

采用线性迫零接收机的多天线多用户分集性能分析

曾二林 朱世华 廖学文

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘要: 采用线性迫零接收机的多天线系统中, 同时传输的多个数据流, 其信噪比并不相互独立, 这使得分析多用户分集的性能非常困难。该文通过分布假设检验和最大似然参数估计方法, 采用伽马分布逼近所有数据流信噪比最大、最小值以及均值的概率分布, 并基于此进一步分析了多天线多用户分集的系统性能。仿真结果表明, 前述逼近的准确度较高, 该文的分析方法能够较好地衡量多用户分集增益的大小。

关键词: 多天线; 多用户分集; 迫零接收机; 性能分析

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2938-05

Performance Analysis of Multiuser Diversity for MIMO Systems with Linear Zero-Forcing Receiver

Zeng Er-lin Zhu Shi-hua Liao Xue-wen

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In multiantenna systems exploiting linear zero-forcing receivers, the Signal-to-Noise Ratio (SNR) on each of the simultaneous sub-streams is not independent with each other. This makes the performance analysis of the multiuser diversity much more difficult. By means of hypothesis testing and the maximum likelihood parameter estimation, this paper uses the Gamma distribution to approximate the probability distribution of the maximum, the minimum and the mean value of the SNRs on all the streams. Based on this, the performance of multiuser diversity for multiantenna systems is analyzed. Simulation shows that the aforementioned approximation closely matches the real distribution and the analysis provides a good estimation on the multiuser diversity gain.

Key words: Multiantenna; Multiuser diversity; Zero-Forcing(ZF) receiver; Performance analysis

1 引言

多输入多输出(MIMO)系统由于其容量的优势, 近年来受到广泛关注。在发送端以空分复用(spatial multiplexing)的方式同时发送多个独立的数据流^[1], 可以提升频谱效率。研究表明, 采用线性迫零接收机对空域复用信号进行检测时, 各数据流间的相互干扰以及噪声都会带来容量的损失^[2]。特别是, 在信道响应矩阵呈现病态时, 链路的误码性能将急剧恶化。

文献[3]从另一个角度看待无线信道的衰落, 认为在多用户无线通信系统中, 蕴藏着“多用户分集”(multiuser diversity)。其实质在于通过调度, 将信道资源分配给瞬时信道条件最好的用户, 从而提升系统的吞吐量。Heath等学者认为^[4], 将多用户分集引入空域复用的MIMO系统中, 利用用户所经历衰落的相互独立性, 可以有效地补偿病态信道矩阵对系统容量的不利影响。

本文研究对象是采用线性迫零接收机的多天线多用户分集性能。由于同时传输的多个数据流, 其信噪比并不相互独立, 使得分析多用户分集的性能非常困难。本文通过分布

假设检验和最大似然参数估计方法, 采用伽马分布逼近所有数据流信噪比最大、最小值以及均值的概率分布, 并基于此进一步分析了采用多用户分集的系统性能。利用卡方实验验证了前述逼近的准确性。仿真实验结果表明, 本文的分析能较好地衡量多用户分集增益的大小。

2 系统模型及分析

2.1 系统模型

考虑一个多用户多天线系统。设用户总数为 K , 基站和用户天线数分别为 M 和 N 。设发送功率固定为 E_s , 并在各发射天线间平均分配。每个调度周期中, 基站在各用户所提供的反馈信息的辅助下, 采用某种调度策略完成空域信道的分配。

若在时刻 t , 信道被分配给用户 k , 则其接收信号可以表示为

$$\mathbf{r}_k(t) = \sqrt{\frac{E_s}{M}} \mathbf{H}_k(t) \mathbf{s}_k(t) + \mathbf{n}_k(t) \quad (1)$$

其中 \mathbf{H}_k 为 $N \times M$ 维信道矩阵, 各分量为独立同分布、均值为 0、实部和虚部方差均为 0.5 的复高斯随机变量; 采用空分复用的方法并行发送多个数据流, 即 \mathbf{s}_k 为用户 k 对应的 $M \times 1$ 维发送符号向量, 各分量的平均能量为 1; \mathbf{n}_k 为 $N \times 1$ 维白噪声向量, 其分量为均值为 0、方差为 N_0 的独立复高斯随机变量。假设信道为准静态平坦瑞利衰落, 即信道在一帧内保持不

