

在相关多入多出(MIMO)信道中的 可变速率多用户分集技术

唐 岚¹,王树勋¹,梁应敞²

(1. 吉林大学通信工程学院,吉林长春 130025;2. Institute for Information Research Singapore,119613,Singapore)

摘 要: 在本篇文章中,我们研究基于 MIMO 虚拟信道表述的可变速率多用户分集技术.为实现慢衰落相关信道中的多用户分集,本文在发射端采用随机波束成形技术,并提出一种新的利用 MIMO 虚拟信道来产生随机波束成形矩阵的方法.同时,我们对期望用户的子信道采用自适应编码调制技术,以进一步提高系统性能.

关键词: MIMO;多用户分集;波束成形;虚拟信道;自适应编码调制

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 04-0629-05

The Multiuser Diversity with Constellation Selection Based on a MIMO Correlated Channels

TANGLan¹,WANG Shu-xun¹,LIANG Ying-chang²

(1. The School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China;

2. Institute for Information Research Singapore, 119613, Singapore)

Abstract: We study the multiuser diversity with constellation selection based on a virtual representation of realistic MIMO correlated channels. To realize multiuser diversity in slow fading correlated channels, We adopt random beamforming technique and propose to construct random beamforming matrix exploiting virtual channel representation. Simultaneously, adaptive coded modulation is applied to each sub-channel of the selected user to improve the system performance further. Two cases are considered: minimizing the BERs in each sub-channel and maximum the sum of data rate.

Key words: MIMO; multiuser diversity; beamforming; virtual channel; adaptive modulation

1 引言

多用户分集是存在于多用户无线系统的一类分集技术,能利用衰落信道提高系统容量^[1].在文[2]中,将机会波束成形技术和多用户分集技术相结合,使信道有更大的波动范围,并将发射安排给信道与波束成形权值最匹配的用户.为获得更高的数据率,这种方案被扩展到 MIMO 系统中^[3,4].在文[3]中,提出了 MIMO 系统中利用多用户分集的随机波束成形方案,其中,主要考虑了非相关信道的情况.然而,在真实信道传播环境中,往往存在直射路径或散射物少等情况,从而使信道矩阵具有一定的相关性.

在这篇文章中,我们采用 MIMO 信道的虚拟表述来实现相关 MIMO 系统的多用户分集.在不相关 MIMO 信道中,发射端的随机波束成形矩阵与用户矩阵同分布的信道矩阵的右奇异矩阵^[3].发射端的随机波束成形矩阵和期望用户的信道矩阵越匹配,子信道之间的相互干扰越小,系统获得的吞吐量

越大.在相关信道中,通常用参数物理模型来表示信道^[6], $H = \sum_{l=1}^L \alpha_l a_R(\theta_{R,l}) a_T^H(\theta_{T,l})$,其中, α_l 是衰落增益, $\theta_{R,l}$ 和 $\theta_{T,l}$ 分别表示和第 l 条路径相关的到达角和离开角.虽然物理模型能较准确的表示具有相关性的用户信道,但由于方向角的角度范围很难选取,直接用该模型很难产生与用户信道矩阵匹配的随机波束成形矩阵,尤其当用户数较少时,波束成形矩阵不能和用户信道矩阵很好匹配,从而降低了系统性能.文[5]中所提出的虚拟信道表示形式采用虚拟方向的固定空间波束描述信道,虚拟信道矩阵中的非零子矩阵对应于不同的物理散射物,且子矩阵中的元素不相关.因此,通过虚拟信道表述,我们可以用类似在非相关信道中构造统计矩阵的方法来构造随机波束成形矩阵,而无需对方向角的范围进行估计.这种方法能增加相关信道中随机波束成形矩阵和用户信道矩阵的匹配度,当用户数较少时,改善效果更明显.在我们所提出的方案中,在发射端不需要准确的信道状态信息,而是根据接收端

反馈的子信道信噪比和比例公平调度算法选出期望用户^[2].

