

多用户MIMO系统中一种基于一位反馈信息的调度算法

刘建国 杨绿溪

(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 针对多用户 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 无线通信系统潜在的多用户分集增益, 该文提出了一种基于一位反馈信息的多用户调度算法。理论分析表明, 设置合理的门限可以从统计意义上最大化系统平均频谱效率。同时, 该文从理论上对最优门限的选择进行了分析。仿真结果表明所提算法可有效利用多用户分集来提高系统的频谱性能。

关键词: 无线通信; 多输入多输出; 有限反馈; 多用户分集; 调度算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2431-04

A Scheduling Algorithm with One-Bit Feedback for Multi-user MIMO System

Liu Jian-guo Yang Lü-xi

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To exploit multi-user diversity for multi-user MIMO system, a scheduling algorithm is proposed based on one-bit feedback information in this paper. It is proved in this paper that the value of threshold is important for the system performance, and the problem how to select the optimum threshold for multi-user MIMO systems is solved through theoretical analysis. Simulation results show that the proposed scheme achieves good performance in terms of the average system spectral efficiency by exploiting the multiuser diversity.

Key words: Wireless communication; Multiple-Input Multiple-Output (MIMO); Limited feedback; Multiuser diversity; Scheduling algorithm

1 引言

信息论表明, 通过在发射端和接收端同时配置多根天线能够有效地提高系统的频谱利用率, 利用MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)系统进行信号传输是未来移动通信的关键技术之一^[1, 2]。在多用户环境下, 利用多用户分集技术可以进一步提高系统频谱利用率。利用小区内各用户信道彼此独立随机衰落特性, 每个用户将其信道质量信息(Channel Quality Indication, CQI)反馈给基站, 基站选择信道条件最好的用户使用信道资源, 从而提高系统吞吐量, 也意味着通过合适的调度算法可以获取多用户系统潜在的多用户分集增益^[3]。

单天线(Single-Input Single-Output, SISO)多用户分集概念早在1995年由Knopp和Humblet提出^[3], 近来, 针对多天线多用户系统的调度算法研究引起了广泛关注^[4-8]。与点对点系统不同的是, 多用户系统的容量提升与发射端是否已知信道信息密切相关。虽然在很多应用场景下发射端不太可能获得所有请求用户的信道状态信息(Channel State

Information, CSI), 但每个用户的部分信道信息可以通过反馈信道报告给发射端, 利用各用户的反馈信息, 通过调度算法能充分利用多用户分集来提高系统容量^[4]。然而, 多用户分集系统大量的信息反馈给系统造成了巨大开销。在反馈信道带宽受限的情况下, 大量的反馈可能成为系统支持用户数的限制性因素。

减少反馈量可以从反馈信息的量化、编码等角度入手, 也可以实施部份信道信息反馈策略。为此, 针对单天线多用户系统, 文献[7]提出了一种基于一位反馈信息的调度算法, 该算法利用多用户分集特性来提高系统的吞吐量。然而, 针对多天线多用户系统, 由于求解最优门限比较复杂, 目前还没有相关文献对此进行相关研究。在此基础上, 本文针对多用户 MIMO 系统, 提出了一种基于一位反馈信息的调度算法。该算法的核心思想是: 在每个时隙内, 基站根据小区内各用户信道容量与给定的容量门限 C_{th} 的比较结果(反馈的一比特状态信息), 按信道条件将用户分为两类, 然后将从信道条件好的用户中选择一个用户占用信道资源; 通过设置合理的门限值 C_{th} , 可以充分获得多用户分集增益。在该调度算法中门限 C_{th} 的选取至关重要, 针多用户 MIMO 系统, 本文从理论上对最优门限的选择进行了分析。理论分析和仿真表明所提算法可有效利用多用户分集来提高系统频谱性能。

2007-04-16 收到, 2007-08-10 改回

国家重点基础研究发展计划(2007CB310603), 国家自然科学基金(60672093, 60496310), 国家 863 项目(2007AA01Z262), 江苏省自然科学基金(BK2005061)和华中高校基金资助课题

