

基于天线选择的低秩信道 MIMO 系统容量研究

苏彦兵^{1,2}, 谈振辉¹

(1. 北京交通大学现代通信研究所, 北京 100044; 2. 海军装备研究院信息工程技术研究所, 北京 102249)

摘要: 最近的研究表明, 在衰落信道多天线 MIMO 系统的容量随发射天线数线性增加. 而对于低散射环境, 即使信号经历独立的衰落, 信道秩的降低也会严重影响系统容量的增加. 对于这种低秩环境, 选择天线发射或接收可以有效地降低系统的成本. 本文研究了天线选择对低秩信道 MIMO 系统容量的影响. 仿真结果表明, 对不同的信道条件, 适当选择天线发射不仅可以增加信道容量, 而且可以降低系统的复杂度和射频成本. 适当选择天线接收, 在不严重降低系统容量的前提下, 也达到了降低系统成本的目的.

关键词: 天线选择; 多天线 MIMO 系统; 信道容量; 秩

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 03-0395-04

Capacity of Deficient Rank MIMO Channels with Antenna Selection

SU Yan-bing^{1,2}, TAN Zhen-hui¹

(1. Modern Telecommunication Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Information Engineering Technology Institute, Navy Equipment Academe, Beijing 102249, China)

Abstract: Recent work has shown that capacity of a multiple-antenna MIMO system is increased linearly with the number of transmitter antennas in fading channels. For a poor scattering environment, the low-rank channel may result in a substantial degradation of capacity although fading is independent. In this situation, antenna selection is an effective way to reduce cost. Capacity of a low-rank MIMO channel with antenna selection is studied. The results of simulation show that antenna selection of transmitter not only can increase capacity, but can also reduce complexity and cost of RF chains for given channels. Antenna selection of receiver also can reduce cost under the condition of not decreasing capacity.

Key words: antenna selection; multiple-antenna MIMO system; channel capacity; rank

1 引言

未来的无线移动通信系统不仅要求支持各种新的业务, 而且可以为各种业务提供大范围动态变化的传输速率, 尤其是下行链路要求峰值传输速率尽可能高. 多天线 MIMO (multiple input multiple output) 系统在发射机和接收机都采用多个天线, 有效地开发了系统对空间维的利用, 从而在不增加发射功率和带宽的前提下提高了系统容量, 使之成为频谱效率很高的传输技术. 理论研究表明, 对于准静态、平坦衰落信道, 只要接收天线数大于发射天线数, MIMO 系统容量随发射天线数的增加而线性增长^[1,2]. 在多天线 MIMO 系统中, 假设信道为理想情况, 即收发天线之间各信道相互独立, 混合信道就可以被分解成多个并行传输的子信道, 系统就是通过并行子信道形成的传输模 (信道的秩) 提高了信道容量.

典型的 MIMO 系统, 发射机和接收机同时使用所有的天线发射或接收, 这就要求使用与天线一样多的射频链路, 大大增加了系统的硬件成本. 由于与射频部分相比, 天线振子成本很低, 因此可以采用选择天线发射/接收的方法用相对较少的收发射频链路支持较多的天线, 从而使 MIMO 系统不再完全

受射频成本的限制. 文献[3]分析了不相关衰落信道选择天线发射/接收对信道容量以及误码率的影响, 结果表明, 选择发射/接收方法以很小的性能损失换取了射频成本的大量降低. 文献[4]将天线选择技术扩展到发射机和接收机, 并与空时分组码相结合, 进一步提高了多天线 MIMO 系统的信噪比和中断容量.

在低散射环境当中, 信道的秩由于实际传播路径的减少可能小于发射机或接收机的天线数, 此时只有部分天线形成的信道对容量是有贡献的. 在这种低秩信道采用选择天线发射/接收更具有实际意义, 因为此时采用全部天线发射不仅浪费了射频单元, 而且浪费了发射功率. 文献[5,6]针对低秩信道分别提出了最优和次最优选择天线发射的方法, 仿真结果表明, 最优选择方法可以用部分发射天线实现系统最大容量, 次最优选择方法也可以在降低计算量的情况下, 达到满意的容量结果.