为了进一步提高系统性能, MIMO 技术通常与自适应发射技术结合在一起^[8-10]. 在文[7]中, 研究了 MIMO 多用户分集系统的自适应调制技术. 在本文中, 进一步考虑采用收缩码实现可变速率编码^[11], 通过子信道的自适应编码调制技术, 进一步提高系统的误码性能及传输速率. 文中考虑了两种情况: 固定总数数据率使系统误码率最小; 在一定的误码率条件下最大化系统传输速率. 结果表明, 通过自适应编码调制技术, 有效地提高了系统的误码性能和传输速率. 随着用户数的增加, 系统性能逐渐接近于特征波束成形系统的性能.

2 系统模型

我们考虑一个基站和多个移动终端的通信系统, 基站上装有 M_r 个发射天线, 移动台上装有 M_t 个接收天线 ($M_r < M_t$). 真实无线信道通常和角度扩展, 散射物和天线距离等因素有关, 因此信道矩阵元素通常是相关的. 采用虚拟信道表述的信道模型通过固定、虚拟方向的空间波束表示散射环境的特点^[5], 如下式所示

$$H = \sum_{m=1}^{M_r} \sum_{n=1}^{M_t} [H_{V,m,n} a_R(r_{R,m}) a_T^H(t_{T,n})] = A_R H_V A_T^H \quad (1)$$

其中, $A_R = [a_R(r_{R,1}), \dots, a_R(r_{R,M_r})]$, $A_T = [a_T(t_{T,1}), \dots, a_T(t_{T,M_t})]$, $a_R(r_{R,i})$ 和 $a_T(t_{T,i})$ 分别表示虚拟方向的舵矢量和响应矢量,

$$a_R(r_{R,i}) = \frac{1}{\sqrt{M_r}} [1, e^{-j2\pi r_{R,i}}, \dots, e^{-j2\pi (M_r-1) r_{R,i}}]^T \quad (2)$$

$$a_T(t_{T,i}) = \frac{1}{\sqrt{M_t}} [1, e^{-j2\pi t_{T,i}}, \dots, e^{-j2\pi (M_t-1) t_{T,i}}]^T \quad (3)$$

$r_{R,m}$ 和 $t_{T,n}$ 表示固定的虚拟角度, 是在主值区间 $[-0.5, 0.5]$ 内的均匀抽样, 其中, $r_{R,m} = (m-1)/M_r - 0.5$, ($m=1, \dots, M_r$), $t_{T,n} = (n-1)/M_t - 0.5$, ($n=1, \dots, M_t$). H_V 是 $M_r \times M_t$ 的虚拟信道矩阵, 从式(1)中我们可以看出, H_V 和 H 是等价矩阵. H_V 能形象地表示散射信道, 它的非零子矩阵相对于不同的散射物, 在不相关散射的假设条件下, H_V 的非零元素不相关^[5].

MIMO 可变速率多用户分集系统的框图如图 1 所示. 我们考虑下行链路多用户分集, 假设 MIMO 信道是准静止的, 则第 k 个用户的 $M_r \times 1$ 接收信号向量可表示为

$$Y_k(n) = H_k X_b(n) + W_k(n) \quad (4)$$

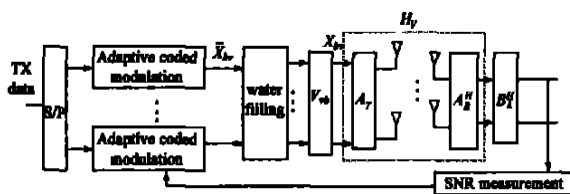


图 1 系统模型

其中, 下标 k 表示用户指数, b 表示基站. H_k 是 $M_r \times M_t$ 的复相关矩阵. $W_k(n)$ 为独立同分布的复加性高斯白噪声向量 ($W_k(n) \sim N(0, (N_0) I_{M_t})$). $X_b(n)$ 表示发射数据, $E(X_b^T X_b) =$

P , P 是总发射功率.

