

Keyhole 信道下正交空时分组码的性能分析

赵宏志, Yi Gong, 唐友喜, 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川成都 610054)

摘 要: 在某些 MIMO (multiple-input multiple-output) 衰落环境下, 发射或者接收信号不相关, 但是系统的信道容量依然很低, 这种现象称之为 Keyhole 效应. 本文针对 Keyhole 衰落 MIMO 信道, 在任意的收发天线数目下, 对正交空时分组码进行了性能分析, 通过矩生成函数的分析方法, 分析了 Keyhole 信道可以提供的分集增益, 给出严格的封闭的符号错误概率表达式. 并且针对收发天线数目不相等的情况, 给出简洁的近似结果. 在 Keyhole 衰落信道下的计算机仿真表明, 严格的分析结果与仿真结果一致, 在高信噪比下, 近似表达式也与仿真的结果吻合.

关键词: 空时分组码; Keyhole 信道; 多人多出; 符号错误概率; 分集增益

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-030-05

Performance of Orthogonal Space-Time Block Codes in Keyhole MIMO Fading Channels

ZHAO Hong-zhi, YI Gong, TANG You-xi, LI Shao-qian

(National Key Lab of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: In some multiple-input multiple-output (MIMO) fading environments, the MIMO channel capacity can become very low even for uncorrelated signals; this effect has been termed keyhole or pinhole. In this paper, we present the closed-form error probabilities of space time block codes (STBC) for arbitrary number of transmit and receive antennas with M -QAM modulation in Keyhole MIMO fading channels. Using a moment-generation-function-based (MGF-based) analysis approach, we provide the rigorous closed-form results of symbol error probability (SEP). With different number of transmit and receive antennas, the approximate expressions is presented at medium and high SNR regime. Finally, simulation results are also provided to verify our analytical results.

Key words: space-time block code; keyhole channel; MIMO; symbol error probability; diversity gain

1 引言

近年来, 在无线通信领域, 使用多个收发天线的 MIMO 系统, 由于其可以同时提供分集和复用增益, 因此受到了广泛的关注. 在文献[1]中, Alamouti 提出了一种在双发天线下的简单的空时分组码, 然后在文献[2]中又推广到了任意的发射天线数目. 由于空时分组码的正交结构, 在接收端可以采用逐符号的解码方法实现最大似然的性能, 具有 m 个发射天线和 n 个接收天线的空时分组码系统可以实现 mn 的全分集增益^[3].

在实际的 MIMO 衰落环境下, 尽管发射信号和接收信号都是不相关信号, 但此时信道的自由度为 1, 我们称之为 Keyhole 或者 Pinhole 信道^[4,5]. Keyhole 信道的秩亏特性会降低整个 MIMO 系统的频谱效率和链路质量^[6]. S. Sanayei 对空时格码 (Space-time Trellis Code, STTC) 在 Keyhole 信道下的性能进行了分析, 并提出了设

计准则^[7]. 在文献[6]中, H. Shin 分析了 keyhole 效应对 STBC 码的性能影响, 给出了包含超几何函数的符号错误概率的表达式, 这种包含超几何函数的符号错误概率表达式难以分析, 得到封闭的结果十分困难. 在文献[8]中, Gong 给出在 BPSK 调制下, 某些特殊的 STBC 码的性能分析结果. 然而, 在一般的条件下, 比如 M -ray 正交幅度调制 (M -QAM), 任意的发射和接收天线数目, 到目前为止, Keyhole 信道下正交 STBC 的封闭的错误概率表达式还没有文献研究.

本文中, 我们将首次给出在正方形 M -QAM 调制, 任意的收发天线数目下, STBC 在 Keyhole 衰落信道下封闭的符号错误概率表达式. 此外, 在中高信噪比情况下, 我们还给出一种简单的符号错误概率表达式, 可用来快速评估 STBC 在 Keyhole 信道下的性能, 本文的分析方法可避免复杂的积分运算^[6]和节省仿真时间.

本文的其余部分结构如下: 第 2 节给出正交空时分

组码在 Keyhole MIMO 信道下的系统模型;第 3 节简要回顾基于矩生成函数的分析方法,给出空时分组码解码以后的等效信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)的矩生成函数;第 4 节分析了采用正方形 M-QAM 调制的正交空时分组码在 Keyhole MIMO 衰落符号错误概率性能,分别给出了严格的和近似的表达式;第 5 节是计算机仿真结果及分析;最后是本文结束语。

如无特殊注明,本文采用以下标记:\$(g)^T\$和\$(g)^H\$分别表示\$(g)\$的转置和转置共轭,\$N_u(m, R)\$表示循环对称 \$u\$ 变量的复高斯分布,均值为 \$m\$,协方差矩阵为 \$R\$, \$I_u\$ 表示 \$u \times u\$ 的单位矩阵, \$\|A\|_F^2\$ 表示矩阵 \$A\$ 的 Frobenius 范数, \$\|z\|^2\$ 表示矢量 \$z\$ 的欧几里德范数的平方。

