

基于位置信息的多用户 MIMO 下行调度算法

谢亚琴¹ 王炎² 朱鹏程²

摘要

基于移动台的位置信息,提出了基于移动台与基站之间的距离信息的多用户调度算法.针对特定的信道模型,分析了所提出的调度方法所需的吞吐量、反馈开销以及计算复杂度.理论和仿真结果表明:该调度方法所需反馈量明显降低且其所需计算量明显小于基于最大信噪比的调度方法.

关键词

多用户 MIMO 系统;位置信息;调度;信道状态信息;反馈开销

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

0 引言

在多用户多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)下行系统中,由于系统所能支持的并行传输的数据流个数受到基站发射天线数的限制,而且,由于成本的限制,基站端不可能无限制地增加发射天线的数目.因此,当系统中的用户数较多时,基站应首先从所有活跃用户中调度一小部分用户,然后对这些被调度的用户采用合适的预编码方案进行并行数据传输.然而,使用调度方案的前提是基站预先知道各用户的全部或部分信道状态信息(Channel State Information, CSI),在上下行链路非对称的系统(如频分双工(Frequency Division Duplexing, FDD)系统)中,这些信息一般由用户反馈给基站,但是,当发射天线数 N_t 大于或等于接收天线数 N_r ,或者当用户处于快速移动状态时,发射端很难已知全部的 CSI.

同时,在多用户系统中,当存在大量活跃用户时,即使是每个用户仅反馈 1 bit 的 CSI,所需要的反馈量也是相当巨大的.对于上行多用户系统,由于用户的能量受限,用于反馈 CSI 能量的消耗又必然导致上行数据传输阶段能量的减少.因此,在多用户 MIMO 系统中,如何在保证系统性能的前提下降低系统所需反馈量的研究具有重大的理论意义和实际研究价值.

由于 CSI 与移动终端所处的位置有关,且随着无线通信技术的发展和数据处理能力的提高,快速准确地获得移动终端的位置信息已变得十分便利.因此,本文提出了基于移动台的位置信息的多用户 MIMO 下行调度算法,该方法通过已有的定位方法获得用户的位置信息,将该位置信息转化为移动台与基站之间的距离信息,并从中选取距离基站最近的 N_t 个用户进行调度.

1 多用户 MIMO 系统模型

在多天线无线通信系统中,为了获得天线阵列所能提供的全部的潜力,构建一个精确的且易于处理的信道模型就显得尤为重要.多用户 MIMO(multiuser-MIMO, MU-MIMO)系统是指在基站端配置 N_t 根天线,用户端配置 N_r 根天线,基站同时为 K 个用户提供服务,其中, N_t 、 N_r 与 K 均为整数且满足 $N_t > 1$, $N_r \geq 1$, $K > 1$. 本文考虑窄带多天线下行信道^[1],假设系统中的每个活跃用户分散于小区的不同位置,且每个用户之间的距离足够远,则每个用户和基站之间的信道相互独立.

收稿日期 2012-10-16

资助项目 南京信息工程大学科研启动基金(20110437);东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2012D20);国家自然科学基金(61101086,61101082,61071112);江苏省自然科学基金(BK2011596)

作者简介

谢亚琴,女,博士,研究方向为无线定位技术、无线资源管理技术等. xyq@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室,南京,210044

2 东南大学 移动通信国家重点实验室,南京,210096

在通常情况下, $K \gg N_t, N_t \geq N_r$. 假设在给定的时隙 t , 系统中最大有效并行传输数据流的个数为 K_s . 根据文献[2], 在最优的预处理方案中, 如脏纸编码 (Dirty Paper Coding, DPC), 其最大有效并行传输数据流的个数不超过 N_t^2 . 对于迫零波束成形、随机波束成形等简化的线性预处理方案, 其允许接入的并行传输数据流的个数则不能超过 N_t . 因此, 本文的设计目标是设计一种有效的调度方案, 从具有 K 个活跃用户的 MU-MIMO 系统中, 选取 K_s 个用户进行并行数据传输, 其中 $1 \leq K_s \leq N_t^2$.