3 随机波束成形

当基站已知用户信道状态信息时, 通常采用特征波束成形技术将信道分成平行的子信道以获得最大的信道容量^[12]. 在多用户分集系统中, 发射端无须知道每个用户的信道信息, 而是生成一个随机波束成形矩阵, 然后根据比例调度算法选出信道矩阵和随机波束成形矩阵最匹配的用户. 本文通过虚拟信道矩阵 H_V 产生随机波束成形矩阵. 由于 H_V 的非零子矩阵和实际信道中的散射物相对应, 且非零元素不相关, 因此可用在非相关矩阵中产生随机矩阵的方法来产生相关信道中的随机矩阵. 在发射端, 训练序列 $\bar{X}_{b,v}$ 先和随机矩阵 R 相乘, 再从多个发射天线发射出去. 随机矩阵 R 的表达式如下

$$R = A_T V_{vb}^{1/2} \quad (5)$$

其中, A_T 为固定舵矢量矩阵, V_{vb} 为随机波束成形矩阵, 它是随机虚拟矩阵 $H_{vb} = U_{vb} V_{vb}^H$ 的右奇异矩阵, V_{vb} 为对角阵, 对角线元素是根据灌水原理求得的功率分配因子

$$v_m = (\mu - \lambda_m^{-1})^+, \quad m=1, \dots, M_t \quad (6)$$

其中, λ_m 是 $H_{vb} H_{vb}^H$ 的特征值, 上式满足约束条件 $\sum_{m=1}^{M_t} v_m = M_t$, $(x)^+$ 表示 $\max(0, x)$.

第 k 个用户的接收信号向量可表示为

$$Y_k(n) = H_k R \bar{X}_{b,v}(n) + W_k(n) \quad (7)$$

其中, $H_k = A_R H_{vk} A_T^H$, $H_{vk} = U_{vk} V_{vk}^H$. 因为接收端已知训练序列, 因此可以估计合成信道 $H_k R$, 并进行相应的线性处理, 处理后的信号可表示为

$$X_{k,vb} = B_k^H Y_k \quad (8)$$

其中, B_k 为合成信道 $H_k R = B_k F_k D_k^H$ 的左奇异矩阵. B_k 和 D_k 为奇异矩阵, F_k 为奇异值矩阵. 如果虚拟波束成形矩阵 V_{vb} 等于虚拟信道矩阵右奇异矩阵 V_{vk} , 则 $H_k R = A_R U_{vk} V_{vk}^{1/2}$, 因此 $B_k = A_R U_{vk}$, 式(8)可进一步表示为

$$X_{k,vb} = V_{vk}^{1/2} \bar{X}_{b,v} + B_k^H W_k \quad (9)$$

然而, 当 $V_{vb} \neq V_{vk}$, $B_k^H H_k R$ 不再是对角阵, 数据流将相互干扰. 令 $\lambda_k = F_k D_k^H$, 第 q 个子信道的有效信噪比可表示为

$$SNR_k^q = \frac{\lambda_k(q, q) \frac{P}{M_t}}{\sum_{j=1}^{j=q} \lambda_k(q, j) \frac{P}{M_t} + N_0} \quad (10)$$

其中, $\lambda_k(i, j)$ 表示 λ_k 的 (i, j) 个元素.

对于第 k 个接收机, 我们可以得到 M_t 个有效信噪比, 然后将信噪比反馈到发射端. 在发射端, 先根据信噪比计算各个用户的信道容量, 再根据比例公平调度算法选择期望用户^[2].

总结. 在 MIMO 系统中, 采用虚拟随机波束成形实现多用户分集的步骤如下:

(1) 发射机先根据信道条件 (散射物的分布) 确定随机虚拟矩阵 H_{vb} 的非零子矩阵, 每个子矩阵由独立同分布的变量构成^[5], 对 H_{vb} 进行 SVD 分解, $H_{vb} = U_{vb} V_{vb}^H$, 得到随机波束成形矩阵 V_{vb} , 然后构造矩阵 $R = A_T V_{vb}^{1/2}$, 其中, V_{vb} 可通过

式(6)获得.

(2)发射机将训练序列和随机矩阵 R 相乘,然后从天线发射出去.

(3)用户估计合成信道,对接收信号进行线性处理,计算每个子信道的有效信噪比,将信噪比反馈到发射端.

(4)发射机计算每个用户的总信道容量,然后根据比例公平调度算法选择期望用户,同时根据反馈信噪比对所选用户进行自适应编码调制(详见第 4 节).

