

天线选择对 MIMO 信道容量的影响¹

黎海涛 张靖* 陆建华

(清华大学电子工程系 北京 100084)

*(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘 要 该文首先分析了多天线系统的信道容量,然后研究了当信道矩阵非满秩时,选择发射和接收天线对信道容量的影响。仿真试验结果表明,发射天线选择能提高系统容量,同时选择发射和接收天线虽然减小了复杂度和硬件成本,但对系统容量的增加低于单独进行发射天线选择时的情况。

关键词 信道容量, 天线选择, MIMO

中图分类号 TN820, TN919.3

1 引言

随着无线网络和 Internet 的逐渐融合,人们对无线通信业务的类型和质量的要求越来越高。为满足无线多媒体和高速率数据传输的要求,需要开发新一代无线通信系统。其中在发送和接收端使用多元天线阵列 (MEA, Multiple Element Array) 的多输入多输出 (MIMO, Multiple Input Multiple Output) 技术受到广泛关注,它能显著提高系统容量和无线传输链路质量。

已提出的利用 MIMO 信道容量的技术有两种。一是由 Foschini 等提出的 Bell 实验室分层空时结构^[1](BLAST, Bell Labs Layered Space-Time Architecture), 它把整个数据流分解成单独的子数据流从 N 副天线发送。二是结合信道编码和发送分集的空时编码^[2], 这包括 Tarokh 等提出的空时格码 (STTC) 和 Alamouti 等提出的空时分组码 (STBC)。近来, MIMO 系统的信道容量问题得到大量研究, Foschini 和 Gans 研究了 Rayleigh 衰落条件下 MIMO 信道的容量^[1], 并与单输入单输出 (SISO) 信道的容量进行比较,指出在接收天线大于或等于发送天线数时,信道容量与发送天线数成线性关系,这推广了香农定理。在提出 MIMO 信道容量的基本定理后,人们开始研究如何利用 MIMO 的多天线结构,进一步提高信道容量。其中结合信道矩阵特性,分别进行发射天线选择^[3]和接收天线选择^[4]是一种能提高容量和降低系统复杂度的有效技术。本文首先分析了 MIMO 信道容量,然后研究了发射、接收天线选择以及联合发射接收天线选择对信道容量的影响,最后给出了仿真试验结果及结论。

2 MIMO 信道容量

多天线系统中接收信号可表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{Y} = [y_1 \cdots y_{N_r}]^T$ 为接收信号向量, $\mathbf{X} = [x_1 \cdots x_{N_t}]^T$ 为发射信号向量, $\mathbf{n} = [n_1 \cdots n_{N_r}]^T$

为白高斯噪声向量, T 表示转置, 信道矩阵 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_r} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_t1} & h_{N_t2} & \cdots & h_{N_tN_r} \end{bmatrix}$, $\mathbf{H}$ 中元素 h_{ij}

为发射天线 i 到接收天线 j 的信道衰落系数。

从 $\mathbf{H}$ 出发来分析信道容量。为方便分析,作如下假设: (1) 信道是准静态的,至少在几个突发内,信道状态信息 (CSI) 不改变。(2) 发射机未知 CSI, 而接收机已知信道为 Rayleigh 衰

¹ 2002-03-18 收到, 2002-11-09 改回

国家自然科学基金项目资助 (资助号: 60072008)

落。(3) 从多根天线发射的信号是独立同分布的 (I.I.D)。基于以上假设, 瞬时信道容量为^[1]

$$C = \log_2[\det(\mathbf{I}_t + \frac{\text{SNR}}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^+)] \quad (2)$$

式中 $\det(\cdot)$ 表示对矩阵求行列式, $\mathbf{I}_t$ 为单位矩阵, SNR 是每根接收天线端的输出信噪比, N_t 是发射天线数, $\mathbf{H}$ 是方差为 1 的 $N_r \times N_t$ 归一化复信道矩阵, $\mathbf{H}^+$ 为 $\mathbf{H}$ 的共轭转置矩阵, 对信道矩阵进行特征值分解 (SVD) 得到

