

Nakagami Keyhole衰落信道下 MIMO 系统 容量及天线选择

杨 亮, 秦家银

(中山大学电子与通信工程系, 广东广州 510275)

摘 要: 本文全面地分析了在 Nakagami 衰落信道下具有“匙孔”(keyhole)效应时正交块空时编码(STBCs)的多输入多输出(MIMO)系统的容量以及误比特率(BER)性能, 导出了该系统环境下平均容量的紧下边界值, 同时得出了系统中断概率的具体表达式及其误码率的近似值. 在此基础上分析了 Keyhole MIMO 信道下的天线选择问题. 最后进行了仿真, 其结果与理论分析一致. 研究表明, 在 Keyhole MIMO 信道中, 采用天线选择仍然能够获得与全复杂系统相同的分集增益.

关键词: 多输入多输出; 块空时编码; Keyhole Nakagami 衰落; 天线选择

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)01-0107-03

Capacity and Antenna Selection of MIMO System over Keyhole Nakagami Fading Channels

YANG Liang QIN Jiayin

(Dept. of Electronics and Communication Engineering, Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong 510275 China)

Abstract We present a comprehensive analysis for the capacity and bit error rate (BER) performance of orthogonal space-time block codes (STBCs) over Nakagami fading channels in the presence of keyholes of input multiple-output (MIMO). We first derive a tight lower capacity bound. We also present the exact expression for the outage probability and an approximated BER formula. On this basis we analyze the antenna selection problem over keyhole MIMO channels. Finally numerical results are presented to verify our analysis. It is shown that the diversity order with antenna selection is maintained as that of the full complexity system.

Key words multiple-input multiple-output (MIMO); space-time block codes; keyhole Nakagami fading; antenna selection

1 引言

研究表明多径衰落环境下的无线通信系统, 多天线技术能够有效地提高频谱效率而不需要额外的带宽^[1]. 但在实际的传播环境中, 由于“匙孔”现象所引起的秩缺乏会降低 MIMO 系统的容量及其性能^[2], 为此, Shin 等从理论上对“匙孔”效应进行了初步分析, 给出了不相关的瑞利衰落 MIMO 信道下平均容量的具体表达式, 但是该表达式含有非常复杂的 Meijer G 特殊函数, 不便数值计算和分析; Cui 等首次考虑了空间相关以及“匙孔”效应的联合影响, 并且给出了系统容量的一个边界值^[3]; Lee 等研究了不相关的 keyhole Nakagami 衰落信道, 得出了平均误码率 (SER) 的具体表达式^[4], 但其结果也是包含特殊函数的积分表达式, 不便进行分集增益性能的分析及其数值计算. 而 keyhole Nakagami 衰落信道下的系统中断概率迄今未见文献报道.

另外, 使用多天线要求多射频链路势必增加系统的复

杂度及成本, 而天线选择技术是有效降低复杂度和成本且同时又具有 MIMO 系统主要优点的方法. Gore 等给出了天线选择的理论分析方法和算法及其性能分析结果^[5], 但文中是用中断概率以及平均信噪比增益来分析和评价天线选择性能的; 本文作者曾研究了空间相关信道的天线选择问题, 并初步分析了 Keyhole MIMO 下天线选择的性能^[6-7]. 但 Keyhole MIMO 信道下的天线选择问题迄今还缺乏深入系统的研究. 为此, 本文研究 Nakagami Keyhole 衰落信道下 MIMO 系统容量及天线选择问题, 其研究结果对于 MIMO 系统的优化具有较大的参考价值.

2 系统与信道模型

我们考虑一个具有 n_t 根发送天线以及 n_r 根接收天线的无线通信系统. 假设接收端具有完整的信道状态信息 (CSI). 在 Keyhole 衰落信道中, 射频信号从发送端到接收端的唯一途径就是通过“匙孔”. 由于 Keyhole 的影响, 存在

退化信道, 其信道矩阵 H 中的元素可以写成^[4] $h_{ij} = \alpha_i \beta_j e^{j(\theta_i + \vartheta_j)}$, 其中 $\{\alpha_i e^{j\theta_i}\}_{i=1}^m$ 与 $\{\beta_j e^{j\vartheta_j}\}_{j=1}^m$ 分别表示发送和接收端天线阵列的散射, $j = \sqrt{-1}$. 因为 $m = 1$ 时, Nakagami 衰落信道转化成瑞利衰落信道, 而且具有系数 K 的莱斯衰落信道也近似成具有衰落参数 m 的 Nakagami 分布, 如 $m = (K + 1)^2 / (2K + 1)$, 不失一般性, 我们考虑 Nakagami 衰落情况. 假设相位 θ_i 与 ϑ_j 在 $[0, 2\pi)$ 范围内满足独立均匀分布, 而包络 α_i 和 β_j 满足 Nakagami 分布, 并假设 H 的每一项具有单位功率, 发送与接收端经历相同的衰落.