2 系统模型

考虑多用户 MIMO 系统的下行链路, 小区内需要服务的用户总数为 K , 基站配置了 N_t 根发射天线, 各用户均配置了 N_r 根天线, 通常有 $N_r \geq N_t$ 。假设各用户信道为准静态平坦瑞利衰落信道, 即信道在一帧内保持不变, 在帧间独立变化, 其元素服从复高斯分布 $\mathcal{CN}(0,1)$ 。则第 k 个用户等效基带接收信号可以表示为

$$\mathbf{y}_k = \sqrt{\frac{E_s}{N_t}} \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

其中 \mathbf{H}_k 为用户 k 的 $N_r \times N_t$ 维信道矩阵; \mathbf{y}_k 为 $N_r \times 1$ 维的接收信号矢量; E_s 为总发射信号能量; \mathbf{s}_k 为 $N_t \times 1$ 维发射信号矢量, 并有 $E[\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H] = \mathbf{I}_{N_t}$, 其中 $E[\cdot]$ 为数学期望运算; \mathbf{n}_k 表示 $N_r \times 1$ 维的噪声矢量, 其元素服从复高斯分布 $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 。

空分复用 MIMO 系统接收的信号由相互干扰的数据流组成, 可以在接收端采用迫零 (Zero-Forcing, ZF) 检测方法, 将接收的信号分解成 N_t 路完全消除符号间干扰的相互独立的数据流。在接收端采用 ZF 检测时, 用户 k 的第 i 路数据流的检测信噪比 (SNR) 可以表示为

$$\gamma_{k,i} = \frac{E_s}{N_t \sigma_n^2 \left[(\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \right]_{ii}} \quad (2)$$

假设基站发射天线间与各用户接收天线间都不存在空间相关性, 此迫零均衡后的 N_t 路数据流相互独立, 且各检测信噪比具有相同的概率分布。每路数据流的检测信噪比的概率分布函数 (Probability Distribution Function, PDF) 可表示为^[9]

$$f(\gamma_{k,i}) = \frac{N_t \sigma_n^2 e^{-\frac{\gamma_{k,i} N_t \sigma_n^2}{E_s}}}{E_s (N_r - N_t)! \left(\frac{\gamma_{k,i} N_t \sigma_n^2}{E_s} \right)^{N_r - N_t}}, \quad k = 1, \dots, K, \quad i = 1, \dots, N_t \quad (3)$$

3 调度算法

对时分多址 (Time Division Multiple Address, TDMA) 系统而言, 在每个时隙内基站只调度一个用户用于发射或接收。假设基站调度用户 k 用于接收信号时, 多天线的瞬时信道容量 C_k 由第 k 个用户的 N_t 个子信道信道容量组成, 且可以表示为

$$C_k = \sum_{i=1}^{N_t} C_{k,i} \quad (4)$$

其中 $C_{k,i}$ 为用户 k 第 i 个子信道容量, 可表示为

$$C_{k,i} = \log_2(1 + \gamma_{k,i}) = \log_2(1 + \log_2(1 + \gamma_{k,i})) \quad (5)$$

其中 $\gamma_{k,i}$ 为式 (2) 定义的第 k 个用户第 i 路数据流的检测信噪比。

由文献 [5] 可知, 在已知各用户信道信息的情况下, 基站将调度信道容量最高的用户使用信道, 将使系统获取潜在的多用户分集增益。然而, 在这种情况下, 要求小区内用户反

馈信道信息 (CSI/CQI) 到基站, 当反馈信道带宽受限以及小区内用户数较多时, 在实际系统中, 这种反馈方式并不可行。为了在反馈负荷和系统可获得的吞吐量之间进行折衷, 本文仅需小区内各用户反馈一比特信息用于基站调度, 使系统在具有最少反馈开销的情况下, 最大限度地获取多用户分集增益。小区内用户反馈的一位状态信息可表示为

$$\mathcal{I}_k = \begin{cases} 1, & C_k \geq C_{th} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

