)是随用户数增加系统吞吐率的变化情况,可见,采用混合波束成型预编码技术基于满意度调度方法(SBS-HYBRID)的吞吐率随用户数增加而增加,在用户数达到 20 之前系统吞吐率较低,而此后吞吐率明显提升并逐渐逼近 MAX-CI-ZF 方法。这是因为,在系统中用户数较少的时候,SBS-HYBRID 方法采用基于满意度准则的随机波束成型预编码策略,每次仅要求用户反馈其在发送波束的等效信噪比,此时系统吞吐率较低,但是系统中所有用户都处于满意状态,即此时 MAX-CI-ZF 和 PF-ZF 方法通过增加反馈开销带来的高吞吐率,无法带来系统满意度的进一步提升。当用户数超过 20 个时,仅使用随机波束成型预编码无法使所有用户满意,为此 SBS-HYBRID 方法会逐渐增加使用迫零波束成型预编码发送策略的次数,直到最后总是使用迫零波束成型预编码来给用户服务。对于满意度接近的用户,信道增益大的用户会获得调度,即 SBS-HYBRID 方法仍能获得较大的多用户分集增益,且该增长仍然是服从 $M_t \log(1+P/M_t * \log K)$ [5,6] 的增长趋势,其中 K 为用户数。

统计系统满意度时,仍采用式(2)计算各用户的满意度,可以看到图 2(b)中用户数很少时,系统中的资源足够丰富,各方法的系统满意度都接近 1,即调度结果都能满足用户的 QoS 需求。随着用户数增多,用户需求的资源逐渐超出系统能够提供的资源,各方法的系统满意度都在下降,并在超出

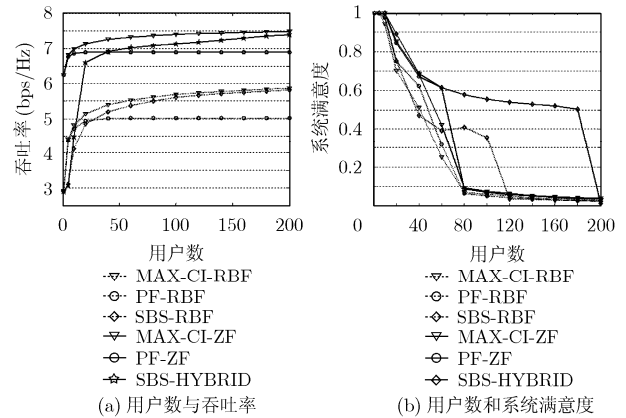


图 2 用户数对吞吐率和满意度的影响

某个用户数后突然大幅下降,这是因为当系统中用户数增加到一定程度时,由于视频会议用户的平均调度时延都超过其最大时延需求,导致该类用户由式(2)计算出的满意度为 0,从而大大影响了系统满意度。

表 2 为不同用户数时几种方法的视频会议用户平均调度时延的仿真结果。表中数据为各方法在不同用户数下视频会议类用户的平均调度时延(时隙数)。采用 MAX-CI 和 PF 的方法由于未考虑到用户业务对时延的需求,当用户数超过 60 后,视频会议用户的平均时延超出了 60 个时隙,由式(2)可见,该类用户满意度变为零,并引起了系统满意度的大幅度

表 2 不同用户数时几种方法的视频会议用户平均调度时延表

用户数	40	60	80	100	120	160	180	200
MAX-CI ZF	39.36	59.39	78.85	98.93	120.11	157.95	179.56	198.73
PF ZF	38.98	58.94	78.90	98.84	118.78	158.62	178.52	198.39
MAX-CI RBF	39.01	59.22	78.59	99.09	119.69	159.33	179.28	198.00
PF RBF	38.97	58.96	78.90	98.83	118.77	158.76	178.46	198.50
SBS HYBRID	50.61	53.98	55.91	57.09	58.29	59.36	59.82	63.59
SBS RBF	47.68	52.70	56.25	58.82	64.53	93.92	109.65	125.84

下降;采用 SBS 准则的 RBF 方法,调度时考虑到该类用户的时延需求,因此,当用户数超过 100 时,其视频会议类用户的平均调度时延才超出了时延门限,致使该类用户的满意度降为 0;采用 SBS-HYBRID 方法由于结合了迫零和随机两种波束成型预编码技术并以用户的满意度为调度准则,在提高系统频谱效率的同时尽力保证实时用户的时延需求,当用户数超过 180 后,才无法继续保证实时用户的时延需求而导致了视频会议用户满意度的大幅下降。

综上所述,本文提出的基于满意度准则采用混合波束成型预编码的调度方法可以在保证用户业务服务质量的前提下为更多用户提供满意的服务,同时更合理地利用频谱资源。

5 结束语

本文提出了基于满意度准则采用混合波束成型预编码

的调度方法,该方法灵活地使用随机波束成型和迫零波束成型两种预编码策略,使得系统中不同业务类型的用户都可以获得满意的服务,并保证系统吞吐率维持在较高水平,同时由于采用了基于满意度的调度准则,能降低反馈开销,更有效地利用系统资源。仿真结果及分析表明,本文所提出的方法能够有效地保证用户的 QoS 需求,同时为更多用户服务,更好地利用频谱资源。

参考文献

- [1] Ameigeiras P, Wigard J, and Mogensen P. Performance of packet scheduling methods with different degree of fairness in HSDPA. IEEE Vehicular Technology Conference, 2004 Fall, VTC2004-Fall, Los Angeles, 26-29 Sept, 2004, 2: 860-864.
- [2] Shin O S and Bok K. Antenna-assisted round robin

- scheduling for MIMO cellular systems. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(3): 109–111.
- [3] Bertsekas D and Gallager R. *Data Networks* (Second Edition) [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1992.
- [4] Fattah H and Leung C. An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks. *IEEE Wireless Communications*, 2002, 9(5): 76–83.
- [5] Sharif M and Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2005, 51(2): 506–522.
- [6] Yoo T and Goldsmith A. On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming. *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, 2006, 24(3): 528–541.
- [7] Chung J, Hwang C S, and Kim K. A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity. *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, 2003, 21(5): 848–855.
- [8] Viswanath P, Tse D N C, and Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2002, 48(6): 1277–1294.
- [9] IEEE Std 802.16e/D2-2004, Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16:Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems-Amendment for Physical and Medium Access Control Layer for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands. Apr. 2, 2004.
- 刘 涛: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为多天线信号处理、多用户调度、跨层协议设计与实现.
- 邱 玲: 女, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、移动通信、扩频通信、MIMO 中的信号处理、多用户 MIMO 等.