2 系统模型

我们考虑一个 \$m\$ 发 \$n\$ 收的 MIMO 无线通信系统,假设信道是平坦衰落信道,接收机已知信道衰落信息,但是发射机未知信道衰落信息。在 \$L\$ 个时隙以内,信道的状态保持不变,在下一段 \$L\$ 个时隙,信道状态可以发

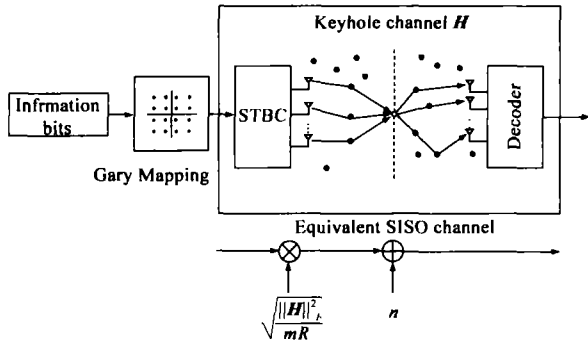


图 1 正交 STBC 系统在 Keyhole 信道下的系统模型以及等效 SISO 信道模型

生变化。\$s = (s_1, s_2, \dots, s_m)^T\$ 表示由 \$m\$ 个发射天线同时发射的 \$m\$ 个符号, \$s_i\$ 取自 M-QAM 星座集。如图 1 所示, 信号模型可以表达为:

$$r = Hs + \eta \quad (1)$$

其中, \$n \times 1\$ 的矢量 \$r\$ 表示接收信号矢量, \$H\$ 是 \$n \times m\$ 的信道矩阵, 其中的子项 \$H_{i,j}\$ 表示从第 \$j\$ 个发射天线到第 \$i\$ 个接收天线的复信道系数。\$\eta\$ 是 \$n \times 1\$ 的噪声矢量, 其中的子项为独立同分布的循环对称复高斯变量, 均值为 0, 方差为 \$N_0\$, 即 \$\eta: N_n(0, N_0, I_n)\$。

从发射天线发射的符号的平均功率归一化为 \$E_s/m\$, 因此在接收天线处接收到的信号功率为 \$E_s\$, 每个接收天线处的信噪比为 \$E_s/N_0\$。

受 Keyhole 影响的信道矩阵可以表示为^[6]:

$$H = \beta \alpha^T = \begin{pmatrix} \beta_1 \alpha_1 & \beta_1 \alpha_2 & \cdots & \beta_1 \alpha_m \\ \beta_2 \alpha_1 & \beta_2 \alpha_2 & \cdots & \beta_2 \alpha_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_n \alpha_1 & \beta_n \alpha_2 & \cdots & \beta_n \alpha_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, 列矢量 \$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T \subseteq \mathbb{C}^m\$, \$\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)^T \subseteq \mathbb{C}^n\$。假设 Keyhole 无损失的转发接收到信号能量, 在 Rayleigh 衰落的情况下, \$\alpha\$ 和 \$\beta\$ 分别建模为 \$N_n(0, N_0 \cdot I_n)\$ 和 \$N_m(0, N_0 \cdot I_m)\$^[6]。需要指出的是, 所以的 \$\alpha_i\$ 和 \$\beta_j\$ 都是相互独立的, 信道矩阵 \$H\$ 的所有项都是不相关的, 但是 \$\text{rank}(H) = 1\$。

我们假设正交 STBC 系统的信道模型如式(2)所示, 空时分组码的码率为 \$R\$, 则译码以后每个符号的瞬时 SNR 为^[8]

$$\gamma_{\text{STBC}} = \frac{\|H\|^2}{mR} \cdot \frac{E_s}{N_0} = \frac{\|\alpha\|^2 \|\beta\|^2}{mR} \cdot \frac{E_s}{N_0} \quad (3)$$

在本文的以下部分, 将根据公式分析正交 STBC 在 Keyhole 信道下系统性能, 分别给出在正方形 M-QAM 调制下, 严格的和近似的符号错误概率表达式。

3 译码后符号 SNR 的 PDF 和 MGF 函数

首先, 我们以 BPSK 为例, 简要回顾一下基于矩生成函数(Moment Generation Function, MGF)的平均符号错误概率分析方法。在平坦衰落的信道下, 我们定义每符号的瞬时 SNR 为 \$\gamma\$, 其概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为 \$p_\gamma(\gamma)\$, BPSK 在衰落信道下平均符号错误概率表达式为

$$P_s(E) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} M_\gamma\left(\frac{1}{\sin^2 \theta}\right) d\theta \quad (4)$$