2 基于移动台与基站之间距离信息的多用户调度技术

在时变多用户 MIMO 系统中, 当发射端与接收端均已知 CSI 时, 最优的预处理方案为 DPC (脏纸编码), 但是在未来的宽带无线系统中, 随着系统中用户数的增加, 所需的反馈量急剧增加. 因此, 本文提出了一种可以有效地降低移动终端反馈量的多用户 MIMO 调度算法, 该方法基于移动台与基站之间的距离信息进行调度, 在每个时刻仅调度距离基站最近的几个用户. 随着无线通信技术和数据处理能力的提高, 实时准确地获得移动台的位置信息已经变得相当便利, 因而, 当系统中用户数比较多时, 这种方法使得多用户调度算法的复杂度大为降低, 基站端仅需要获得服务小区中活跃的用户的位置信息, 就可以快速选择被调度的用户. 同时, 与传统的每时刻仅调度信道状态信息最好的用户的调度方法相比 (该方法需要所有移动终端反馈各自的 CSI 回基站端), 该方法所需的反馈量大为降低.

2.1 调度算法

从已有文献中, 不难了解到, 基于最大信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 的调度算法通常调度的是信号最强的用户. 一般情况下, 信号最强的用户也即距离基站最近的用户. 基于这个结论, 本文提出了基于移动台与基站之间的距离信息的多用户 MIMO 调度算法. 该算法可以概括为以下 3 个阶段: 定位、反馈与调度.

2.1.1 定位

1) 初始化. 设基站位于坐标原点, 初始化用户到基站之间的距离信息为 D , 使得 $D = \text{zeros}(K, 1)$, 其中, K 表示系统中所有活跃的用户数.

2) For $k = 1$ to K .

执行定位算法, 得到用户 k 的位置信息, 从而可

以求得用户 k 与基站之间的距离信息 $D(k, 1)$.

End For.

2.1.2 反馈

1) 初始化. 设 $U_m = \{1, \dots, K\}$, $m = 1$, $S = \varphi$, $S_t = \{1, \dots, N_t\}$, $S_r = \{1, \dots, N_r\}$.

2) For $m = 1$ to N_t .

$\pi(m) = \arg \min_{k \in U_m} D(k, 1)$, $S \leftarrow S \cup \{\pi(m)\}$,

$U_{m+1} = U_m / \{\pi(m)\}$.

End For.

3) 通知集合 S 中用户, 计算各自的 SINR 值 (R_{SINR}), 并反馈回基站.

2.1.3 调度

1) 初始化. 设吞吐量 $R = 0$.

2) For $m = 1$ to N_t .

$B_m = \max_{n \in S_r, k \in S} R_{\text{SINR}, m, n}^{(k)}$,

$n^* = \arg_n \max_{n \in S_r, k \in S} R_{\text{SINR}, m, n}^{(k)}$,

$k^* = \arg_k \max_{n \in S_r, k \in S} R_{\text{SINR}, m, n}^{(k)}$,

$R = R + \log_2(1 + R_{\text{SINR}, m, n^*}^{(k^*)})$.

End For.

本算法的主要思想为: 基站首先利用已有的定位算法, 确定各个移动台的位置信息, 并将此位置信息转化为各个移动终端到基站的距离信息; 其次, 基站从 K 个移动终端中选取 N_t 个距离基站最近的移动台进行调度, 并通知被调度用户计算各自的 SINR 值并反馈回基站端; 最后, 对于每个发射天线 n_t , 分别求出使得 $R_{\text{SINR}, n_t, n_r^*}^{(k^*)}$ 最大的用户 k^* 以及该用户所对应的接收天线 n_r^* , 通知基站的第 n_t 个发射天线给第 k^* 个用户发射数据信号, 该用户使用天线 n_r^* 对基站端的发射信号进行解码并接收.

