

空间相关对发射分集系统的多用户分集性能的影响

唐 冬^{1,2}, 杨 亮¹, 张广驰¹, 秦家银¹

(1 中山大学信息科学与技术学院电子与通信工程系, 广东广州 510275;

2 南华大学电气工程学院, 湖南衡阳 421001)

摘 要: 研究空间相关对发射分集结合调度策略的多用户系统下行链路性能的影响. 推导出发射天线之间存在空间相关的条件下, TxAA (Transmit Adaptive Array)、STBC (Space-Time Block Coding) 结合调度策略的多用户系统平均容量的表达式, 在此基础上研究其平均容量. 通过仿真验证理论分析的有效性. 结果表明, 发射天线之间的空间相关性会提高多用户系统的平均容量. 另外 TxAA 在各种相关条件下的系统平均容量都优于 STBC.

关键词: 多天线系统; 空间相关; 多用户分集; 调度策略; 发射分集

中图分类号: TN 911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 04-0761-04

Impact of Spatial Correlation on the Combination of Transmit Diversity and Multiuser Diversity

TANG Dong^{1,2}, YANG Liang¹, ZHANG Guang-chi¹, QIN Jiayin¹

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China; 2. School of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract The paper studies the impact of transmitter spatial correlation on the performance of multiuser system in the downlink. Exact expressions for the average channel capacity of the multiuser diversity systems combined with TxAA and STBC respectively are derived and the average capacity is analyzed. The simulation results are consistent with the analysis results which show that the transmitter spatial correlation improves the average capacity of the multiuser diversity system, and under the comparison of the average capacity, the TxAA scheduler outperforms the STBC scheduler.

Key words multi-antenna system; spatial correlation; multiuser diversity; packet scheduling; transmit diversity

1 引言

未来高速多媒体业务一般为不对称业务, 对下行链路数据传输速率要求更高. 基站多天线发射分集技术是提高下行链路数据传输速率的经济、有效的方法, 它无需占用额外带宽, 特别适用于低移动性、没有充分时间、频率分集的环境^[1,2]. 利用多用户分集技术可以进一步提高系统容量^[3,4]. 当多个用户共享相同的信道时, 信道的随机波动使得不同用户信道的信噪比 (SNR) 存在巨大差异. 利用数据业务对有限时延不敏感的特点, 发射机通过调度策略在每个时隙选择信道条件最好的用户进行传输, 可以提高整个系统吞吐量, 获得多用户分集增益.

近来, 对结合发射分集和调度策略的多用户系统的研究引起了广泛关注^[5-9]. 文献 [5] 首次从理论模型的角度

分析 STBC 系统的多用户分集性能, 指出空间分集对多用户分集性能有破坏作用; 文献 [6] 指出只要发射机获得少量信道状态信息, 空间分集就可以提高系统的总体分集增益; 文献 [7] 通过比较多种发射分集方式和调度策略相结合的多用户系统, 指出发射分集系统中发送信号的结构、反馈信息量多少、接收机结构和调度策略都会影响系统的多用户分集性能; 文献 [8] 发现多用户分集随天线数的增加而减少. 文献 [9] 则导出发射分集结合调度策略的多用户系统的平均容量表达式. 以上的研究都假设天线之间是相互独立的, 这一点在实际应用环境中不尽满足. 在实际的传播环境下, 收发天线阵列里的天线之间由于摆放方式、几何尺寸等原因可能出现相关性, 特别在基站端, 天线通常是架设在无遮挡的高处, 有时它们与移动台之间存在视距路径, 另外当天线摆放间距受到条件限制而小于 20

收稿日期: 2005-04-04 修回日期: 2005-12-14

资助项目: 教育部“高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划”基金以及广东省科技计划 (No. 2005B 10101001); 湖南省高等学校科学研究 (No. 05C479)

倍波长时,发射天线间也存在空间相关性.因此,在发射天线之间存在空间相关的条件下,定量研究发射分集结合调度策略的多用户系统的性能对系统级的评估和MAC层算法的设计有重要的参考价值.但是有关研究迄今未见报道.因此,我们在研究相关条件下的天线选择问题的基础上^[12],研究发射天线空间相关性对结合发射分集和调度策略的多用户系统性能的影响.

2 理论模型及空间相关下系统的平均容量

不失一般性,选择由一个基站和K个用户构成的一个单小区多用户系统的下行链路为研究对象.设基站有 n_r 根发射天线,每个用户有一根接收天线.考虑块衰落(block fading)信道,即每个用户的信道在一个数据块的传输时间内保持不变,同时假设每个用户能够通过训练序列准确获知信道状态信息(CSI),并且能够通过反馈信道无差错、无延时地反馈到基站发射机^[9,11].