2006-05-29 收到, 2006-10-24 改回

国家自然科学基金(60372055)和博士点基金(20030698027)资助课题

变, 帧间独立地变化。假设接收端已知信道状态信息, 且反馈链路的带宽受限, 终端只对部分信息进行反馈。

2.2 迫零接收机的性能

为了叙述简单起见, 以下省略时间坐标 t 。采用线性迫零处理后, 用户 k 的接收信号可以表示为

$$\hat{\mathbf{s}}_k = \sqrt{\frac{E_s}{M}} \mathbf{H}_k^{\text{H}} \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{n}_k = \sqrt{\frac{E_s}{M}} \mathbf{s}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{n}_k \quad (2)$$

其中 \mathbf{H}_k^{\dagger} 为 \mathbf{H}_k 的伪逆。令 $\mathbf{e}_k = \mathbf{H}_k^{\dagger} \mathbf{n}_k$, 则在用户 k 接收机第 i 个数据流上的噪声功率为 $[\varepsilon(\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^{\text{H}})]_{i,i}$, 其中 $\varepsilon(\bullet)$ 表示求均值; $[\bullet]_{i,i}$ 表示矩阵的第 i 个对角元素, 则用户 k 第 i 个数据流上的信噪比为^[2]

$$\gamma_{k,i} = \frac{\varepsilon(s_{k,i} s_{k,i}^{\text{H}}) E_s / M}{[\varepsilon(\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^{\text{H}})]_{i,i}} = \frac{E_s / M}{N_0 [(\mathbf{H}_k^{\text{H}} \mathbf{H}_k)^{-1}]_{i,i}} = \frac{E_s}{MN_0} \frac{\det(\mathbf{W})}{\det(\mathbf{W}_{ii})} \quad (3)$$

其中 $s_{k,i}$ 表示发送 \mathbf{s}_k 的第 i 个元素; $\mathbf{W} = \mathbf{H}_k^{\text{H}} \mathbf{H}_k$ 为复 Wishart 矩阵, 其分布为 $\mathbf{W} \sim \mathbf{W}_M(N, \mathbf{I}_M)$; \mathbf{W}_{ii} 为矩阵 \mathbf{W} 对角元素 \mathbf{W}_{ii} 的代数余子式。根据 Wishart 分布的性质和代数余子式的定义, $d = \frac{\det(\mathbf{W})}{\det(\mathbf{W}_{ii})}$ 为自由度为 $2(N - M + 1)$ 的卡方随机变量。若令 $\rho = E_s / N_0$, 则 $\gamma_{k,i}$ 的概率密度函数可表示为^[5]

$$f(\gamma_{k,i}) = \frac{M}{\rho(N - M)!} e^{-\frac{M}{\rho} \gamma_{k,i}} \left(\frac{M}{\rho} \gamma_{k,i} \right)^{N - M - 1}, \quad \gamma_{k,i} > 0 \quad (4)$$

由式(2), 不同数据流 i, j 上的噪声的相关系数为

$$\rho_{i,j} = \frac{\varepsilon(e_{k,i} e_{k,j}^{\text{H}})}{N_0^2} = \frac{[(\mathbf{H}_k^{\text{H}} \mathbf{H}_k)^{-1}]_{i,j}}{N_0^2} \quad (5)$$

其中 $e_{k,i}$, $i \in [1, N]$ 表示 \mathbf{e}_k 的第 i 个分量。不同数据流的噪声是相关的, 所以对不同 i , $\gamma_{k,i}$ 并不相互独立。求取 $\gamma_{k,i}$, $i \in [1, M]$ 的联合分布非常复杂, 这为研究容量的分布特性带来了困难。为了较准确地分析多用户分集的容量增益, 下文将从各数据流信噪比最大、最小值以及平均值的概率分布出发, 对前述问题进行探讨。