其中 C_{th} 为系统容量门限值。

假设小区内用户有精确的信道估计, 在每个时隙内, 用户将其瞬时信道容量和门限值 C_{th} 进行比较, 并且将结果 \mathcal{I}_k 报告给基站, 基站根据用户的反馈信息, 将用户分成两大类, 一类为合格用户 $\mathcal{S}_Q = \{k | \mathcal{I}_k = 1, 1 \leq k \leq K\}$, 另一类为不合格用户 $\mathcal{S}_U = \{k | \mathcal{I}_k = 0, 1 \leq k \leq K\}$ 。在第一类用户数大于 0 的情况下, 基站将从合格用户 \mathcal{S}_Q 中随机选取一个用户占用信道资源, 否则基站将从第二类用户 \mathcal{S}_U 中将随机选取一个用户占用信道资源。上述就是本文提出的基于一位反馈信息的多用户 MIMO 系统的调度算法, 可用下式表示:

$$\bar{k}(K, C_{th}) = \begin{cases} \mathcal{R}(\mathcal{S}_Q), & \mathcal{S}_Q \neq \emptyset \\ \mathcal{R}(\mathcal{S}_U), & \mathcal{S}_Q = \emptyset \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\bar{k}(K, C_{th})$ 为被调度用户, 在给定信道条件下, 其与小区服务用户总数 K 和门限 C_{th} 有关, $\mathcal{R}(\mathcal{S})$ 表示从 \mathcal{S} 类用户中随机调度一个用户占有信道资源。

如上所述, 在小区内用户数 K 一定的情况下, 门限值的选取与系统性能有直接的关系。如果门限值 C_{th} 选取过小, 基站将使更多信道条件不好的用户划分到第一类用户 \mathcal{S}_Q 中, 如果门限值 C_{th} 选取的过大, 可能导致第一类用户为 0, 从而使基站从第二类用户 \mathcal{S}_U 中调度用户, 因此不合理的门限将使系统的吞吐量下降。综上所述, 门限值的选取对本文所提出的调度算法性能至关重要, 下一节将从理论上对最优门限的选择进行分析。

4 门限选择

在 TDMA 系统中, 系统容量可以用最大可获得的平均系统频谱效率 (Maximal Average System Spectral Efficiency, MASSE) 表示。在本文中将以 MASSE 为目标函数, 对最优门限的选择进行分析。从统计意义上讲, 所获得的平均系统频谱效率 MASSE 可表示为

$$\text{MASSE}(K, C_{th}) = E\{\bar{C}_k\} \quad (8)$$

式中 \bar{k} 为被调度用户。

在小区用户数 K 以及信道统计特性一定的情况下, 目标函数 $\text{MASSE}(K, C_{th})$ 是关于门限 C_{th} 的函数, 由凸优化理论可知, 目标函数存在最优解, 因此可以通过计算获取最优门限 C_{th} 。然而, 要在理论上分析最优门限 C_{th} , 必须知道信道的统计特性, 即关于瞬时信道容量 C_k 的概率分布函数。由式 (3) 可知, 用户 k 的第 i 路数据流的检测信噪比 $\gamma_{k,i}$ 的概

率分布函数, 则根据随机变量变换定理^[10], 用户 k 的第 i 路数据流的信道容量 $C_{k,i}$ 的概率分布函数 $f(C_{k,i})$ 必有

$$f(C_{k,i}) = f\left(\gamma_{k,i} \left| \gamma_{k,i} = 2^{C_{k,i}+1} \right.\right) J(\gamma_{k,i} \rightarrow C_{k,i})$$

$$= \frac{2^{C_{k,i}} (\ln 2) N_t \sigma_n^2 e^{-\frac{(2^{C_{k,i}+1}) N_t \sigma_n^2}{E_s}}}{E_s (N_r - N_t)!} \left(\frac{(2^{C_{k,i}+1}) N_t \sigma_n^2}{E_s} \right)^{N_r - N_t},$$

$k = 1, \dots, K, i = 1, \dots, N_t$ (9)

式中 J 为雅可比(Jacobi)变换式, 且定义为

$$J(\gamma_{k,i} \rightarrow C_{k,i}) = \frac{\partial(\gamma_{k,i})}{\partial(C_{k,i})} = 2^{C_{k,i}+1} \ln 2 \quad (10)$$