当基站发射天线存在空间相关时,基站发射天线到用户k的接收天线之间的信道矩阵可以表示为^[10,12]:

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{W}_k \mathbf{T}_k^{1/2} \quad (1)$$

这里 $\mathbf{H}_k = \{h_{k,i}, 1 \leq i \leq n_r\} \in \mathbf{C}^{1 \times n_r}$, $h_{k,i}$ 表示由基站第i根发射天线到用户k的接收天线之间信道的信道响应. \mathbf{W}_k 是独立同分布的均值为0方差为1的复高斯矩阵, \mathbf{T}_k 是表示发射端空间相关的 $n_r \times n_r$ 维相关矩阵.由奇异值分解(SVD)可以得到 $\mathbf{T}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{\Lambda}_k \mathbf{V}_k^H$,其中 $\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k$ 是酉矩阵, $\mathbf{\Lambda}_k$ 是对角阵, $\mathbf{\Lambda}_k = \text{diag}[v]$, $v = [v_1, v_2, \dots, v_{n_r}]$.为了保持总的

发射功率一定,要求 $\sum_{i=1}^{n_r} v_i = n_r, v_i \geq 0$

于是用户k收到的基带信号为

$$Y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X} + n_k \quad (2)$$

这里 $\mathbf{X} \in \mathbf{C}^{n_r \times 1}$ 是基站发射信号矢量, Y_k, n_k 分别为用户k接收端的接收信号和噪声(均为标量).为便于分析,假设基站天线之间的空间相关对所有用户都是一致的,即在某个特定时隙里每个用户对应的 v_i 均相等.

在基站使用多根发射天线,就在信号中引入了空间分集.此外,通过反馈链路将信道状态信息CSI反馈到发射机,使发射机根据CSI自适应调整发射机制,还可以获得天线阵列增益.根据是否反馈CSI可以把发射分集分为开环和闭环两大类^[11].其中开环发射分集(如STBC)不需要额外的信令开销,移动台接收机结构相对比较简单,但是没有充分利用信道信息.而闭环发射分集(如TxAA)本质上是一种自适应技术,基站根据移动台周期性反馈的信息获得下行链路的信道状态,并根据这些信息自适应地调整发射天线权重,使接收机一端的接收功率最大.在以下分析中假设TxAA的反馈链路的延时和误码可以忽略,反馈机制可以理想地跟踪下行链路的状态信息.则采用TxAA和STBC时用户k可以获得的最大瞬时信噪比分别为^[9,11]

$$\gamma_k^{\text{TxAA}} = \frac{E_s}{N_0} \sum_{i=1}^{n_r} |h_{k,i}|^2 = \bar{\gamma}_k \alpha_k^{\text{TxAA}}, \quad 0 < k \leq K \quad (3)$$

$$\gamma_k^{\text{STBC}} = \frac{E_s}{N_0} \frac{\sum_{i=1}^{n_r} |h_{k,i}|^2}{n_r} = \bar{\gamma}_k \alpha_k^{\text{STBC}}, \quad 0 < k \leq K \quad (4)$$

其中 $\bar{\gamma}_k = E_s / N_0$ 是用户k接收端的平均信噪比,是一个与用户位置有关的常量.

$$\alpha_k^{\text{TxAA}} = \sum_{i=1}^{n_r} |h_{k,i}|^2, \quad \alpha_k^{\text{STBC}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} |h_{k,i}|^2}{n_r}$$

分别表示用户采用TxAA和STBC两种发射分集时基站所有发射天线到用户k的接收天线的瞬时信道响应.

在空间相关瑞利衰落信道, α 成为相互独立的指数分布的加权和.假设每个时隙所有用户经历的小尺度衰落是一致的,瞬时信道响应 α_k^{TxAA} 的下标k可以省略. α^{TxAA} 的特征函数(CF)表示为

$$\Phi(w) = \prod_{i=1}^{n_r} \frac{1}{1 - jv_i w} \quad (5)$$

其中 v_i 是对角阵 $\mathbf{\Lambda}_k$ 的对角元素.