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 为正交矩阵, 满足 $\mathbf{U} \mathbf{U}^+ = \mathbf{I}$, $\mathbf{V} \mathbf{V}^+ = \mathbf{I}$. $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\sigma_1 \ \sigma_2 \ \cdots \ \sigma_k)$, $\sigma_1 > \sigma_2 > \cdots > \sigma_k$ 为 $\mathbf{H}$ 的特征值。故信道容量可简化为

$$C = \sum_{i=1}^k \log_2 \left(1 + \frac{\text{SNR}}{N_t} \sigma_i^2 \right) \quad (4)$$

k 是信道矩阵的秩, $k \leq \min(N_r, N_t)$, σ_i 是信道矩阵的第 i 个特征值。从 (4) 式看到, MIMO 信道可建模为一组并行独立的子信道, 每个子信道的容量为 $\log_2[1 + (\text{SNR}/N_t)\sigma_i^2]$ 。这时, 可以采用 WF(Water Filling) 算法对各子信道进行最优功率分配以进一步提高 MIMO 信道容量。WF 算法的原理是给衰减小的信道分配大的发射功率, 给衰减大的信道分配小的功率。研究表明, 当 SNR 增加到一定值后, 采用 WF 算法不能使信道容量继续增加。不难解释, 随着 SNR 的提高, 信道衰落减小, 功率分配不再是一个重要的问题。因此, 需从另一个角度来研究 MIMO 信道容量的提高问题。

3 天线选择分析

在高信噪比时, 信道容量近似为

$$C \approx k \log_2(\text{SNR}/N_t) + \sum_{i=1}^k \log_2 \sigma_i^2 \quad (5)$$

式中第 1 项是信道矩阵秩的函数, 第 2 项与信道矩阵的特征值有关。注意到信道矩阵的低秩特点, 即 $k < N_t$, 若把发射天线数从 N_t 减小到 k , 第 1 项将增加, 第 2 项将减小, 则可提高容量。另一方面, 若减小接收天线数, 第 1 项不变, 但第 2 项可能下降, 故接收天线选择不会提高容量。下面分别对这两种情况作具体分析。

如前所述, 可在发射天线阵中重新选择天线来增加信道容量。问题是如何从 N_t 根天线中找到期望的 k 根发射天线, 可采用信道容量最大准则来选择天线, 即满足

$$C_s = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} [\log_2[\det(\mathbf{I}_t + (\text{SNR}/N_t) \tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^+)]] \quad (6)$$

式中 $\tilde{\mathbf{H}}$ 为天线选择后的信道矩阵。发射天线选择时有两种情况, 一是发射天线数等于信道矩阵的秩 k , 这时信道矩阵为满秩矩阵, 只能唯一选择 k 根发射天线。二是发送端有 N_t 根天线,

这时需要从 $\begin{bmatrix} N_t \\ k \end{bmatrix}$ 种组合中选择信道容量值最大的一种组合。而当 N_t 和 k 很大时, 该法的计

算量很大, 不易于实现。文献 [6] 提出一种简单有效的替代方法。假设接收机通过信道估计获得 CSI, 采用 WF 算法计算 N_t 根发射天线中的功率分配问题, 选出将被分配给功率较大的 k 根天线, 并把这个选择信息反馈给发射机。与采用 WF 算法的自适应功率分配算法不同, 这里接

收机并不进行功率分配的计算问题, 目的仅在于采用 WF 法选择最优的 k 根天线, 然后在选定的 k 根发射天线中重新分配相等的发射功率。这种方法避免了在所有可能的发射天线选择组合中大量的搜索和比较。