2.2 性能分析

2.2.1 吞吐量分析

为了分析方便, 本文仅以独立同分布 (independent and identically distributed, i. i. d) 信道为例进行分析, 也即假设信道模型为独立同分布的平坦瑞利衰落信道. 因此可以得到

$$E(R) = \sum_{M=1}^{N_t} E \log_2(1 + B_m), \quad (1)$$

其中, $B_m = \max_{n \in S_r, k \in S} R_{\text{SINR}, m, n}^{(k)}$. 将文献[1]中给出的 SINR 的表达式代入式(1), 则可得

$$B_m = \max_{n \in S_r, k \in S} \frac{|h_k(n_r, n_t)|^2}{\left(\sum_{n'_r \neq n_r, n'_t \in S_t} |h_k(n_r, n'_t)|^2 + \frac{N_t}{\gamma_k} \right)},$$

其中, $h_k(n_r, n_t)$ 表示从基站的第 n_t 个发射天线到用户 k 的第 n_r 个接收天线的信道增益. 与文献[3]类似, B_m 又可以近似表示为

$$B_m \approx \max_{l \in \{1, \dots, N_t N_r\}} Z_l, \quad (2)$$

其中, $Z_l \triangleq \frac{|g_l|^2}{\left(\frac{N_t}{\gamma_l} + \sum_{j=1}^{N_t} |\tilde{g}_{l,j}|^2 - |\tilde{g}_{l,l}|^2\right)}$, 且对所有

的 $l = 1, \dots, N_t N_r$ 以及 $j = 1, \dots, N_t$, $g_l, \tilde{g}_{l,j} \sim CN(0,$

$1)$. 令 $X_l = |g_l|^2, Y_l = \sum_{j=1}^{N_t} |\tilde{g}_{l,j}|^2 - |\tilde{g}_{l,l}|^2$, 且 $\frac{N_t}{\gamma_l} = c_l$, 则得 $X_l \sim \chi^2(2), Y_l \sim \chi^2(2N_t - 2)$, Z_l 又可以写为

$$Z_l = \frac{X_l}{(c_l + Y_l)},$$

根据文献[4], 可以得到 Z_l 的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 和累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 分别为

$$f_{Z_l}(t) = \frac{e^{-c_l t} [c_l(1+t) + N_t - 1]}{(1+t)^{N_t}}, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

$$F_{Z_l}(t) = 1 - \frac{e^{-c_l t}}{(1+t)^{N_t-1}}, \quad t \geq 0. \quad (4)$$

设 $U = \max_{l \in \{1, \dots, N_t N_r\}} Z_l$, 根据排序统计理论^[5] 可得

U 的 CDF 为 $F_U(t) = \prod_{l=1}^{N_t N_r} F_{Z_l}(t)$, 因而, U 的 PDF 可以表示为

$$f_U(t) = \frac{d}{dx} F_U(t) = \sum_{l=1}^{N_t N_r} \left(\frac{f_{Z_l}(t)}{F_{Z_l}(t)} \prod_{j=1}^{N_t N_r} F_{Z_j}(t) \right). \quad (5)$$

综合以上分析, 式(1)可以表示为

$$E(R) = N_t \int_0^\infty \log_2(1+t) f_{B_m}(t) dt. \quad (6)$$

由式(2)可知 $B_m \approx U$, 因而式(6)又可表示为

$$E(R) \approx N_t \int_0^\infty \log_2(1+t) f_U(t) dt. \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可得

$$E(R) \approx N_t \int_0^\infty \log_2(1+t) \sum_{l=1}^{N_t N_r} \left(\frac{f_{Z_l}(t)}{F_{Z_l}(t)} \prod_{j=1}^{N_t N_r} F_{Z_j}(t) \right) dt = N_t \sum_{l=1}^{N_t N_r} \int_0^\infty \log_2(1+t) \frac{f_{Z_l}(t)}{F_{Z_l}(t)} \prod_{j=1}^{N_t N_r} F_{Z_j}(t) dt. \quad (8)$$

将式(3)及(4)代入式(8), 即可得到本文所提出的基于移动台与基站之间距离信息的多用户调度算法的平均吞吐量.