由特征函数可以得到瞬时信道响应 α^{TxAA} 的概率密度函数

$$f_{\alpha^{\text{TxAA}}}(v) = \frac{1}{2^p} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^{n_r} \frac{1}{1 - jv_i w} e^{-jv w} dw, \quad v \geq 0 \quad (6)$$

为了降低计算的复杂度和计算量,我们把式(5)记做

$$\Phi(w) = \sum_{i=1}^{n_r} \frac{\xi_i}{1 - jv_i w} \quad (7)$$

其中 $\xi_i = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_r} \frac{v_j}{v_i - v_j}$.结合式(6)可以得到瞬时信道响应 α^{TxAA} 的概率密度函数

$$f_{\alpha^{\text{TxAA}}}(v) = \sum_{i=1}^{n_r} \xi_i \frac{\exp(-v/v_i)}{v_i}, \quad v \geq 0 \quad (8)$$

瞬时信道响应 α^{TxAA} 的概率分布函数(CDF)

$$F_{\alpha^{\text{TxAA}}}(v) = \sum_{i=1}^{n_r} \xi_i (1 - \exp(-v/v_i)), \quad v \geq 0 \quad (9)$$

为了获得多用户分集增益,采用fair-access调度策略^[9].即,基站在每个时隙只选取一个瞬时信噪比与平均信噪比的比值最大的用户进行传输.这种调度策略的优点是不考虑用户在小区里所处的位置,即平均信噪比,能够为全体用户提供相对更加公平的接入服务.fair-access调度策略的算法表示为

$$\arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} \frac{\gamma_k}{\bar{\gamma}_k} = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} \alpha_k \quad (10)$$

这样,在每个时隙被选中的用户的合并瞬时信噪比是

$$\tilde{\gamma} = \tilde{\alpha} \tilde{v} \quad (11)$$

其中 $\tilde{\alpha}$ 和 \tilde{v} 分别代表参与调度用户的合并瞬时信道响应和合并平均信噪比.

假设小区所有用户经历相同的小尺度衰落,那么随机变量 \tilde{v} 对平均信噪比 \bar{v} 具有相同的分布. \tilde{v} 的概率密度函

数 (PDF) 记作^[9]:

$$f_v(v) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{v_k} f_{\tilde{a}}(v/v_k) \quad (12)$$

参与调度用户的合并瞬时信道响应 \tilde{a} 的概率密度函数

$$f_{\tilde{a}}(v) = K f_a(v) [F_a(v)]^{K-1} \quad (13)$$

将式 (8)、(9) 代入式 (13) 得到 TxAA 发射分集系统与调度用户的合并瞬时信道响应 \tilde{a}^{TxAA} 的概率密度函数

$$f_{\tilde{a}^{TxAA}}(v) = K \left[\sum_{i=1}^{n_T} \xi \frac{\exp(-v/v_i)}{v_i} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{n_T} \xi (1 - \exp(-v/v_i)) \right]^{K-1} \quad (14)$$

系统的平均容量可以由下式计算^[13]

$$C = \int_0^\infty \log_2(1+v) f_v(v) dv \quad (15)$$

由式 (12)、(14)、(15) 可以得到空间相关条件下 TxAA 系统每个时隙的平均容量表达式

$$C^{TxAA} = \sum_{k=1}^K \frac{1}{v_k} \int_0^\infty \log_2(1+v) \left\{ \left[\sum_{i=1}^{n_T} \xi \frac{\exp(-v/v_i v_k)}{v_i} \right] \times \left[\sum_{i=1}^{n_T} \xi (1 - \exp(-v/v_i v_k)) \right]^{K-1} \right\} dv \quad (16)$$

类似地, 空间相关条件下 STBC 系统每个时隙的平均容量表达式为

$$C^{STBC} = n_T \sum_{k=1}^K \frac{1}{v_k} \int_0^\infty \log_2(1+v) \left\{ \left[\sum_{i=1}^{n_T} \xi \frac{\exp(-n_T v/v_i v_k)}{v_i} \right] \times \left[\sum_{i=1}^{n_T} \xi (1 - \exp(-n_T v/v_i v_k)) \right]^{K-1} \right\} dv \quad (17)$$

可以看出, 系统的平均容量随着系统服务的用户数 K 增加而增加, 并逐渐趋于饱和, 反映出调度策略有利于提高系统的吞吐量。

3 仿真和讨论

为了验证理论分析的有效性, 采用蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法对平均容量进行仿真, 并与理论曲线进行比较。为便于分析, 所有用户的平均信噪比均取 6dB。每个仿真点取 10000 个采样。