3 采用线性迫零接收机的多天线多用户分集性能

定义 $\gamma_k^{\max} = \max_{i \in [1, M]} \gamma_{k,i}$, 最小值 $\gamma_k^{\min} = \min_{i \in [1, M]} \gamma_{k,i}$, 均值 $\bar{\gamma}_k = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \gamma_{k,i}$ 。分析 γ_k^{\max} 和 γ_k^{\min} 的概率分布需利用顺序统计量理论^[6]求取 $\gamma_{k,i}$, $i \in [1, M]$ 的联合分布, 该问题求解很困难。以下利用特定参数下的伽马(Gamma)分布对 γ_k^{\max} , γ_k^{\min} 以及 $\bar{\gamma}_k$ 的概率分布进行逼近。参数为 α 和 β 的伽马分布概率密度函数为^[6]

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha) \beta^{\alpha}} e^{-x/\beta}, \quad x \geq 0 \quad (6)$$

其中 $\Gamma(\bullet)$ 表示伽马函数。不妨用 $G(\alpha, \beta)$ 表示式(6)中的概率分布。随着 α 和 β 的变化, $G(\alpha, \beta)$ 提供了一大类波形。例

如: 自由度为 n 的卡方分布 $G(n/2, 2)$; 又如埃尔朗分布 $G(n, 1/n\mu)$, $\mu > 0$ 。特别地, 当数据流个数为 1, γ_k^{\max} , γ_k^{\min} 以及 $\bar{\gamma}_k$ 都服从卡方分布; 另一方面, 当 n 从 1 变化到无穷大, 埃尔朗分布从随机的指数分布过渡到确定的常数分布, 这与多用户分集的渐近特性^[7]相似。下面首先用最大似然参数估计法对 α 和 β 进行估计, 然后利用卡方实验检验前述逼近的准确程度, 最后基于分布假设分析多用户分集的系统性能。

3.1 最大似然参数估计

假设 X_i , $i \in [1, N_s]$ 为一组独立同分布的伽马随机变量, 具有未知的参数 α 和 β 。构造对数似然函数:

$$L(X_1, X_2, \dots, X_{N_s}; \alpha, \beta) = \ln \prod_{i=1}^{N_s} f(X_i = x_i; \alpha, \beta) \quad (7)$$

其中 x_i 为各随机变量的样本值; $f(X_i = x_i; \alpha, \beta)$ 由式(6)给出。利用最大似然参数估计, 令

$$\partial L / \partial \alpha|_{\alpha=\hat{\alpha}} = 0, \quad \partial L / \partial \beta|_{\beta=\hat{\beta}} = 0 \quad (8)$$

将式(6), 式(7)代入式(8)得

$$N_s \ln \hat{\beta} - \frac{N_s}{\Gamma(\hat{\alpha})} \Gamma'(\hat{\alpha}) + \sum_{i=1}^{N_s} \ln x_i = 0 \quad (9)$$

$$\hat{\beta} = \hat{\alpha} / \left(\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} x_i \right) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得

$$\ln \hat{\alpha} - \frac{\Gamma'(\hat{\alpha})}{\Gamma(\hat{\alpha})} = \ln \left(\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} x_i \right) - \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \ln x_i \quad (11)$$

依据式(2), 式(3)通过蒙特卡罗仿真选取随机变量的 N_s 个样本, 代入式(10), 式(11)可得 α 和 β 的估计。考虑到数值计算复杂度, 用 $\Gamma(\alpha)$ 的近似公式^[8]对式(11)进行简化, 即 $\Gamma(\alpha) \approx \sqrt{2\pi} \alpha^{a-0.5} e^{-a}$ 。