如第 2 节所描述, 检测信噪比 $\gamma_{k,i}$ ($i = 1, \dots, N_t, k = 1, \dots, K$) 为独立同分布的随机变量, 由随机过程理论可知, $C_{k,i}$ ($i = 1, 2, \dots, N_t, k = 1, 2, \dots, K$) 亦为独立同分布的随机变量, 且定义其概率分布函数为 $f_1 = f(C_{k,i})$, $i = 1, \dots, N_t, k = 1, \dots, K$. 假设随机变量 C_k^2 定义为 $C_k^2 = C_{k,1} + C_{k,2}$, 则根据随机过程分布函数法^[10], 可求出随机变量 C_k^2 的概率分布函数 $f_2(c_k^2)$:

$$f_2(c_k^2) = \int_0^{+\infty} f_1(c_k^2 - x) f_1(x) dx \quad (11)$$

同理, 由式(9)和式(11)推导出随机变量 $C_k^3 = C_k^2 + C_{k,3}$ 的概率分布函数 $f_3(c_k^3)$:

$$f_3(c_k^3) = \int_0^{+\infty} f_2(c_k^3 - x) f_1(x) dx \quad (12)$$

最后, 经过 $N_t - 1$ 步推导, 可以求出随机变量 $C_k^{N_t} = C_k^{N_t-1} + C_{k,N_t}$ 的概率分布函数 $f_{N_t}(c_k^{N_t})$, 定义为 $f_c(C_k) = f_{N_t}(c_k^{N_t})$, $k = 1, \dots, K$.

假设小区用户信息 \mathcal{I}_k 经无差错、低时延控制信道反馈给基站, 在给定门限 C_{th} 的情况下, 根据上述调度算法, 目标函数可表示为

$$\text{MASSE}(K, C_{th}) = f_Q(0, C_{th}, K) R_U(C_{th}) + (1 - f_Q(0, C_{th}, K)) R_Q(C_{th}) \quad (13)$$

式中 $f_Q(k, C_{th}, K)$ 表示为 K 个用户中至少有 k 个用户被划分在 \mathcal{S}_Q 中的概率分布函数

$$f_Q(k, C_{th}, K) = \binom{K}{k} \left(\int_{C_{th}}^{+\infty} f_c(x) dx \right)^k \left(1 - \int_{C_{th}}^{+\infty} f_c(x) dx \right)^{K-k} \quad (14)$$

式(13)中, R_U 表示第二类用户 \mathcal{S}_U 所期望贡献的系统吞吐率, R_Q 表示第一类用户 \mathcal{S}_Q 所期望贡献的系统吞吐率, 可定义为如下形式:

$$R_U(C_{th}) = E(C_k | C_k < C_{th}) = \frac{\int_0^{C_{th}} x \cdot f_c(x) dx}{\int_0^{C_{th}} f_c(y) dy} \quad (15)$$

$$R_Q(C_{th}) = E(C_k | C_k > C_{th}) = \frac{\int_{C_{th}}^{+\infty} x \cdot f_c(x) dx}{\int_{C_{th}}^{+\infty} f_c(y) dy}$$

综上所述, 式(13)中所定义的目标函数极大值问题可转化为如下最优化问题:

$$C_{th}(K) = \arg \max_C \{ \text{MASSE}(K, C) \} \quad (16)$$

式中 $C_{th}(K)$ 即为所求解的最优门限值。

然而, 由于式(16)涉及非线性规划问题, 很难直接获得最优解。在已知信道统计特性和小区服务用户的条件下, 本文采用 MATLAB 函数 `fminbnd` 来求解此非线性规划问题。

5 仿真结果

不失一般性, 本文假设基站配置 2 根发射天线, 用户端配置 4 根接收天线, 信道模型为第 2 节描述的准静态平坦瑞利衰落信道模型。且假设各用户接收端具有相同的噪声方差, 仿真图中信噪比定义为 $\text{SNR} = E_s / \sigma_n^2$, 每个点的 Monte Carlo 仿真信道数为 10^6 。本文通过计算机仿真方法, 获得了在不同系统配置时的最优门限值和平均频谱效率(如表 1 所示), 并将数值计算门限值作为第 3 节式(6)的门限。