本文研究了低秩信道 MIMO 系统中, 发射天线和接收天线不同选择方法对系统容量的影响. 仿真结果不仅将文献[5]的方法扩展到发射机和接收机同时选择天线的情况, 而且对于一些特殊环境得到了与文献[5]不同的结果. 文章内容安排

收稿日期: 2002-04-28; 修回日期: 2003-11-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90104016); 博士学科点基金 (No. 20020004022)

如下,第二部分建立了信道模型,第三部分对信道容量进行了分析,第四部分给出仿真结果和讨论,最后得出结论。

2 信道模型

考虑一个点到点多天线 MIMO 通信系统,假设发射机有 N 个天线,接收机有 M 个天线。编码数据经过空间解复用分成 n 个数据子流,从 N 个天线选择 n 个发射出去。接收机从 M 个天线选择 m 个接收,经空间复用成为原始数据。为保证接收机能够充分分离各子数据流,始终假定 $M \geq N, m \geq n$,系统框图如图 1 所示。

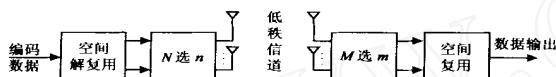


图 1 选择天线发射/接收 MIMO 系统

假定信道为平坦衰落信道,即信号带宽小于信道的相干带宽(窄带信号)。同时假定信道为准静态,即信道在几个符号周期近似保持不变,这样可以保证接收机及时进行信道估计。为满足这种环境,发射机和接收机位置相对固定或只能低速运动(例如 wireless LANs)。假设发射机不知道信道状态,而接收机通过信道估计能够及时得到信道信息,由于不必为发射机提供一个快速的反馈链路而使系统得到进一步简化。假设系统所处环境为低散射环境,即收发之间有效路径小于信道矩阵的秩。各路径信道增益为独立同分布复高斯随机变量,则形成的信道为 Rayleigh 衰落信道。

系统初始状态没有天线选择时,接收机的接收信号可以表示为

$$y = Hx + n \tag{1}$$

式中接收信号 y 是 $M \times 1$ 维矢量,信道 H 是 $M \times N$ 维矩阵,发射信号 x 是 $N \times 1$ 维矢量, n 是 $M \times 1$ 维的零均值复高斯噪声。

假设发射机功率受限,并且由于发射机不知道信道状态,各天线功率均匀分配。此时的信道容量为^[2]

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_M + \frac{1}{N} H H^H \right) \right] \tag{2}$$

式中 I_M 是 $M \times M$ 维单位矩阵, $\frac{1}{N}$ 是每个接收支路的平均信噪比,上标 H 表示共轭转置运算。信道 H 经过归一化处理,其中每个元素都是均值为 0、方差为 1 的独立循环对称复高斯变量,也就是实部和虚部的方差分别为 1/2。

3 容量分析

假设系统所处信道的秩为 k ,由于是低秩信道,始终满足 $k < N, M$ 。我们采用与文献[5]类似的分析方法分析选择天线对系统容量的影响,并且在文献[5]的基础上增加了到达角变化对容量的影响,进一步通过仿真得到一些与文献[5]不同的结果。

首先对信道矩阵 H 进行奇异值分解(SVD),得到

$$H = U V^H \tag{3}$$

式中 U 为左奇异矢量,是一个 $M \times M$ 维矩阵, V 为右奇异矢量,是一个 $N \times N$ 维矩阵, U 和 V 都是酉矩阵。 Σ 是 $M \times N$ 维

的对角矩阵,其主对角线上有 k 个非 0 元素,其余 $N - k$ 个都为 0, k 是信道的秩。显然使用对应对角元素为 0 的 $N - k$ 个发射天线对系统容量没有任何贡献,浪费了系统资源。既然信道的秩为 k ,我们就选择使用 k 个天线发射,这相当于从右奇异矢量矩阵 V 中剔除 $N - k$ 列,形成新的右奇异矢量 V_s, V_s 是一个 $k \times N$ 维满秩矩阵。则选择 k 个天线发射的信道矩阵 H_s 可以表示为

$$H_s = U V_s^H \tag{4}$$

将等式(4)代入等式(2),得到选择 k 个天线发射的信道容量 C_s 为

$$C_s = \log_2 \left[\det \left(I_k + \frac{1}{k} V_s^H V_s H^H \right) \right] \tag{5}$$

对 V_s 进行 QR 分解得到 $V_s = QR$, Q 是一个 $k \times k$ 维酉矩阵, R 是一个 $k \times N$ 维上三角矩阵(主对角线以下元素都为 0)。则选择 k 个天线发射的对角矩阵 Λ 以及上三角矩阵 R 可以表示为

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & \bar{R} \end{bmatrix} \tag{7}$$