4 自适应编码调制

在本节,我们根据反馈信噪比选择期望用户的编码调制方式.两种情况下的自适应编码调制技术被分别讨论:在一定数据率的条件下最小化系统的误码率;在误码率一定的条件下最大化系统的数据率.

4.1 最小化误码率

在该方案中,我们在数据率一定的条件下,自适应地选择子信道及编码调制方式以使期望用户的误码率最小(设第 k 个用户为期望用户).令 $b_i, i = 1, \dots, M_i$ 表示分配给每个子信道的比特数,且 $b_q = b_T$,采用 QAM 调制方式的第 k 个用户的第 q 个子信道的误比特率公式为^[13]

$$BER_k^q = C \exp\left(\frac{-1.6 G_c^q SNR_k^q}{2^{b_q} - 1}\right) \quad (11)$$

其中, C 为常数, G_c^q 为第 q 个子信道的编码增益.该优化问题可表示为下式

$$\min_q \max_{(1, \dots, M_i)} BER_k^q \quad (12)$$

为了满足式(12),所有子信道的误比特率必须相同,否则,误码性能最差的子信道将会使系统性能严重恶化,因此,根据式(11),我们可得到下式

$$\frac{2^{b_q}}{G_c^q} = \frac{-1.6 SNR_k^q}{\ln(BER_k^q / C)} + 1 \quad (13)$$

将子信道的频谱效率相加,可得 BER_{con} 的上界

$$BER_{con} < C \exp\left(\frac{-1.6(G_c^q)^{1/M_i} (SNR_k^q)^{1/M_i}}{2^{b_T/M_i}}\right) \quad (14)$$

令 S 和 \tilde{M}_i 表示使用的子信道集合和数目,为最小化式(14),子信道的选择原则如

$$(S, \tilde{M}_i) = \arg \max \left[C \exp\left(\frac{-1.6(G_c^q)^{1/M_i} (SNR_k^q)^{1/M_i}}{2^{b_T/M_i}}\right) \right] \quad (15)$$

一旦 (S, \tilde{M}_i) 确定,各个子信道的编码调制方式可由式(13)确定.每个子信道分配的比特数和编码增益是对应的,设子信道分配的比特数为 b_i ,则 $2^{b_i} / G_c^i$ 应不超过 $\frac{-1.6 SNR_k^i}{\ln(BER_k^i / C)} + 1$ 的最大数.

4.2 最大化数据率

在这个小节中,我们考虑离散速率和一定 BER 约束条件下的自适应编码调制方案.对于 M-QAM 调制,帧长为 L 的系统,第 k 个用户的第 q 个子信道可获得的吞吐量可表示为

$$T_k^q = R_q (1 - BER_k^q)^L \log_2 M_q \quad (16)$$

其中, R_q 为编码速率, $M_q = 2^{b_q}$, BER_k^q 为式(11)所示.每个子信道根据其信噪比进行独立的编码调制,使各个子信道所能获得的吞吐量最大

$$M_q = \arg \max T_k^q \quad (17)$$

其中, BER_k^q 必须小于系统的误比特率的约束条件.式(17)很难得到准确的数学解,只能采用计算机搜索比较获得.在一定的误码性能的条件下,为了获得最大的频带利用率,信噪比高的子信道应采用高进制调制方式,而信噪比低的信道应采用低进制调制方式.

5 性能分析

在本节,我们讨论在慢衰落相关信道中的系统性能.慢衰落意味着在我们所考虑的时间范围内信道是保持不变的.虽然信道恒定,随机波束成形技术能导致信道波动以实现多用户分集.如果发射端已知信道状态信息时,则令 $V_{vb} = V_{vk}$,且发射端采用灌水原理进行功率分配,此时用户 k 的子信道信噪比最大,我们称这种情况为特征波束成形.当系统内的用户数很多时,随机波束成形的性能接近特征波束成形的性能.为进一步提高多用户分集系统的性能,我们在发射端采用子信道自适应编码调制技术.我们采用固定编码速率 1/2 的编码器 ($g = [133, 171]$),通过收缩码实现可变速率编码(编码速率为 $(n-1)/n, n = 2, \dots, 8$),采用 4QAM ~ 256QAM 的调制方式.