2.2.2 反馈开销分析

前文针对简单的 i. i. d 信道模型, 分析了本文所提出的基于移动台与基站之间距离信息的多用户调

度算法的和容量, 但是, 对于多用户 MIMO 调度算法而言, 上行的反馈开销也是评价系统性能的指标之一.

在 2.1.2 所述的反馈过程中, 仅集合 S 中的用户需要反馈其 SINR 值给基站端, 且对于该集中的每一个用户 k , 当基站端发射天线数为 N_t , 每个用户端接收天线数为 N_r 时, 该用户的 SINR 值为 $N_r \times N_t$ 阶矩阵, 则每个用户给基站端发送 $N_r N_t$ 个实数的 SINR 指示, 由于 $|S| = N_t$, 因此, 该过程总共需要耗费 $N_r N_t^2$ 个实数的反馈链路.

由于在基站端进行了用户选择, 本文所提出的调度算法所需的反馈开销为 $N_r N_t^2$ 个实数. 因为在通常情况下, $K \gg N_t$, 且 $N_t \gg N_r$, 因而, 本文所提出的基于移动台与基站之间距离信息的多用户调度方法与文献[3]提出的基于最大 SINR 的调度方法(反馈开销为 $K + K \lceil \log_2 N_t \rceil$) 相比, 其所需的反馈量大为降低.

图 1 将本文所提出的调度算法与文献[3]中所提出的调度算法进行了比较. 发射天线数从 2 ~ 10 之间变化, 接收天线数为 2, 用户数分别为 100 和 1 000. 从图 1 可以看出, 本文所提出的调度方法所需的反馈量仅与发射和接收天线数有关, 与用户数多少无关, 且随着用户数的增多, 本文所提出的调度方法所需反馈量明显低于文献[3]的方法.

2.2.3 计算复杂度分析

在算法的实际应用中, 必须考虑到算法及技术的可实现性. 基于移动终端最大 SINR 的调度算法, 需要计算所有 K 个活跃用户的 SINR 值, 所需计算量 $O(KN_t N_r)$, 而本文所提出的基于移动台与基站之间距离信息的多用户调度方法, 首先需要计算所有活跃用户到基站之间的距离信息, 然后从中选择距离最短的 N_t 个用户, 计算其 SINR 值, 因而该方法所需计算量为 $O(K + N_t^2 N_r)$.

图 2 将本文所提出的调度算法的计算复杂度与基于最大 SINR 调度的调度算法进行了比较. 可以看出, 当 $K \gg N_t$ 时, 本文所提出的调度算法所需计算量明显小于基于最大 SINR 调度的调度算法.

3 计算机仿真结果与分析

下面通过计算机仿真来验证和比较本文所提出的调度算法的性能, 分别仿真和比较了 i. i. d^[6] 和空间信道模型 (Spatial Channel Model, SCM)^[3,7-11] 下不同调度算法的性能. 本文仅考虑了郊区宏蜂窝场景, 小区半径 $R = 1\ 700$ m, 路径损耗因子 $\alpha = 3$. SCM 信

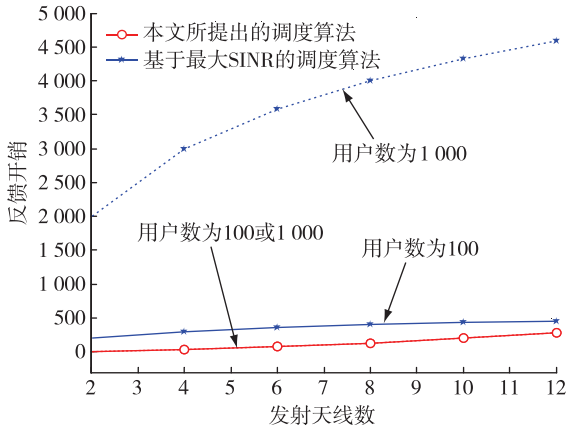


图1 反馈量与发射天线数的关系(接收天线数为2)