上两式中 Λ 是一个 $k \times k$ 维对角矩阵,其对角元素就是信道的非 0 奇异值 $\lambda_i, i = 1, \dots, k$ 。 R_s 是取 R 前 k 列形成的 $k \times k$ 维矩阵, \bar{R} 是剩下的 $N - k$ 列组成的 $(k \times N - k)$ 维矩阵。由于 R_s 是由 V_s 的 QR 分解得到,而 V_s 是满秩矩阵,则 R_s 的对角元素全部不为 0,并且 R_s 始终是满秩的。将 $V_s = QR$ 以及等式(6)、(7)代入等式(5),信道容量简化为

$$C_s = \log_2 \left[\det \left(I_k + \frac{1}{k} \Lambda R_s^H R_s H^H \right) \right] \tag{8}$$

下面分高信噪比和低信噪比两种情况讨论等式(8)的信道容量。当信噪比很大时,等式(2)的信道容量可以近似表示为

$$C \approx k \log_2 \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \lambda_i \right] \tag{9}$$

类似的等式(8)可以写成

$$C_s \approx \log_2 \left[\det \left(I_k + \frac{1}{k} \Lambda R_s^H R_s H^H \right) \right] = k \log_2 \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \lambda_i \right] + \sum_{i=1}^k \log_2 |r_i|^2 \tag{10}$$

式中 r_i 是 R_s 的第 i 个对角元素。与等式(9)相比较,等式(10)的前一项由于发射天线的减少增加了信道容量,而后一项由于 $|r_i| < 1, \log_2 |r_i|^2$ 始终是负的,造成了信道容量的减小。因此,适当选择发射天线使等式(10)第一项对应容量的增加大于第二项对应容量的减少,就可以最终达到提高容量的目的。

当信噪比很小时,等式(2)的信道容量可以表示为

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_k + \frac{1}{N} H^H H \right) \right] = \log_2 \left[1 + \frac{1}{N} \text{tr} \left(H^H H \right) \right] = \log_2 \left[1 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \lambda_i^2 \right] \tag{11}$$

式中 $\text{tr}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹。类似的等式(8)可以写成

$$C_s \approx \log_2 \left[1 + \frac{1}{k} \text{tr} \left(\Lambda R_s^H R_s H^H \right) \right] \tag{12}$$

利用矩阵迹的性质 $tr(AB) = tr(BA)$, 等式(12)可以进一步简化为

$$C_s = \log_2 \left(1 + \frac{1}{k} tr(R_s^H R_s) \right) = \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^k \frac{r_i}{r_i} \right) \quad (13)$$

式中 r_i 表示 R_s 第 i 列的 Frobenius 范数. 与等式(11)相比较, 等式(13)由于选择发射天线重新分配了功率, 提高了信噪比的比例因子, 从而增加了信道容量. 而由于 $r_i < 1$, 对信道容量的影响总是负面的. 因此, 适当选择发射天线, 使的比例因子提高对容量的影响超过 r_i 对容量的影响, 同样可以达到提高容量的目的.

另外根据等式(10)和等式(13), 一个值得注意的事实是, 减少接收天线将降低信道矩阵的秩, 只能对容量产生负面影响, 永远不可能提高系统的容量. 但是, 从后面的仿真结果可以看到, 适当地选择接收天线, 可以在不严重损失容量的条件下, 降低系统的复杂度和射频成本, 这对于实际系统应用也是很有意义的.

4 仿真结果及讨论

对于图 1 的系统, 假设发射机和接收机都采用顺序排列的均匀线阵, 并且发射机具有 3 个天线, 接收机具有 4 个天线. 由于假设为低秩信道, 因此假定收发天线之间只有 2 条路径, 即信道的秩为 2. 对于更多的发射和接收天线以及更多路径的情况可以直接推广得到. 假设无论发射机还是接收机, 天线间距均为 $\lambda/2$, 为载频波长. 当发射机和接收机都处于丰富的散射环境当中时, $\lambda/2$ 的天线间距可以保证信号经历独立的衰落^[2]. 虽然本文假设为低散射环境, 但是当角度扩展足够大时, $\lambda/2$ 的天线间距同样可以满足独立衰落的条件^[7]. 具体仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

发射天线	3	天线间距	$\lambda/2$
接收天线	4	路径 1 出发角到达角	0
路径 1 信道增益		路径 2 出发角	1
路径 2 信道增益		路径 2 到达角	2