其中, \$M_\gamma(s)\$ 是 \$\gamma\$ 的矩生成函数, 有以下定义

$$M_\gamma(s) @ \int_0^\infty e^{-s\gamma} p_\gamma(\gamma) d\gamma$$

将公式改写为

$$\gamma_{\text{STBC}} = \mu \cdot U = \mu \cdot \|\alpha\|^2 \|\beta\|^2 \quad (5)$$

其中, \$\mu @ \frac{1}{mR} \cdot \frac{E_s}{N_0}\$, \$U @ \|\alpha\|^2 \|\beta\|^2\$。由于 \$\|\alpha\|^2\$ 和 \$\|\beta\|^2\$ 都是服从中心卡方分布的随机变量, 自由度分别为 \$2m\$ 和 \$2n\$, \$U\$ 的概率密度函数^[8]

$$P_U(u) = \frac{2u^{(m+n)/2-1} H_{n-m}(2\sqrt{u})}{\Gamma(m)\Gamma(n)} \quad (6)$$

其中, \$\Gamma(\cdot)\$ 是 Gamma 函数, \$H_v(\cdot)\$ 是调整的 \$v\$ 阶 Hankel 函数, 其积分表达式为^[10]

$$H_\nu(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{z}{2} \right)^\nu \int_0^\infty \frac{e^{-x-z^2/4x}}{x^{z+1}} dx, |\arg z| < \frac{\pi}{2}, \text{Re}\{z^2\} > 0 \quad (7)$$

\$U\$ 的矩生成函数可以表示为

$$M_U(s) = \frac{e^{1/s} s^{-n}}{\Gamma(m)} \int_{1/s}^\infty e^{-t} (t-1/s)^{m-1} t^{-n} dt \quad (8)$$

经过一系列数学操作以后, 我们得到如下结论(详见附录)

结论 1

当 \$m < n\$

$$M_U(s) = \frac{(-1)^{m+n-1}}{\Gamma(m)} \sum_{i=0}^{m-1} \binom{m-1}{i} \frac{1}{(n-i-1)!} \cdot \left[\frac{e^{1/s} Ei(-1/s)}{s^{(m+n-i-1)}} + \sum_{j=0}^{n-i-2} \frac{(-1)^j j!}{s^{(m+n-i-j-2)}} \right] \quad (9)$$

当 $m = n$

$$M_U(s) = \frac{(-1)}{\Gamma(m)} \sum_{i=0}^{m-1} \binom{m-1}{i} \frac{1}{(m-i-1)!} \cdot \left[\frac{e^{1/s} Ei(-1/s)}{s^{(2m-i-1)}} + \sum_{j=0}^{m-i-2} \frac{(-1)^j j!}{s^{(2m-i-j-2)}} \right] + \frac{-1}{\Gamma(m)} \cdot \frac{e^{1/s} Ei(-1/s)}{s^m} \quad (10)$$

当 $m > n$

$$M_U(s) = \frac{(-1)^{m+n-1}}{\Gamma(m)} \sum_{i=0}^{m-1} \binom{m-1}{i} \frac{1}{(n-i-1)!} \cdot \left[\frac{e^{1/s} Ei(-1/s)}{s^{(m+n-i-1)}} + \sum_{j=0}^{n-i-2} \frac{(-1)^j j!}{s^{(m+n-i-j-2)}} \right] + \frac{1}{\Gamma(m)} \sum_{i=n}^{m-1} \binom{m-1}{i} (-1)^{m-i-1} (i-n)! \cdot \sum_{k=0}^{i-n} \frac{1}{s^{m+n+k-i-1} k!} \quad (11)$$

其中, $Ei(x) = -\int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$ 表示指数积分函数^[10].

结论 2

当 s 值较大的时候, $M_U(s)$ 可以表示为

$$M_U(s) = \begin{cases} \frac{(q-p-1)!}{s^p (q-1)!}, & m \neq n \\ \frac{\ln(s)}{s^m \Gamma(m)}, & m = n \end{cases} \quad (12)$$

其中, $p = \min(m, n)$, $q = \max(m, n)$. 根据式(12), 我们得到如下结论, 在 $m \neq n$ 的情况下, Keyhole 信道可以获得的分集增益为 $\min(m, n)$; 在 $m = n$ 的情况下, Keyhole 信道的分集增益大于 $n-1$, 同时小于 n , 上述结论可以用以下不等式解释

$$\frac{1}{s^n} < \frac{\ln s}{s^n} < \frac{1}{s^{n-1}} \quad (13)$$

4 性能分析

根据 γ_{STBC} 的矩生成函数, 我们将分析一个 $m \times n$ 的正交空时分组码系统在 Keyhole 信道下的性能, 以 M-QAM 调制方式为例, 给出符号错误概率的封闭结果. 当收发天线数目不等的时候, 我们还将给出适用于中高信噪比的近似表达式, 可以避免复杂的数值积分和冗长的计算机仿真时间.