虽然减小接收天线数并不能增加信道容量, 但是, 若它能降低系统复杂度, 同时容量不受到的损失, 这仍是值得做的。模拟表明^[4], 当 $N_t = 3, N_r = 8$, 在 $\text{SNR} = 20\text{dB}$ 时, 10% 的中断容量为 21.8bps/Hz , 当 $N_t = 3, N_r = 3$ 时, 10% 的中断容量为 18.2bps/Hz 。可见, 与未作接收天线选择相比, 接收天线选择后容量稍有降低 (3.6bps/Hz), 但利用的天线数成倍减少。若在 MIMO 系统中, 应用 WF 算法同时进行发射和接收天线选择, 可大大降低系统复杂度, 但会影响 MIMO 信道容量。从 (5) 式中得不到明确的结论, 下面通过仿真试验来分析。

4 仿真结果

如图 1 所示, MIMO 系统采用 3 根发射天线和 3 根接收天线, 天线间距为 $\lambda/2$, λ 是波长。采用参数化信道模型, 设在发射和接收天线间只有两条传播路径, 即信道矩阵秩为 2, 信道矩阵元素为

$$H_{ij} = F_1 + F_2 \exp[-j\pi((i-1)\sin\beta + (j-1)\sin\alpha)] \quad (7)$$

式中 F_1, F_2 分别表示信号经第 1 条传播路径和第 2 条传播路径的衰落, 它们服从 Rayleigh 分布, 方差分别为 0.8 和 0.2。以第 1 条传播路径为基准, α 为第 2 条传播路径的离开角, β 为第 2 条传播路径的到达角。采用 Monte Carlo 法来计算信道容量, 对 10^4 次瞬时信道容量平均得到信道容量。

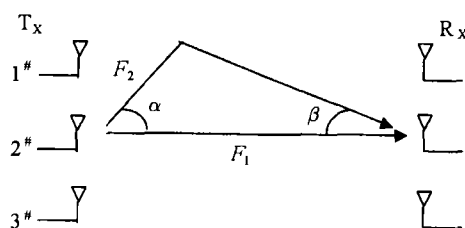


图 1 MIMO 信道模型

试验 1 令 $\beta = \pi/4, \alpha = \pi/6$, 仅对发射天线作选择, 信噪比 SNR 从 0 变化到 20dB , 信道容量如图 2, 可见发射天线选择提高了信道容量, 且选择天线 1 和 3 的信道容量最高, 选择天线 2 和 3, 1 和 2 的信道容量相同。

试验 2 令 $\beta = \pi/4, \alpha$ 从 0 变到 $\pi/2$, 对发射天线作选择, 接收天线不作选择, 信噪比 $\text{SNR} = 20\text{dB}$, 得到的信道容量如图 3。为对比, 图 4 示出了不同发射天线选择方式下信道容量相对于未作发射天线选择时增加的信道容量。

从结果中可观察到不同的离开角 α , 不同的天线选择方式下, 增加的信道容量不同。当 $\alpha < 42^\circ$ 时, 应选择天线 1 和 3, 当 $\alpha > 42^\circ$ 时, 应该选择天线 1 和 2 或 2 和 3。 α 变化范围内, 至少有 1 种天线选择方式能提高信道容量。

试验 3 若把天线间间隔从 $\lambda/2$ 降低到 $\lambda/4$, 其他参数同试验 2, 结果如图 5。可看到当天线间相关性增加后, 整个信道容量降低了。但天线选择仍能增加信道容量, 且天线 1 和 3 仍是最优选择。

试验 4 把发射和接收天线数增加为 4, 其他参数同试验 2, 容量如图 6。结果与试验 2 类似, 增加天线数不会影响天线选择的结果。

试验 5 考虑同时进行发射和接收天线选择的情况, 发射端选择天线 1 和 3, 接收端采用 3 种不同天线组合, 其它参数同试验 2, 结果如图 7。模拟结果表明, 在一定到达角范围内 ($< 30^\circ$), 收发天线选择的信道容量与仅作发射天线选择时相当。在到达角 $> 30^\circ$, 与发射天线选择的信道容量相比, 收发天线选择后容量降低。

试验 6 若把天线间间隔从 $\lambda/2$ 降低到 $\lambda/4$, 其他参数同试验 5, 结果如图 8。可看到当天线相关性增加后, 信道容量降低, 但存在一种同时发射和接收天线的选择方式 (发射天线 1, 3 和接收天线 1, 3), 在 α 变化范围内, 使信道容量提高。