3 容量及误码率性能分析

3.1 平均容量

使用正交块空时编码可以把 MIMO 信道转化成为单输入单输出 (SISO) 信道^[8], 此时系统的瞬时容量可以表达成为 $C = R \log_2 \left[1 + \frac{\|H\|_F^2 E_s}{R n_T N_0} \right]$ b/s/Hz (1)

其中 R 为块空时编码速率, E_s 是平均传输功率, N_0 是每根接收天线的高斯噪声方差. $\|H\|_F$ 表示信道矩阵 H 的范数. 令 $\bar{g} = E_s / (R n_T N_0)$, $Z = \|H\|_F^2$, $X = \sum_{i=1}^m \alpha_i^2$ 以及 $Y = \sum_{j=1}^m \beta_j^2$, 考虑到 α_i 与 β_j 为 Nakagami m 分布, α_i^2 和 β_j^2 服从 Gamma 分布, 经过复杂的推导, 并利用 Jensen 不等式, 最后可以得到平均容量的边界值为

$$E\{C\} \geq R \log_2 \left(1 + \bar{g} e^{y(mm) + y'(mm) - 2hm} \right) \quad (2)$$

其中 $y(z) = \Gamma'(z) / \Gamma(z)$ 是 Digamma 函数. 如果 $m = 1$, 则式 (2) 简化成为瑞利衰落情况^[3].

如果 \bar{g} 远远大于 1, 我们可以获得渐近平均容量值为 $E\{C\} \geq R \log_2 \bar{g} + R [y(n_T m) + y(n_R m) - 2hm] \log_2 e$ (3)

上式表明, 在 Keyhole MIMO 信道中, 只有分集增益而没有复用增益.

3.2 中断概率

系统的中断容量 C_{out} 对应于一中断概率, 表示信道容量 C 低于 C_{out} 的概率, 可以定义为

$$P_{out} = P(C < C_{out}) \quad (4)$$

结合式 (1), 有 $P_{out} = P \left[Z < \frac{2^{C_{out}/R} - 1}{\bar{g}} = \eta \right]$ (5)

经过一系列的推导, 可以得到精确的中断概率表达式为

$$P_{out} = \int_0^\eta p_z(z) dz = 1 - \frac{2}{\Gamma(n_T m)} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(\Gamma m^2)^k K_{-m+k}(2m\sqrt{\eta})}{k (m\sqrt{\eta})^{-m+k}} \quad (6)$$

其中上面的结果只适用于整数衰落参数, 即 $m \in \mathbb{N}$.

3.3 误码率性能

应用 Chernoff 边界, 可以得到采用 BPSK 调制时的条件误比特率为

$$P_b(E|Z) = Q(\sqrt{2gZ}) \leq \frac{1}{2} \exp(-gZ) \quad (7)$$

利用前面推导过程中的有关表达式, 可得

$$P_b(E) \leq \int_0^\infty \frac{1}{2} \exp(-gZ) p_z(z) dz = \frac{m^{2mn}}{2\Gamma(n_T m)\Gamma(m n_R)} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{t^{n_T(m-n)+1}} e^{-t} z^{m-1} \cdot \exp\left[-\left(g + \frac{m^2}{t}\right)z\right] dz dt = \frac{1}{2} \left(\frac{m}{g}\right)^{m^2} \Psi\left(n_T m, n_T m - m n_R + 1; \frac{m}{g}\right) \quad (8)$$

其中 $\Psi(a, b, z)$ 是合流超几何函数. 再利用等式 $z^a \Psi(a, a-b+1; z) = {}_2F_0(a, b; -z^{-1})$, 最后可得 $P_b(E) \leq \frac{1}{2} {}_2F_0\left(n_T m, m n_R; -\frac{g}{m^2}\right)$ (9)

其中 ${}_pF_q(a_1, a_2, \dots, a_p; b_1, \dots, b_q; z)$ 是一般化的超几何函数.