图 1 给出发射天线空间相关性对采用 STBC 的多用户系统平均容量的影响。系统服务多个用户 (K > 2) 时的系统平均容量随相关性增强而提高。发射天线弱相关条件下 (两根天线时取 $v = [1.05 \ 0.95]$, 四根天线时取 $v = [1.1 \ 1.05 \ 0.95 \ 0.9]$) 平均容量最小, 强相关条件下 (两根天线时取 $v = [1.99 \ 0.01]$, 四根天线时取 $v = [3.94 \ 0.03 \ 0.02 \ 0.01]$) 平均容量最高。表明空间相关性通过降低有效空间分集增益提高整个系统的多用户分集性能。特别是当发射天线之间强相关时, 使用两根天线和四根天线时系统容量几乎相同, 表明单纯的空间分集对系统的多用户性能有害。

图 2 给出空间相关性对采用 TxAA 的多用户系统平均容量的影响。同 STBC 相似, 系统服务多个用户时系统平均

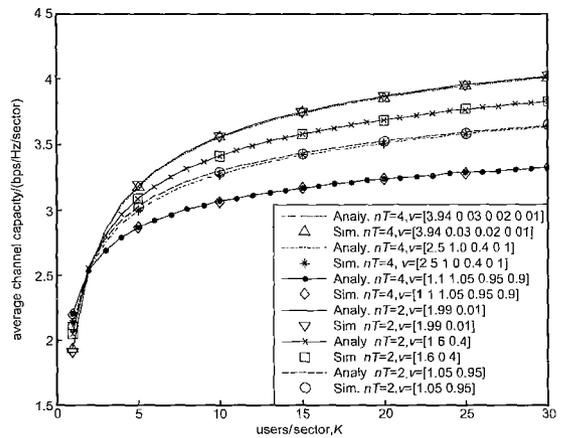


图 1 各种相关条件下 STBC 的多用户分集性能

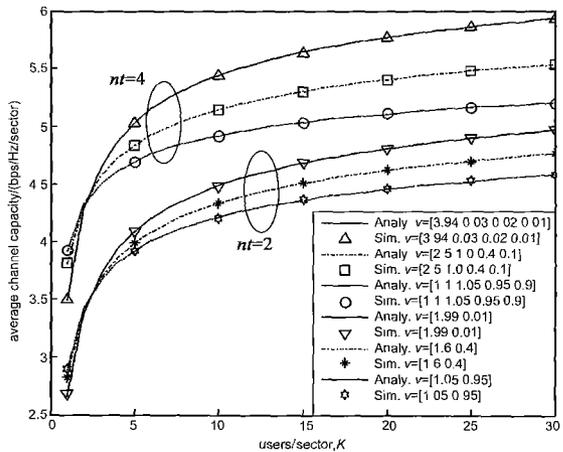


图 2 各种相关条件下 TxAA 的多用户分集性能

容量随相关性增强而提高。但是与 STBC 不同的是, 无论相关程度如何, 使用四根天线获得的系统平均容量总是大于使用两根天线获得的平均容量, 表明随着天线数的增加, 虽然对多用户分集有害的空间分集增益同时提高, 但闭环 TxAA 能够根据信道状态自适应调整发射天线权重, 天线阵列增益也随之提高, 系统总体的平均容量得到提高。

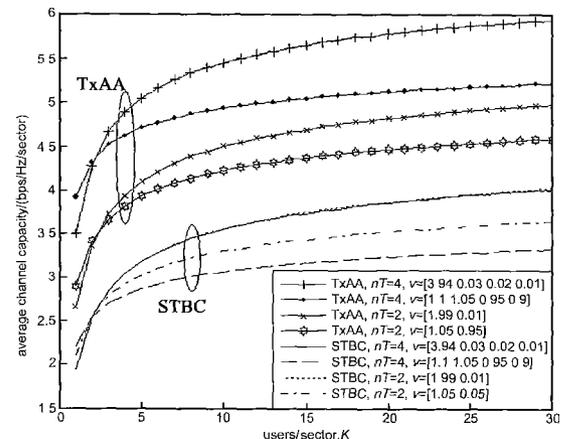


图 3 相关条件下 TxAA、STBC 多用户分集性能的比较

图 3 比较了 STBC、T_xAA 的多用户性能。可以看出,发射天线之间的相关性对单用户系统和对多用户系统的影响截然不同:当用户数为 1 时,没有调度增益,发射天线之间的空间相关性使系统平均容量明显恶化;而当系统服务多个用户时,系统平均容量随空间相关性的增强而提高,可见调度增益随相关性的增强而提高。还可以看到,不论是在何种相关强度下,闭环的 T_xAA 的多用户性能均优于开环的 STBC,显示出在发射天线空间相关时闭环分集相对于开环分集仍然具有更好的多用户性能。