3.2 利用卡方实验进行分布假设检验

采用卡方实验法^[6]检验 3.1 节中分布假设的准确程度。以检验 γ_k^{\max} 的分布为例来说明。首先按 3.1 节的描述, 计算 α 和 β 的最大似然估计 $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 。建立假设 H_0 : γ_k^{\max} 服从 $G(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 所描述的伽马分布; 以及 H_1 : γ_k^{\max} 并不服从 $G(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 所描述的伽马分布。依据式(2), 式(3), 通过蒙特卡罗仿真选取 N_s 个样本, 将样本值按大小分为 10 组, 并计算卡方统计量

$$\chi_{\text{stat}}^2 = \sum_{i=1}^{10} \frac{(U_i - V_i)^2}{V_i} \quad (12)$$

其中 U_i 为落入第 i 区间的样本数; V_i 为落入第 i 区间的样本数的期望值, 即

$$V_i = N_s (F(L_{i+1}) - F(L_i)) \quad (13)$$

其中 L_i 为第 i 区间的下限; $F(x)$ 表示所假设分布的累积概率密度函数。假设给定的显著水平为 σ , 查表可得卡方概率密度的上侧分位数 $\chi_{\sigma}^2(7)$ (在本节所描述的情形下, 卡方变量的自由度为 7)。若式(12)中的卡方统计量满足 $\chi_{\text{stat}}^2 < \chi_{\sigma}^2(7)$, 则接受假设 H_0 ; 否则拒绝 H_0 。

作为示例, 图 1 比较了伽马分布理论曲线与由蒙特卡罗

仿真所得到 γ_k^{\max} 和 γ_k^{\min} 的统计结果。设 $\rho = 20$ dB, $M = 6$, $N = 6$, 样本点 $N_s = 10^5$, 伽马分布的参数由 3.1 节中的算法估计所得。显然, 理论曲线和仿真所得的信噪比分布能够很好地吻合。在第 4 节中将给出大量卡方实验结果, 以验证前述逼近的准确性。

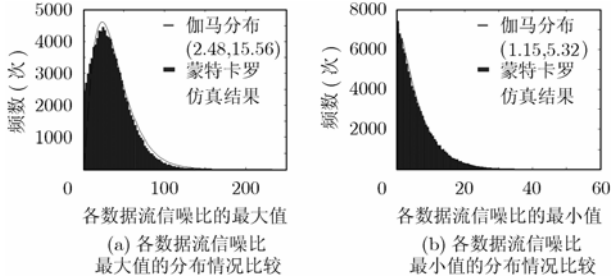


图1 伽马分布理论曲线与蒙特卡罗仿真结果比较

3.3 多用户分集的性能分析

文献[4,9]等所给出的几种多用户分集方案依次为: Max ZF, Best stream, Max min. Max ZF 选择采用迫零线性接收机时, 获得容量最大的用户, 容量如下式所示

$$C_1 = \max_{k \in [1, K]} \sum_{i=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{E_s}{MN_0} \frac{1}{\left[(\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \right]_{i,i}} \right] \quad (14)$$

该方案需要的反馈信息是各用户的瞬时容量大小。Best stream 在所有用户的所有数据流中选择使得容量最优的 M 个, 其容量可表示为

$$C_2 = \sum_{i=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{E_s}{MN_0} \max_{k \in [1, K]} \frac{1}{\left[(\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \right]_{i,i}} \right] \quad (15)$$

该方案所需要的反馈信息是所有数据流的瞬时信噪比大小。Max min 选择最差数据流(即瞬时信噪比最小的数据流)信噪比最大的用户, 该方案的容量如式(16)所示。

$$C_3 = \sum_{i=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{E_s}{MN_0} \frac{1}{\left[(\mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)^{-1} \right]_{i,i}} \right], \quad j = \arg \max_{k \in [1, K]} \gamma_k^{\min} \quad (16)$$

该方案所需要的反馈信息是各用户最差数据流的瞬时信噪比大小。

采用 Best stream 要求各用户反馈所有数据流的信噪比大小, 该方案反馈、前馈信息均是其他两个方案的 M 倍; 此外, 被选择的用户需采用迫零检测(其复杂度与同时检测 M 个数据流基本相同)来检测被分配的单个数据流, 所有用户的平均接收处理复杂度增加了 M 倍。相对于 Best stream, 其余两种方案能够获得反馈、前馈信息、复杂度和系统性能的较好折衷, 下文主要分析 Max ZF 以及 Max min 的容量性能。

直接分析 C_1 的概率分布较困难。可以利用 \log 函数的凸性, 对其进行适当放大, 即

$$C_1 \leq C_{u1} = M \max_k \log_2 \left[1 + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{E_s}{MN_0} \frac{1}{\left[(\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \right]_{i,i}} \right] \leq C_{u2} = M \log_2 \left[1 + \frac{E_s}{MN_0} \max_k \gamma_k^{\max} \right] \quad (17)$$