上述大量仿真试验结果表明, 当 MIMO 信道矩阵为低秩时, 进行天线选择是非常有益的, 它能提高容量并降低系统复杂度。同时, 信道容量的增加受天线间隔、信道特征 (到达角、离开角), 天线选择方式等因素的影响。故在进行 MIMO 系统设计时, 需综合考虑到这些因素, 以获得低成本高性能的多天线无线通信系统。

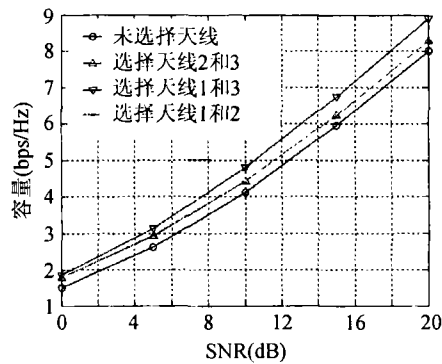


图 2 不同 SNR 下的信道容量

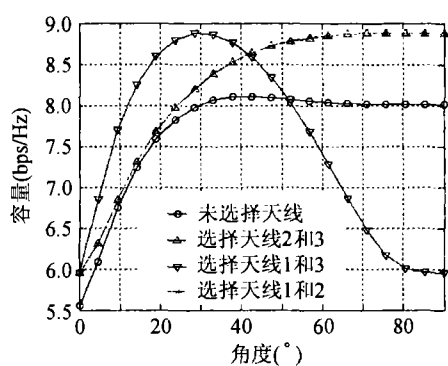


图 3 发射天线选择时信道容量

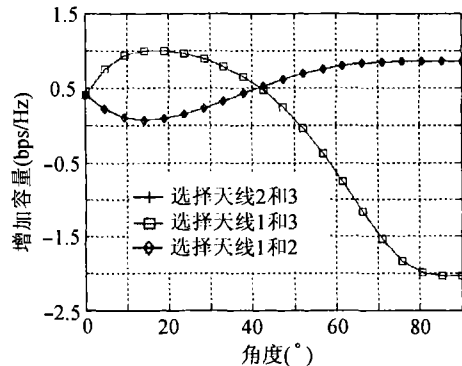


图 4 发射天线选择时增加的信道容量

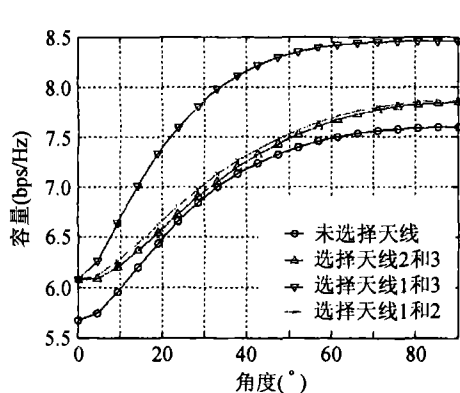


图5 发射天线选择时增加的信道容量
(天线间隔 $\lambda/4$)

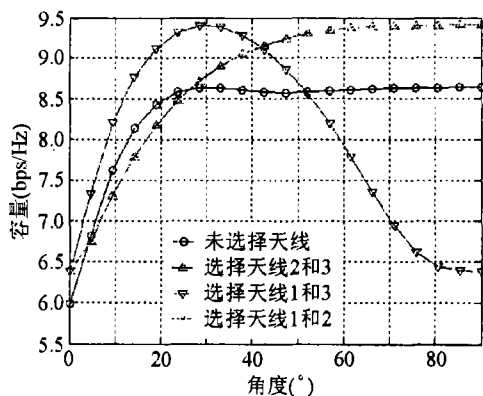


图6 发射天线选择时的信道容量
(天线数为4)