4 Keyhole MIMO 信道下的天线选择

为简单起见, 本文以 Keyhole MIMO 信道下接收端的天线选择为例, 仅考虑一个 $n_T = n_R = 2$ 的 Keyhole MIMO 系统, 在接收端根据最大瞬时信噪比选择一根接收天线. 此时信道矩阵的平方范数可以写成

$$X_i = \beta_i^2 \sum_{j=1}^2 \alpha_j^2 \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

为了分析方便, 假设 $X_1 < X_2$, 并且用 Y_1 与 Y_2 分别代替 X_1, X_2 , 这样 $i = 2$ 就是所要选择的天线, 因为其最大化信道增益同时也是最大化接收信噪比. 于是, 我们可以得到 X_i 的 PDF 和 CDF. 根据有序统计, 我们可以得到 Y_2 的 PDF. 令 $g' = E_s / N_0$, 可导出 Keyhole MIMO 信道下采用天线选择时的系统误比特率为

$$P_b(E) = \int_0^\infty Q(\sqrt{g'y}) p_{Y_2}(y) dy \leq \frac{2m^{3n}}{\Gamma(2m)\Gamma(m)} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{1}{2}g'y\right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\Gamma(m)} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{m^{k+m}}{k!} y^{(k+m)/2} K_{k-m}(2m\sqrt{y})\right] \cdot y^{\frac{3n}{2}-1} K_m(2m\sqrt{y}) dy = \frac{2}{\Gamma(2m)\Gamma(m)} \left[\frac{1}{2^{3n-1}} \int_0^\infty z^{3n-1} \exp\left(-\frac{g'}{8n^2} z^2\right) K_m(z) dz - \frac{2}{\Gamma(m)} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k! 2^{4n+k-1}} \int_0^\infty z^{4n+k-1} \exp\left(-\frac{g'}{8n^2} z^2\right) K_m(z) K_{m-k}(z) dz \right] \quad (11)$$

上式中的第一个积分 I_1 由积分表可得

$$I_1 = \frac{\Gamma(2m)\Gamma(m)}{2} \left(\frac{g'}{8n^2}\right)^{-1/2(3n-1)} \exp\left(\frac{m^2}{g'}\right) \cdot W_{-(3n-1)/2, m/2} \left(\frac{2m}{g'}\right) \quad (12)$$

其中 $W_{z, b}(z)$ 是 Whittaker 函数. 第二个积分 I_2 相当复杂, 很难得到精确的积分结果. 利用近似表达式 $K_n(z) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-1)^i (-i+n-1)!}{i!} \left(\frac{z}{2}\right)^{2-n}$, 可以导出

$$I_2 \approx \frac{1}{4} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(-1)^i (-i+m-1)!}{i! 2^{2i-m}} \left(\frac{g'}{8n^2}\right)^{-1.2 \cdot (3m+k+2i-1)}$$

$$\times \Gamma(2m + i) \Gamma(m + k + i) \cdot \exp\left[\frac{m}{g}\right] W_{-1/2}^{(3m+k+2i-1)(M-k)/2}\left(\frac{2m}{g}\right) \quad (13)$$

把式(12)和(13)代入式(11), 就可以得到最终结果.

当 $m = 1$ (瑞利衰落情况), 我们可以获得紧凑的误比特率表达式为

$$P_b(E) \approx 8(1/g')^2 \exp(1/g') W_{-2, 0.5}(2/g') \quad (14)$$

5 仿真结果及结论

为验证本文的理论分析结果, 我们进行了相应的仿真. 对于两根发送天线, 即 $n_T = 2$ 使用单位编码速率的 ST-

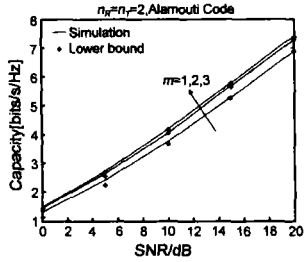


图 1 不同衰落参数下的系统平均容量

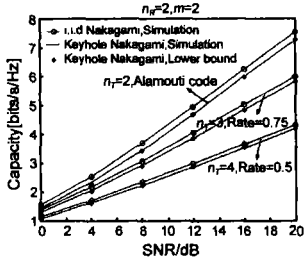


图 2 不同空时编码结构下的系统平均容量

BC G_2 (Alamouti code), 其码字矩阵为 $G_2 = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$