根据式(14)、式(16), 对次最优的多用户分集方案 Max min, 用式(17)中的 C_{u1} , C_{u2} 作为 C_3 的上界。并且可以根据式(16)构造 C_3 的下界, 即

$$C_3 \geq C_l = M \log_2 \left[1 + \frac{E_s}{MN_0} \frac{1}{\left[(\mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)^{-1} \right]_{i,i}} \right], \quad j = \arg \max_k \gamma_k^{\min}, \quad i = \arg \min_l \gamma_{j,l} \quad (18)$$

假定 γ_k^{\max} , γ_k^{\min} 以及 $\bar{\gamma}_k$ 分别服从 $f_1(\gamma) = G(\hat{\alpha}_1, \hat{\beta}_1)$, $f_2(\gamma) = G(\hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2)$ 和 $f_3(\gamma) = G(\hat{\alpha}_3, \hat{\beta}_3)$ 所描述的伽马分布(设累计概率密度函数分别为 $F_1(\gamma)$, $F_2(\gamma)$, $F_3(\gamma)$)。由式(17), Max ZF 的各态历经容量满足

$$\varepsilon(C_1) \leq \varepsilon(C_{u2}) = \int_0^{+\infty} C_{u2} g(\gamma) d\gamma \quad (19)$$

其中 $g(\gamma)$ 为 $\gamma = \max_{k \in [1, K]} \gamma_k^{\max}$ 的概率密度函数。根据顺序统计量理论^[6], 对 $k \in [1, K]$, $g(\gamma)$ 满足

$$g(\gamma) = K (F_1(\gamma))^{K-1} f_1(\gamma) \quad (20)$$

同理, 可以根据 $F_3(\gamma)$ 和 $f_3(\gamma)$ 求得较紧的上界 $\varepsilon(C_{u1})$, 此处不再赘述。

由式(18)可得

$$\varepsilon(C_3) \geq \varepsilon(C_l) = \int_0^{+\infty} C_l h(\gamma) d\gamma \quad (21)$$

其中 $h(\gamma)$ 为 $\gamma = \max_{k \in [1, K]} \gamma_k^{\min}$ 的概率密度函数, 满足

$$h(\gamma) = K (F_2(\gamma))^{K-1} f_2(\gamma) \quad (22)$$

下面分析用户总数 K 趋于无穷大时, 系统容量的渐近性能。根据文献[10]的引理 1, 一组独立同分布的随机变量 Z_k , $k \in [1, K]$, 若其累积概率密度 $F_Z(z)$ 和概率密度 $f_Z(z)$ 满足

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \left[\frac{1 - F_Z(z)}{f_Z(z)} \right] = c > 0 \quad (23)$$

则当 K 趋于无穷大时, $\max_{k \in [1, K]} Z_k$ 趋近于 l_K , 其中 l_K 满足

$$F_Z(l_K) = 1 - 1/K \quad (24)$$

容易证明 $G(\alpha, \beta)$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 所描述分布满足式(23)。由式(6), $F_Z(l_K)$ 可化为不完全伽马函数的形式, 即

$$F_Z(l_K) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{l_K/\beta} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (25)$$

式(25)很难得到闭式表达, 下面针对 α 为正整数的情况, 考察其渐近性能(通常估计所得的参数并不一定为整数, 但这并不影响对容量渐近特性的分析)。式(25)由分步积分可简化为^[11]

$$F(l_K) = 1 - \sum_{i=0}^{\alpha-1} \frac{l_K^i}{\beta^i \alpha!} e^{-l_K/\beta} \quad (26)$$

结合式(24), 可得 $l_K = \beta \ln K + O(\ln(\ln K))$, 其中 $O(\cdot)$ 表示同阶无穷大。可以看出, K 趋于无穷大时