5.1 固定速率的情况

在本小节中,主要评价在总速率一定的条件下,系统的误码性能.在本节的所有仿真中, $b_T = 8$ bps/Hz.图 2 评价了在不同信道条件下的多用户环境中用户 1 的误码性能(假设小区内的所有用户的信道矩阵是同分布的,因此仅考察用户 1 的误码性能不失一般性).其中,平均 $SNR = P/N_0$,发射天线 $M_i = 4$,接收天线 $M_r = 4$,用户数为 100.由于虚拟信道矩阵的不同非零子矩阵对应于信道中的不同散射物,且非零元素相互独立,因此,虚拟信道矩阵为真实信道提供了直观形象的表达方式.在图 2 中,我们选

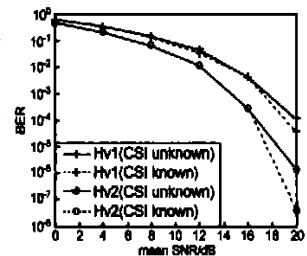


图 2 用户 1 在不同信道条件下的误码性能曲线

取的虚拟信道矩阵为 $H_v = \begin{bmatrix} \times & \times \\ \times & \times & 0 \\ \times & \times & 0 \\ \times & 0 & 0 \end{bmatrix}$.其中, \times 和

分别表示不同方差的非零元素.在本次实验中, \times 表示方差为 1 的非零元素.为了比较系统在不同信道条件下的性能, \times 分别表示方差为 0.01(相对于图 2 中的 H_{v1})和 0.05(相对于图 2 中的 H_{v2})的非零元素.信道中的散射路径越大,信道相关性越弱,相应子矩阵元素的方差也越大,因此,从图 2 中,我们可以看出,方差越大的矩阵对应的误码率曲线的斜率越大.同时,我们还将接收端已知信道信息 ($V_{vb} = V_{v1}$) 的系统性能和随

机波束成形的性能进行比较。当信噪比小于 16dB 的时候,两者是基本重合的,这表明当用户数为 100 时,随机波束成形矩阵能和期望用户信道矩阵能较好地匹配。但当信噪比大于 16dB,两条曲线开始分开,这是因为由于随机波束成形矩阵不可能和用户信道矩阵完全匹配,而发射端的功率越大,来自其他子信道的干扰也越大,因此,当用户数一定时,发射功率过大反而会使系统性能恶化。

图 3 为用户 1 在不同天线配置条件下的误码性能曲线。

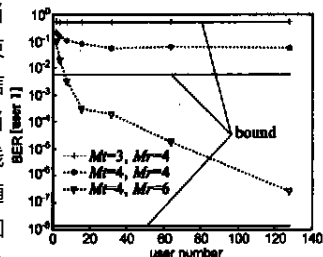


图 3 用户 1 在不同天线配置条件下的误码性能曲线

平均 SNR 为 15dB. 当 $M_t = 2$, $M_r = 4$ 时, $H_v = \begin{bmatrix} \times & \times \\ \times & \times & 0 \\ \times & \times & 0 \\ \times & 0 & 0 \end{bmatrix}$; 当

$M_t = 4$, $M_r = 6$ 时, $H_v = \begin{bmatrix} \times & \times \\ \times & \times & 0 \\ \times & \times & 0 \\ \times & 0 & 0 \\ \times & \times & 0 \\ \times & \times & 0 \end{bmatrix}$, 其中, \times 和 0 分别

表示方差为 0.05 和 1 的非零元素。当发射端已知用户 1 的信道状态信息时,各个子信道的信噪比最大,用户 1 的 BER 最小(图 3 中的直线)。当采用随机波束成形技术时,随着用户数的增加,用户 1 的 BER 会逐渐接近 BER 下界。显然,增加发射或接收天线的个数可以提高系统的误码性能,尤其是增加接收天线的个数,对系统性能有很大改善。因为增加天线的数目相当于增加了路径数,从而能为系统提供更多的复用增益。