Fig. 1 Relationship between feedback load and number of transmit antennas, with 2 receive antennas

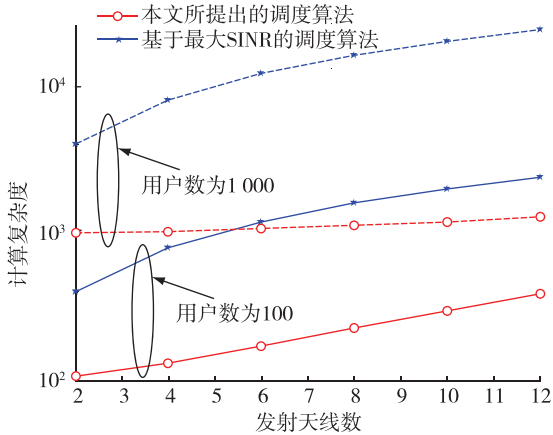


图2 计算复杂度与发射天线数的关系(接收天线数为2)

Fig. 2 Relationship between computing complexity and number of transmit antennas, with 2 receive antennas

道模型的具体参数如表1所示。在SCM信道模型中,宏蜂窝路径损耗模型采用修改的COST231 Hata传播模型:

$$PL = (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{BS}) \log_{10} \left(\frac{d}{1000} \right) + 45.5 + 0.7 h_{MS} + (35.46 - 1.1 h_{MS}) \log_{10} (1000 F_c) - 13.82 \log_{10} (h_{BS}) + C_c, \quad (9)$$

其中, h_{BS} 表示基站的天线高度,且仿真中设 $h_{BS} = 32$ m, d 表示移动台到基站之间的距离,单位为m, h_{MS} 表示移动台天线高度,仿真中设 $h_{MS} = 1.5$ m, F_c 表示载频,其值如表1所示, C_c 为常数因子,对于郊区宏蜂窝环境, $C_c = 0$ dB,且对于城区宏蜂窝环境, $C_c = 3$ dB. 将已知参数代入式(9),可得

$$PL = 32.2 + 35 \log_{10} (d).$$

表1 SCM信道模型仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters of SCM

多径簇数	1
移动台运动速度	60 km/h
每簇中的子路径数	20
移动台每径的角度扩展	35°
波长	0.15 m
基站端每径的角度扩展	2°
载频	2 GHz
基站端两相邻线阵之间的距离	6λ
信号传播速度	3×10^8 m/s
移动台两相邻线阵之间的距离	0.4λ

在仿真系统性能随用户数变化的情况下,设置系统中基站端配置天线数为 $S = 4$, 每个用户端天线数为 $U = 2$, 系统中活跃的用户数 K 分别为 10、100 和 1000, 系统在每个时隙调度的用户数为 $K_s = S = 4$ 个用户. 在仿真系统性能随发射天线数变化的情况下,设置系统中基站端配置天线数 S 分别为 4、6、8、10 和 12, 每个用户端天线数为 $U = 2$, 系统中活跃的用户数 $K = 100$, 系统在每个时隙调度的用户数为 $K_s = S = 4$ 个用户.

图3比较信噪比为 10 dB 时,在 2 种不同的信道模型——i. i. d 信道模型以及 SCM 信道模型下,系统中用户的平均信道容量随活跃的用户数的变化情况. 可以看到,对于本文所提出的调度算法,系统平均信道容量受系统中活跃的用户数的多少的影响较小,而对于基于最大 SINR 的多用户调度方法,系统中用户的平均信道容量随系统中活跃的用户数的增大而增加. 图3中亦给出了式(8)基于移动台与基站之间距离信息的多用户调度算法的理论分析结果,可以看出它与仿真结果相符合. 同时,对于 i. i. d 信道模型,本文所提出的多用户调度算法与基于最大 SINR 的多用户调度方法的性能相差较大,而对于 SCM 信道模型,两者之间的性能相差较小. 但是,由于 SCM 信道模型更符合实际信道,因而证明了本文所提出的多用户调度算法的有效性.