$\max_{k \in [1, K]} \gamma_k^{\max}$, $\max_{k \in [1, K]} \gamma_k^{\min}$ 以及 $\max_{k \in [1, K]} \bar{\gamma}_k$ 均随 $\ln K$ 呈线性增长, 即 C_{u1} , C_{u2} 和 C_l 均随 $\ln(\ln K)$ 呈线性增长。

4 仿真结果与分析

假设基站到各用户间为相互独立的瑞利平坦衰落信道, 并至少在一个调度周期内保持不变。表 1 和表 2 给出了接收天线上平均信噪比 ρ 分别为 0dB, 20dB 时, 不同天线数条件下参数估计以及卡方实验的结果。设卡方实验显著水平 $\sigma = 0.01$ ($\chi_{0.01}^2(7) = 18.48$)。上标 “#” 表示假设 H_0 被拒绝。可以看出, 绝大多数情况下假设 H_0 能够被接受, 这证明特定参数的伽马分布能较好地逼近 γ_k^{\max} , γ_k^{\min} 和 $\bar{\gamma}$ 的实际分布。

图 2 所示 ρ 为 0 或 20dB, K 较小或适中时, Max ZF, Max min 等方案各态历经容量随 K 变化的情况。作为比较, 图中还给出了各态历经系统容量的上界 $\varepsilon(C_{u1})$ (上界 1), $\varepsilon(C_{u2})$ (上界 2) 和下界 $\varepsilon(C_l)$ (下界)。可以看出前述方案的各态历经容量处于上、下界之间。并且, 与 C_{u2} 相比, 上界 C_{u1} 更紧。在不同信噪比、天线数条件下, 随着 K 的增加, 多用户分集增益都呈现上升趋势。

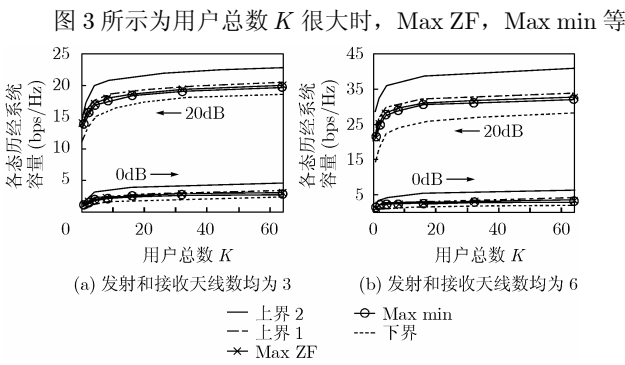


图 2 K 适中时多用户分集方案的各态历经容量

方案容量的渐近特性。随 K 的增大, 容量的增长趋势减缓, 这与 3.3 节中多用户分集方案容量的渐近分析一致。用户数量 $K \leq 10^3$ 时, 已可以获得绝大部分的多用户分集增益。此时, 进一步增大用户数量并不能带来更多的容量增益, 反而可能引起更大的传输时延。同时, 可以看到随用户数的不断增长, 所给出的上、下界非常接近各态历经系统容量, 这表明依据 3.3 节中的分析, 可以得出多用户分集增益的大致范围, 从而为多天线多用户系统设计提供一定参考。

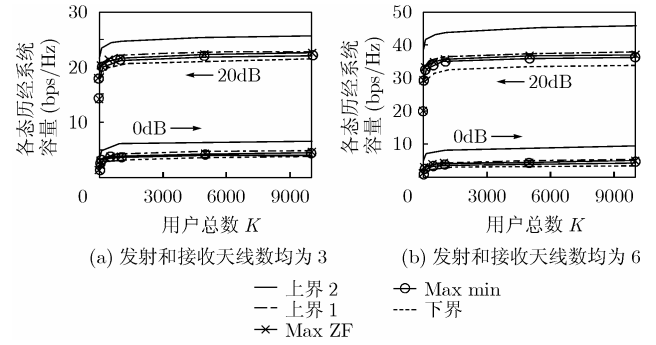


图 3 K 较大时多用户分集方案的渐近容量特性

5 结束语

本文针对采用线性迫零接收机的多天线系统, 分析了多种多用户分集方案的性能。利用分布假设检验和最大似然参数估计的方法, 对多个数据流信噪比最大、最小值以及均值的概率分布进行逼近。基于此进一步分析了多用户分集的容量增益及其渐近特性。卡方实验验证了前述逼近的准确性。仿真结果表明, 本文的分析能更好地衡量多用户分集增益的大小。本文的研究为多天线多用户系统设计提供了有益的参考。