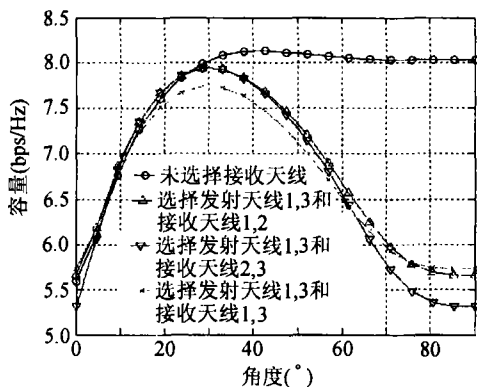


图7 同时选择发射和接收天线时的
信道容量 (天线间隔 $\lambda/2$)

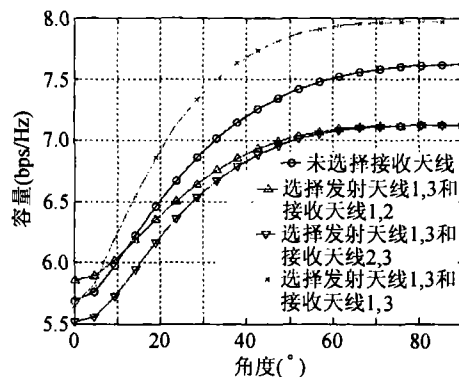


图8 同时选择发射和接收天线时的
信道容量 (天线间隔 $\lambda/4$)

参 考 文 献

- [1] G. J. Foschini, M. J. Gans, On limits of wireless communications in fading environment when using multiple antennas, *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3), 311-335.
- [2] V. Tarokh, N. Scshadri, A. R. Calderband, Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance critierion and code construction, *IEEE Trans. on IT*, 1998, 44(2), 744-765.
- [3] D. A. Gore, R. U. Nabar, A. Paulraj, Selecting an optimal set of transmit antennas for a low rank matrix channel, *IEEE ICASSP*, Istanbul, Turkey, 2000, 2785-2788.
- [4] A. F. Molisch, M. Z. Win, J. H. Winters, Capacity of MIMO systems with antenna selection, *IEEE ICC*, Amsterdam, the Netherlands, 2001, 570-574.
- [5] M. ali Khaligi, J. Brossier, G. Jourdain, K. Raoof, Water filling capacity of Rayleigh MIMO channels, *IEEE PIMRC*, San Diego, USA, 2001, 155-158.
- [6] S. Sandhu, R. U. Nabar, D. A. Gore, A. Paulraj, Near-optimal selection of transmit antennas for a MIMO channel based on Shannon capacity, *IEEE the 34th Asimomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Princeton, New Jersey, 2000, 567-571.
- [7] Rick S. Blum, Jack H. Winters, Neslon R. Sollenberger, On the capacity of cellular systems with MIMO, *IEEE VTC*, Atlantic City, NJ, 2001 Fall, 1220-1224.

- [8] R. W. Heath, Jr. Sumeer Sandhu, A. Paulraj, Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers, IEEE Communication Letters, 2001, 5(4), 142-144.

ANTENNA SELECTION EFFECT ON CHANNEL CAPACITY IN MIMO SYSTEM

Li Haitao Zhang Jing* Lu Jianhua

(Dept. of Electronic Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

**(Dept. of Electronic Eng., UEST of China, Chengdu 610054, China)*

Abstract In this paper the channel capacity in MIMO system is introduced, then the effects of antenna selection in the transmitter and receiver on channel capacity are analyzed. Simulation results indicate that the transmit antenna selection can increase channel capacity, the selection of the receiver and transmitter antennas simultaneously can reduce complexity, but cannot improve the channel capacity.

Key words Channel capacity, Antenna selection, Multiple Input Multiple Output (MIMO)

黎海涛: 男, 1972 年生, 博士, 目前从事多天线、多载波无线传输体制研究, 已发表论文 30 余篇。

张 靖: 女, 1975 年生, 博士, 从事自适应信号处理, 第三代移动通信等方面的研究。

陆建华: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线多媒体通信。