4 结论

移动台的位置信息转化为基站到各个移动台之间的距离信息,仅通知距离基站较近的几个用户(用户数等于发射天线数)计算各自的 SINR 值,并反馈回基站端,最后根据最大 SINR 进行调度. 当系统中用户数比较多时,采用本文所介绍的调度方案可以

有效降低反馈开销及计算复杂度。

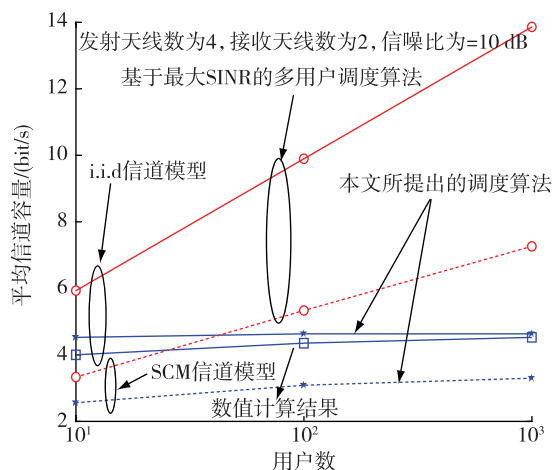


图3 平均信道容量与用户数的关系

Fig. 3 Relationship between average throughput and user number

参考文献

References

- [1] 谢亚琴. 无线定位方法及其在宽带无线链路资源分配中的应用[D]. 南京:东南大学移动通信国家重点实验室,2011
XIE Yaqin. Wireless positioning technology and its application in broadband wireless link resource allocation[D].

- Nanjing: National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, 2011
- [2] Yu W, Rhee W. Degrees of freedom in wireless multiuser spatial multiplex system with multiple antennas [J]. IEEE Trans Commun, 2006, 54(10): 1747-1753
- [3] Zhang W, Letaief K B. MIMO broadcast scheduling with limited feedback [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2007, 25(7): 1457-1467
- [4] Sharif M, Hassibi B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information [J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51(2): 506-522
- [5] David H A, Nagaraja H N. Order Statistics [M]. 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons, 2003
- [6] Zhang Y J, Letaief K B. An efficient resource-allocation scheme for spatial multiuser access in MIMO/OFDM systems [J]. IEEE Trans Commun, 2005, 53(1): 107-116
- [7] Third Generation Partnership Project (3GPP). Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations [Z]. 3GPP TR 25. 996 V9. 0. 0, 2009
- [8] Boccardi F. Precoding schemes for MIMO downlink transmissions [D]. University of Padova, 2007
- [9] Bayesteh A, Khandani A K. On the user selection for MIMO broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 54(3): 1086-1107
- [10] Boccardi F, Huang H. A near-optimum technique using linear precoding for the MIMO broadcast channel [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2007, 3: III-17-III-20
- [11] Jindal N. Antenna combining for the MIMO downlink channel [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2008, 7(10): 3834-3844

Position-based multiple-user multiple-input-multiple-output downlink scheduling methods

XIE Yaqin¹ WANG Yan² ZHU Pengcheng²

1 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Singal Processing,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract A multiple-user scheduling scheme is proposed based on the position between the mobile station (MS) and the base station (BS). Throughput, feedback load and computing complexity are all derived for the proposed scheduling method. Analysis and simulation results demonstrate that the feedback load and computational complexity are both cut down compared with the maximum SINR based scheduling method.

Key words MU-MIMO system; location information; scheduling; channel state information; feedback load