表 1 $\rho = 0$ dB 时不同天线数条件下参数估计以及卡方实验的结果

N	M	γ_k^{\max}			γ_k^{\min}			$\bar{\gamma}$		
		$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	χ_{stat}^2	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	χ_{stat}^2	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	χ_{stat}^2
3	2	2.90	0.45	12.93	2.32	0.29	18.82 [#]	3.26	0.31	9.16
	3	1.68	0.32	8.29	1.09	0.15	14.24	1.794	0.19	13.01
	6	7.53	0.41	14.14	6.10	0.32	11.20	8.73	0.29	10.55
6	3	7.33	0.26	14.19	5.12	0.17	16.91	8.93	0.15	13.06
	4	6.34	0.18	5.48	3.89	0.11	10.77	7.61	0.09	17.10
	5	4.48	0.16	14.41	2.55	0.07	23.69 [#]	5.03	0.08	13.99
6	2.19	0.16	13.01	1.15	0.05	17.28	2.24	0.07	19.42 [#]	

表 2 $\rho = 20$ dB 时不同天线数条件下参数估计以及卡方实验的结果

N	M	γ_k^{\max}			γ_k^{\min}			$\bar{\gamma}$		
		$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	χ_{stat}^2	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	χ_{stat}^2	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	χ_{stat}^2
3	2	2.89	45.34	15.67	2.19	31.72	7.399	3.24	31.02	19.22 [#]
	3	1.65	32.81	16.24	1.11	14.98	4.97	1.85	17.93	16.32
	6	7.40	41.21	11.39	6.11	31.68	16.39	8.73	28.75	14.84
6	3	7.35	25.21	19.16 [#]	5.13	17.03	11.41	8.92	14.98	16.65
	4	6.41	18.25	16.13	3.94	10.70	13.39	7.59	9.87	12.07
	5	4.51	15.70	13.04	2.54	7.39	16.79	5.05	7.86	14.56
6	2.48	15.56	11.23	5.32	1.15	8.11	2.20	7.55	14.22	

参 考 文 献

- [1] Foschini G J, Golden G D, and Valenzuela R A, *et al.*. Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays. *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, 1999, 17(11): 1841-1852.
- [2] Gore D A, Heath R W, and Paulraj A J. Transmit selection in spatial multiplexing systems. *IEEE Commun. Letters*, 2002, 6(11): 491-493.
- [3] Knopp R and Humblet P. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications. *IEEE Int. Conf. Commun.*, Seattle, WA, United States, 1995: 331-335.
- [4] Heath R W, Airy M, and Paulraj A. Multiuser diversity for MIMO wireless systems with linear receivers. *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA. 2001: 1194-1199.
- [5] Paulraj A, Nabar R, and Gore D. *Introduction to Space-Time Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 148-162.
- [6] 现代应用数学手册编委会. 现代应用数学手册概率与随机过程卷. 北京: 清华大学出版社, 1999: 188-214.
- [7] Hochwald B M, Marzetta T L, and Tarokh V. Multiple antenna channel hardening and its implications for rate feedback and scheduling. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50(9): 1893-1909.
- [8] 数学手册编写组. 数学手册. 北京: 人民教育出版社, 1979: 587-590.
- [9] Hakju L, Myeongcheol S, and Chungyong L. An eigen-based MIMO multi-user scheduler with partial feedback information. *IEEE Commun. Letters*, 2005, 9(4): 328-330.
- [10] Jiang J, Buehrer R M, and Tranter W H. Antenna diversity in multiuser data networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2004, 52(3): 490-497.
- [11] Papoulis A and Pillai S U 著, 保铮, 冯大政等译. 概率、随机变量与随机过程. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 64-72.
- 曾二林: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为多天通信系统及其信号处理技术.
- 朱世华: 男, 1950 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事数字通信、移动通信和个人通信系统的研究.
- 廖学文: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为超宽带通信技术.