根据表 1 的仿真参数, 信道矩阵的第 ij 个元素为

$$H_{ij} = \alpha + e^{-j \left[(i-1) \sin \alpha_2 + (j-1) \sin \alpha_1 \right]} \quad (14)$$

固定路径 1 的出发角和到达角都为 0, 对于路径 2 不同的出发角 α_1 和到达角 α_2 , 我们用 α 随机生成 10000 个实际信道 H_{ij} 的样值, 根据等式(2)算出容量后取其平均值得到信道容量. 天线选择准则为始终选择容量最大的天线组合, 如果选择的天线子集中只有一个形成满秩矩阵, 就选择这个子集作为发射天线; 如果有多个子集满足条件, 就选择使信道容量最大的子集作为发射天线. 图 2~5 给出了选择天线发射和接收时信道容量随 α_1 变化的仿真结果, 作为比较同时给出了没有天线选择时的容量结果. 仿真参数设定如下, 到达角 α_2 分别选取 $\pi/4$ 和 0, 出发角 α_1 在 $0 \sim \pi/2$ 之间变化, α 设为 25dB, 和分别服从方差为 0.8 和 0.2 的 Rayleigh 分布.

图 2 和图 3 分别为 $\alpha_2 = \pi/4$ 和 $\alpha_2 = 0$ 时系统容量随 α_1 的变化, 从仿真结果看出, 选择部分天线发射可以增加信道容量, 这与前面分析的结果是一致的. 但是在到达角固定的情况下, 要使信道容量达到最大, 不同的出发角所选择的天线是不同的. 如图所示, 当 $\alpha_2 = \pi/4$ 时, α_1 小于 $\pi/4$ 选择天线 1、3 最佳, α_1 大于 $\pi/4$ 选择天线 1、2 或 2、3 最佳; 当 $\alpha_2 = 0$ 时, α_1 小于 $\pi/4$ 选择天线 1、2 最佳, α_1 大于 $\pi/4$ 选择天线 1、3 最佳. 这一结果与文献[5]明显不同. 文献[5]认为天线间距越大, 信道相关性越弱, 产生的容量增益就越高, 因此始终选择天线 1 和天线 3 发射. 这种现象我们解释如下, 从等式(14)可以看出, H_{ij} 不仅依赖于发射端天线之间的相对相移, 而且依赖于接收端天线之间的相对相移, 增加其中一端的天线间距并不意味着就可以减小整个信道的相关性. 另外从图中还可以看到, $\alpha_2 = 0$ 与 $\alpha_2 = \pi/4$ 相比, 选择天线发射产生的容量增益很小, 这是因为到达角为 0 时接收信号几乎完全相关, 此时调整天线间距已经不能对信道相关产生太大的影响.

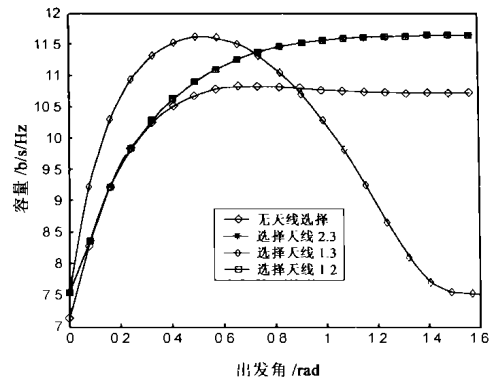


图 2 选择发射天线时信道容量的变化, $\alpha_2 = \pi/4$

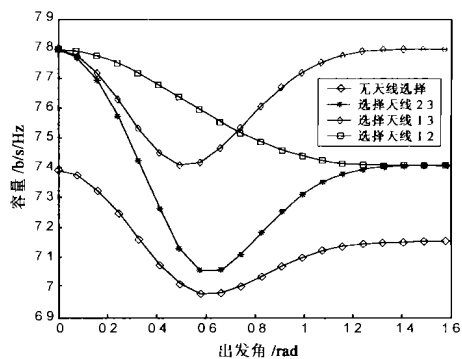


图 3 选择发射天线时信道容量的变化, $\alpha_2 = 0$

图 4 为天线间距由 $\lambda/2$ 减小到 $\lambda/4$ 时, 选择 2 个天线发射时系统容量随 α_1 的变化, 其它参数与图 2 相同. 我们看到, 天线 1、3 始终是最佳选择, 因此当天线间距小于 $\lambda/2$ 时, 无论 α_1 、 α_2 怎样变化, 信道都具有很强的相关性, 增加天线间距可以减小相关性, 从而提高信道容量, 这与文献[5]的结果是一致的.