图 4 为发射端根据子信道信噪比进行自适应编码调制时,各个子信道采用的调制方式。其中,发射接收天线的个数均为 4,信道模型与图 2 的信道模型同, \times 和 0 分别表示方差为

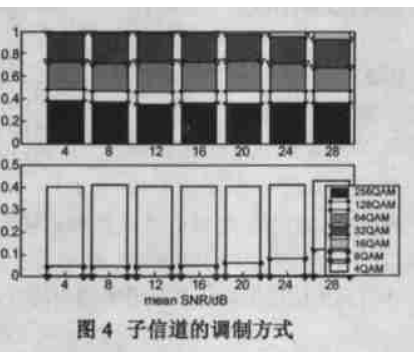


图 4 子信道的调制方式

0.05 和 1 的非零元素。在相关信道中,由于信道矩阵的条件数较大,因此,信噪比较小的子信道通常不可用。在本实验中,只有子信道 1 和 2 可用。各子信道采用的编码调制方式如表 1 所示。子信道 1 的信噪比较大,因此采用 256QAM ~ 16QAM 的高进制调制方式,而子信道 2 则多用 4QAM 和 8QAM 等调制方式。因为系统的总速率一定,所以调制方式的比例基本不随信噪比而变化。

5.2 最大化瞬时数据率

随机波束成形矩阵与用户信道矩阵越匹配,系统所能获

得吞吐量越大。在研究相关信道中的随机波束成形技术中,如果用物理信道模型的方法来构造随机波束成形矩阵,很难得到和用户信道矩阵匹配的波束成形矩阵。图 5 主要比较了采用物理信道模型和采用虚拟波束成形矩阵方法所能获得的系统吞吐量。我们所采用的虚拟波束成形矩阵与图 2 中所用的虚拟矩阵 H_v 相同。当发射端已知信道状态信息时,系统的吞吐量达到最大,即图 5 中的吞吐量

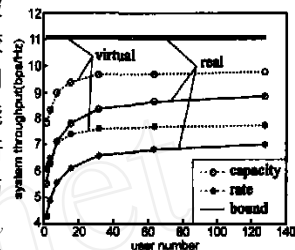


图 5 采用不同随机波束成形技术的系统吞吐量比较

上界。用户 1 的容量和速率随着用户数的增加而逐渐接近容量界。显然,采用虚拟矩阵构造的随机波束成形矩阵能和用户信道矩阵更好匹配,从而获得更高的系统容量。当系统内的用户数较少时,这种方法有更大的优势。

图 6 为不同平均信噪比

条件下系统吞吐量和用户数的关系曲线。 H_v 的结构与图 5 同。平均 SNR 为 15dB 和 3dB 的情况分别被考虑。虽然,随着用户数的增多,不同 SNR 的用户 1 的容量和速率都逐渐趋近最大值,但当 SNR 较小时,容量和速率的收敛速度更快。因为当 SNR

图 6 不同平均信噪比条件下系统吞吐量和用户数的关系曲线

较小时,由于随机波束成形矩阵不匹配所导致的干扰也相当较小。

图 7 为各个子

信道所使用的调制方式的比例。与图 4 一样,只有子信道 1 和 2 可用。不同的是,随着信噪比的增加,子信道的调制方式也随着变化。当信噪比较小时,子信道多采用低进制的调制方式,当信噪比较大时,子信道多采用高进制的调制方式。在高信噪比时,子信道 2 也能采用 128QAM 的调制方式。通过这种子信道的编码调制,使式 (22) 中的可获得系统吞吐量达到最大。

图 7 子信道的调制方式

6 总结

本文主要解决在 MIMO 多用户分集系统中的随机波束成形及自适应编码调制问题。提出了在相关 MIMO 系统中的一种更有效地产生随机波束成形矩阵的方法 - 通过信道的虚拟表述实现随机波束成形。仿真结果表明采用这种方法比直接用物理信道模型产生随机矩阵有更好的效果。当系统内的用

户数较少时,这种方法能更有效地提高系统性能.同时,本文还通过发射端的自适应编码调制实现了可变速率的多用户分集.通过自适应编码调制技术,可以有效的降低系统的误码率及提高系统所能获得的数据率.当系统内的用户数增加时,系统的性能将收敛于特征波束成形系统的性能.