图 1 给出了本文所提出的调度算法所获得的最大的平均系统频谱效率 MASSE 随小区用户数变化的性能曲线, 并与不需要反馈量的循环(Round Robin)调度算法^[11]以及需要小区内用户均反馈 CQI 给基站的最优调度算法的性能进行了比较。如图 1 所示, 本文方案和最优调度方案性能明显优于循环方案, 并随着小区内用户数的增加而增加, 这是由于利用多用户分集的结果。通过分析发现, 尽管本文方案和最优调度方案在性能方面存在略微的差异, 但是本文方案的反馈量远远小于最优调度方案的反馈量, 此外, 本文方案仿真性能几乎与理论分析性能接近, 说明本文所提出的调度算法对最优门限的选择是有效的。

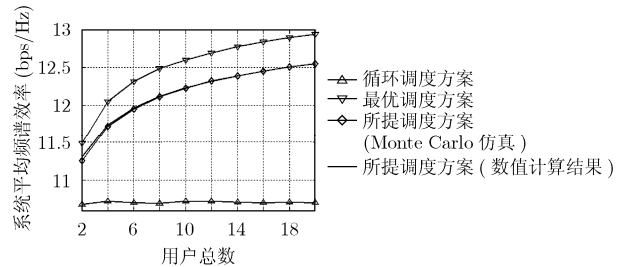


图 1 几种不同调度算法的平均频谱效率(SNR=15dB)

表 1 在小区服务用户数不同的条件下所获得的计算机仿真最优门限值和理论频谱效率(SNR = 15dB)

用户数 K	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
C_{th} (bps/Hz)	10.717	11.218	11.477	11.649	11.776	11.875	11.957	12.025	12.085	12.136
MASSE(bps/Hz)	11.308	11.737	11.965	12.116	12.229	12.317	12.390	12.452	12.505	12.552

6 结束语

针对多用户MIMO系统潜在多用户分集增益, 本文提出了一种基于一位反馈信息的调度算法。通过设置合理的门限, 基站选择信道条件好的用户使用信道资源, 在某种意义上利用了多用户分集增益来提高系统频谱性能。不同于一般的调度算法, 本文所提出的调度算法仅需要一位反馈信息, 且可用于多天线的多用户系统。仿真结果表明该调度算法在减少小区用户反馈量和系统性能方面进行了很好的折衷。然而, 本文只考虑了理想信道模型, 其实接收端不可能精确估计信道信息以及反馈信道存在噪声, 因此在未来的研究将考虑更为实际的信道模型(包括反馈时延、信道估计误差等), 并分析这些因素对算法的影响, 以便于提出一种更具鲁棒性的方案。

参考文献

- [1] Foschini G J and Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels [J]. *European Trans. on Telecommunications*, 1999, 10(6): 585-595.
- [3] Knopp R and Humblet P. Information capacity and power control in single cell multiuser communications[C]. *IEEE International Conf. on Comm. (ICC)*, Seattle, 1995: 331-335.
- [4] Viswanath P, Tse D N C, and Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2002, 48(6): 1277-1294.
- [5] Yang L and Alouini M S. Performance analysis of multiuser selection diversity [J]. *IEEE Trans. on Veh. tech.*, 2006, 55(6): 1848-1861.
- [6] Corral-Briones G and Dowhuszko A A, *et al.* Downlink multiuser scheduling algorithms with HSDPA closed-loop feedback information [C]. *IEEE VTC (Vehicular Technology Conference)* spring, Stockholm, Sweden, 2005: 1120-1124.
- [7] Xue Y and Kaise T. Exploiting multiuser diversity with imperfect one-bit channel state feedback [J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007, 56(1): 183-193.
- [8] Tang T, Heath R W, Cho S, and Yun S. Opportunistic feedback for multiuser MIMO systems with linear receivers [J]. *IEEE Tran. on Communications*, 2007, 55(5): 1020-1032.
- [9] Gore D, Heath R W, and Paulraj A. On performance of the zero forcing receiver in presence of transmit correlation [C]. *ISIT 2002*, Lausanne, Switzerland, 2002: 159.
- [10] 夏乐天, 朱永忠. 工程随机过程 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2000: 10-13.
Xia Letian and Zhu Yongzhong. *Stochastic Processes in Engineering* [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2000: 10-13.
- [11] Shin O S and Lee K B. Antenna-assisted round robin scheduling for MIMO cellular systems [J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2003, 7(3): 109-111.

刘建国: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为MIMO通信信号处理、多用户信号处理。

杨绿溪: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、MIMO通信系统盲信号处理和自适应信号处理。