如果发射机与接收机同时进行天线选择, 则信道容量变化会有不同的结果. 假设选择天线 1、3 发射, 4 个接收天线任意选择 3 个进行接收, $\alpha_2 = \pi/4$, 其它参数与图 4 相同, 仿真结

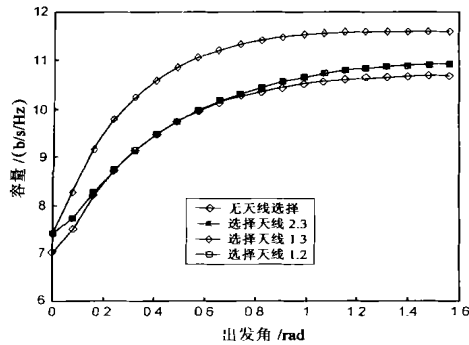


图4 选择发射天线时信道容量的变化, $\alpha_2 = \pi/4$

果如图5所示.与图4相比较可以看出,与发射天线选择相比,增加了接收天线选择并没有使信道容量进一步增加,这与前面分析结果也是一致的.虽然如此,但是适当选择天线接收,可以在不影响信道容量的前提下降低系统的复杂度和射频成本.

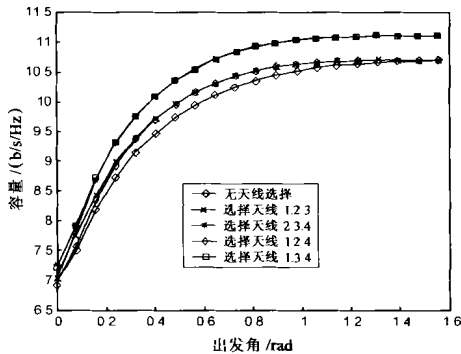


图5 同时选择收发天线时信道容量的变化, $\alpha_2 = \pi/4$

5 结论

本文研究了低秩信道 MIMO 通信系统中,天线选择对系统容量的影响.理论分析表明,当系统处于低散射环境时,采用选择天线发射的方法可以增加信道容量,而选择天线接收不会增加信道容量.仿真结果不仅验证了理论分析的正确性,而且得出天线的最佳选择与信道结构有关,对于不同的信号出发角和到达角,要求选择不同的天线,选择准则以使信道容量最大为准.另外,与单独选择发射天线相比,虽然增加接收天线选择并不会带来更多的容量增加,但是这样可以降低接收机的复杂度和射频成本,这对实际系统也是很有吸引力的.

参考文献:

- [1] E Telatar. Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels [R]. USA : AT&F Bell Laboratories , Internal Tech Memo , 1995. 1 - 28.
- [2] GJ Foschini , et al. On limits of wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Wireless Personal Commun , 1998 , 6 : 311 - 335.
- [3] A F Molisch , et al. Capacity of MIMO systems with antenna selection [A]. Inter Conf on Commun [C]. Helsinki , Finland : IEEE Press , June , 2001. 570 - 574.
- [4] A Paulraj , et al. Optimal antenna selection in MIMO systems with space-time block coding [J]. IEICE Trans Commun , 2001 , E84-B : 1713 - 1718.
- [5] D A Gore , et al. Selecting an optimal set of transmit antennas for a low rank matrix channel [A]. Proc ICASSP [C]. Acapulco , Mexico : IEEE Press , Aug 2000. 2785 - 2788.
- [6] S Sandhu , et al. Near-optimal selection of transmit antennas for a MIMO channel based on Shannon capacity [A]. IEEE Conference Record of the 34th Asilomar Conference on Signals , Systems and Computers [C]. Oakland , California : IEEE Press , Oct 2000. 567 - 571.
- [7] A F Naguib. Adaptive Antennas for CDMA Wireless Networks [D]. USA : University of Stanford , 1996.

作者简介:



苏彦兵 男, 1969年2月生于内蒙古包头市, 现为海军装备研究院信息工程技术研究所工程师, 北京交通大学现代通信研究所在职博士研究生, 主要研究方向: 宽带移动通信, 多天线 MIMO 系统.



谈振辉 男, 1944年2月生于江苏扬州, 现为北京交通大学教授、博士生导师、校长, 主要研究方向: 个人通信, 宽带移动通信, CDMA 通信.