参考文献:

- [1] R Knopp ,P Humber. Information capacity and power control in single cell multiuser communications[A]. In Proc. IEEE ICC [C]. seattle , 1995. 331 - 335.
- [2] Pramod Viswanath ,David N C Tse ,Rajiv Laroia. Opportunistic beamforming using dumb antennas[J]. IEEE Trans Inform. Theory ,2002 ,48 (6) :1277 - 1294.
- [3] J Chung ,CS Hwang ,K Kim ,YK Kim. A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity[J]. IEEE JSAC , 2003 ,21(5) :848 - 855.
- [4] L Dong ,T Li ,Y-F Huang. Opportunistic transmission scheduling for multiuser MIMO systems[A]. In Proc. IEEE ICASSP[C]. Hong kong , 2003. 65 - 68.
- [5] Akbar M. Sayeed. Decostructing multiantenna fading channels [J]. IEEE Trans on Signal Processing ,2002 ,50(10) :2563 - 2579.
- [6] Z Hong ,K Liu ,R Heath ,A Sayeed. Spatial multiplexing in correlated fading via the virtual channel representation[J]. IEEE JSAC ,2003 ,21 (5) :856 - 866.
- [7] Lan Tang ,Shu-xun Wang ,Ying-chang Liang. Variable-rate adaptive modulation in MIMO systems exploiting multiuser diversity [A]. In IEEE ICASSP2004[C]. Canada ,2004. 693 - 696.
- [8] Ravi Narasimhan. Spatial multiplexing with transmit antenna and constellation selection for correlated MIMO fading channels [J]. IEEE Trans Signal processing ,2003 ,51(11) :2829 - 2838.
- [9] Severine Catreux ,Peter F Driessen ,Larry J. Greenstein. Data throughputs using multiple-input multiple-output (MIMO) techniques in a noise-limited cellular environment[J]. IEEE Trans Wireless Commu , 2002 ,1(1) :226 - 235.
- [10] Shengli Zhou ,Georgios B. Giannakis. adaptive modulation for multi-antenna transmission with channel mean feedback[J]. IEEE ICC ,2003 , 4:11 - 15.
- [11] J B Cain ,G C Clark ,J M Geist. Punctured conventional codes of rate $(n - 1)/n$ and simplified maximum likelihood decoding [J]. IEEE Trans Inform. Theory ,1979 ,25 :97 - 100.
- [12] Emre Telatar. Capacity of multi-antenna gaussian channels[J]. Eur. Trans Telecomm. ETT ,1999 ,10(6) :585 - 596.
- [13] ST Chung ,AJ Goldsmith. Degrees of freedom in adaptive modulation [J]. IEEE Trans on Commu ,2001 ,49(9) :1561 - 1571.

作者简介:



唐 岚 女,1980年4月出生于四川省攀枝花市,2002年7月于吉林大学南湖校区通信工程学院获工学学士学位,现为吉林大学南岭校区信息与信号处理专业研究生,目前主要从事 CDMA 空时编码、波束成形、MIMO 系统的研究工作. e-mail :tanglan1980429 @163. com.

王树勋 男,1946年出生于吉林长春,1970年毕业于清华大学电机系,1983年在吉林工业大学电子工程系获工学硕士学位,曾任吉林工业大学副校长,现任教授、博士生导师、IEEE 会员,主要研究方向为高阶统计量在数字信号处理中的应用及计算机应用,已出版著作 3 部,发表论文 50 余篇.

梁应敬 男,1968年10月出生于江西,1993年12月获吉林大学博士学位,1994年1月至1997年8月先后在清华大学,新加坡南洋理工大学及美国马里兰大学从事博士后研究工作,1997年8月至2001年11月在新加坡国家无线通信研究中心任高级研究员,2001年12月至2002年11月在美国加州 Innova Solutions 公司任首席科学家,现在新加坡 Institute for Information Research Singapore,主要从事 MIMO 系统,OFDM,通信信号处理的研究工作.