其中上标* 表示复数转置. 仿真结果如下, 图 1给出了不同衰落参数下系统的平均容量, 这时 $n_T = n_R = 2$ 相对于仿真结果, 可以发现式(2)是一个紧容量下边界表达式. 图 2给出了不同空时编码结构下的系统容量, 并且与独立同分布(i.i.d) Nakagami衰落下的系统平均容量进行比较, 结果表明 Keyhole的存在, 会降低系统的容量. 这是因为 Keyhole信道只有一个自由度, 相对于 i.i.d Nakagami信道, 它会经历两倍以上衰落. 图 3给出了

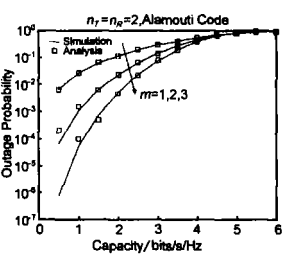


图 3 不同衰落参数下的系统中断概率

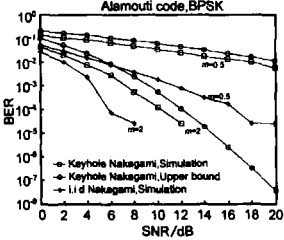


图 4 不同衰落参数下系统的平均误码率

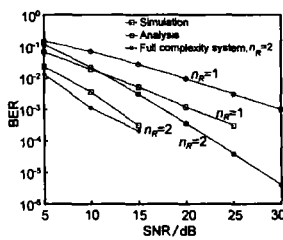


图 5 Keyhole MIMO 信道采用天线选择时的误比特率

Alamouti code下的中断概率, 从该图可以看出, 我们的理论分析结果与仿真结果完全一致. 图 4给出了两种信道下误码率的比较, 显然 Keyhole的存在会降低系统的性能. 并且我

们发现(9)式是一个很好的近似, 它避免了积分计算. 图 5给出了 Keyhole MIMO 信道采用天线选择时的系统误比特率. 从该图可以看出, 在 Keyhole MIMO 信道下, 采用天线选择依然能够获得与全复杂系统一样的分集增益(体现为误码率曲线的斜率).

参考文献:

[1] I E Telatar Capacity of multiantenna Gaussian channels [J]. Eur Trans Telecommun 1999, 10: 585-595.

[2] H Shin, JH Lee Capacity of multiple-antenna fading channels spatial correlation, double scattering and keyhole [J]. IEEE Trans Inform Theory 2003, 49: 2636-2647.

[3] X W Cui, Z M Feng Lower capacity bound for MIMO correlated fading channels with keyhole [J]. IEEE Commun Lett 2004, 8: 500-502.

[4] H Shin, JH Lee Performance analysis of space-time block codes over keyhole fading channels [J]. IEEE Trans Veh Technol 2004, 53: 351-362.

[5] D A Gore, A J Paulraj MIMO antenna subset selection with space-time coding [J]. IEEE Trans Signal Processing 2002, 50: 2580-2588.

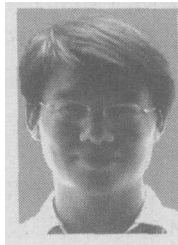
[6] LYang, DTang, JY Qin Performance of spatially correlated MIMO channel with antenna selection [J]. Electron Lett 2004, 40: 1281-1282.

[7] LYang, JY Qin Performance of STBCs with antenna selection, spatial correlation and Keyhole [J]. EE Proc Communications, accepted for publication.

[8] V Tarokh, H Jafarkhani, A R Calderbank Space-time block codes from orthogonal designs [J]. IEEE Trans Inform Theory 1999, 45: 1456-1467.

[9] S M Alamouti A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. IEEE J Select Areas Commun 1998, 16: 1451-1458.

作者简介:



杨亮 男, 1978年出生于湖南洞口, 中山大学博士生, 主要研究方向为新一代移动通信系统技术.

E-mail: yangliang_xian@163.com.



秦家银 男, 1961年出生于湖北荆门, 中山大学信息科技学院电子与通信工程系教授, 博士生导师, 信息科技学院副院长, 主要研究方向为无线 CDMA 与移动通信技术及光电技术与通信.