4 结论

本文通过理论分析并结合仿真,针对 T_xAA 和 STBC 两种发射分集方式,研究发射天线之间存在空间相关条件下发射分集结合调度策略的多用户系统的平均容量。研究发现,当系统服务单个用户时,发射天线之间的空间相关性使系统平均容量明显恶化;而当系统服务多个用户时,发射天线之间的空间相关性使发射分集系统的有效空间分集下降,系统平均容量随空间相关性的增强而提高。另外,由于 T_xAA 能够自适应于信道状态调整发射天线的权重,因而在各种相关条件下的系统平均容量都优于 STBC。需要说明的是以上分析都是基于目前通用的理想信道反馈这一基本假设,而非理想信道反馈和部分信道信息条件下的系统性能分析是下一步将要开展的研究工作。

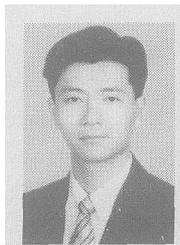
参考文献:

- [1] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. IEEE Select Areas in Commun, 1998, 16(8): 1451-1458
- [2] Winters J H. The diversity gain of transmit diversity in wireless systems with Rayleigh fading [J]. IEEE Trans Veh Technol, 1998, 47(1): 119- 123
- [3] Viswanath P, Tse D N C, Laroia R. Opportunistic beamforming using dumb antennas [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(6): 1277- 1294
- [4] Bender P, Black P, Grob M, et al CDMA HDR: A bandwidth efficient high speed data service for nomadic users [J]. IEEE Comm Magazine, 2000, 38(7): 70- 77
- [5] Gozali R, Buehrer R M, Woerner B D. The impact of multiuser diversity on space-time block coding [J]. IEEE Comm Lett, 2003, 7(5): 213- 215
- [6] Larsson E G. On the combination of spatial diversity and multiuser diversity [J]. IEEE Comm Lett, 2004, 8(8): 517- 519
- [7] 汪安春, 余小明, 周世东, 许希彬, 姚彦. 多天线的发送分集系统中多用户分集的研究 [J]. 通信学报, 2004, 25(5): 10- 19

WANG A C, SHE X M, ZHOU S D, XU X B, YAO Y. Multiuser diversity in the multiple-antenna data networks over the fading channels [J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(5): 10- 19 (in Chinese)

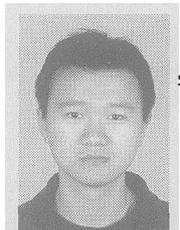
- [8] 周华, 杨大成, 马敏. M M O 衰落信道的多用户分集性能分析 [J]. 北京邮电大学学报, 2004, 27(4): 64- 68
- ZHOU H, YANG D C, MA M. On the performance of multi-user diversity gain in M M O fading channel [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004, 27(4): 64- 68 (in Chinese)
- [9] Mun C, et al Exact capacity analysis of multiuser diversity combined with transmit diversity [J]. IEE Electronics Lett, 2004, 40(22): 1423- 1424
- [10] Bøkkeli H, Paulraj A J Performance analysis of space-time codes in correlated Rayleigh fading environments [A]. Proc Asilomar Conf Signals Systems and Computers (Volume 1) [C]. Pacific Grove CA, 2000. 687- 693
- [11] Derynberly R T, Gray S D, Ionescu D M, et al Transmit diversity in 3G CDMA systems [J]. IEEE Commun Mag, 2002, 40(4): 68- 75
- [12] Yang L, Tang D, Qin J Y. Performance of spatially correlated M M O channel with antenna selection [J]. Electron Lett, 2004, 40, 1281- 1282
- [13] Lee W C Y. Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment [J]. IEEE Trans Veh Technol, 1990, 39(3): 187- 190

作者简介:



唐冬男, 1967年出生于辽宁大连, 南开大学教师, 中山大学博士研究生, 主要研究方向为多输入多输出(M M O)技术。
E-mail: tangdongmai@163.com

杨亮男, 1977年出生于湖南邵阳, 中山大学博士研究生, 主要研究方向为多天线的天线选择技术。



张广驰男, 1982年出生于广东广州, 中山大学硕士研究生, 主要研究方向为多输入多输出(M M O)技术。

秦家银男, 1961年出生于湖北荆门, 中山大学信息科学与技术学院副院长, 电子与通信工程系教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线CDMA与移动通信技术和光电子技术与通信。