正方形 M-QAM 在 AWGN 信道下的符号错误概率^[9]

$$P_s(E) = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \right) \int_0^{\pi/2} \exp \left(-\frac{E_s}{N_0 2(M-1)(\sin \theta)^2} \right) d\theta - \frac{4}{\pi} \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \right)^2 \int_0^{\pi/4} \exp$$

$$\cdot \left(-\frac{E_s}{N_0 2(M-1)(\sin \theta)^2} \right) d\theta \quad (14)$$

其中, M 表示星座图的阶数.

根据式(4), 考虑到 $M_\gamma(s) = M_U(s\mu)$, 采用正方形 M-QAM 调制的正交 STBC 在衰落信道下的平均符号错误概率为

$$P_s(E) = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \right) \int_0^{\pi/2} M_U \left(\frac{3\mu}{2(M-1)(\sin \theta)^2} \right) d\theta - \frac{4}{\pi} \left(\frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \right)^2 \int_0^{\pi/4} M_U \left(\frac{3\mu}{2(M-1)(\sin \theta)^2} \right) d\theta \quad (15)$$

A. $m < n$

将式(9)带入式(15), 得到准确的符号错误概率为

$$P_s(E) = \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \frac{(-1)^{m+n-1}}{\Gamma(m)} \sum_{i=0}^{m-1} \binom{m-1}{i} \frac{1}{(n-i-1)!} \left[A_1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot A_2 \right] \quad (16)$$

其中

$$A_1 = Z \left(m+n-i-1; \frac{\pi}{2}; a \right) + \sum_{j=0}^{n-i-2} \frac{(-1)^j j!}{a^{m+n-i-j-2}} \cdot I(m+n-i-j-2; \frac{\pi}{2}) \quad (17)$$

$$A_2 = Z \left(m+n-i-1; \frac{\pi}{4}; a \right) + \sum_{j=0}^{n-i-2} \frac{(-1)^j j!}{a^{m+n-i-j-2}} \cdot I(m+n-i-j-2; \frac{\pi}{4}) \quad (18)$$

其中, $a = \frac{3}{2(M-1)mR} \cdot \frac{E_s}{N_0}$, $Z(\cdot)$ 和 $I(\cdot)$ 的定义如附录公式(A.14)和(A.16)所示.

当信噪比较高的情况下, 直接将公式(12)带入公式(15), 可以得到以下近似表达式

$$P_s(E) = \frac{4(n-m-1)!}{\pi(n-1)! \cdot a^m} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \left[I \left(m; \frac{\pi}{2} \right) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) I \left(m; \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (19)$$

B. $m = n$

类似于 $m < n$ 的情况, 将式(10)带入式(15), 得到准确的符号错误概率

$$P_s(E) = \frac{-4}{\pi \Gamma(m)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \left\{ \sum_{i=0}^{m-2} \binom{m-1}{i} \frac{1}{(m-i-1)!} \cdot \left[A_1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot A_2 \right] + A_3 \right\} \quad (20)$$

其中, A_1 和 A_2 的定义见式(17)和式(18)

$$A_3 = Z \left(m; \frac{\pi}{2}; a \right) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Z \left(m; \frac{\pi}{4}; a \right) \quad (21)$$

根据式(12), 在 $m = n$ 的情况下, 由于对数函数的存在, 不可能得到符号错误概率的简单估计表达式, 只有在 $m \neq n$ 的情况下, 才可以得到简介的近似表达式.

C. $m > n$

将式(11)带入式(15),在 $m > n$ 情况下平均的符号错误概率为

$$P_s(E) = \frac{4}{\pi\Gamma(m)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} \binom{m-1}{i} \frac{(-1)^{m+n-1}}{(n-i-1)!} \cdot \left[A_1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot A_2 \right] + A_4 \right\} \quad (22)$$

其中,

$$A_4 = \sum_{i=n}^{m-1} \binom{m-1}{i} (-1)^{m-i-1} (i-n)! \sum_{k=0}^{i-n} \frac{I(m+n+k-i-1; \frac{\pi}{2}) - (1 - \frac{1}{\sqrt{M}}) I(m+n+k-i-1; \frac{\pi}{4})}{a^{m+n+k-i-1} k!} \quad (23)$$

在高信噪比下的近似表达式为

$$P_s(E) = \frac{4(m-n-1)!}{\pi(m-1)! \cdot a^n} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot \left[I\left(n; \frac{\pi}{2}\right) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) I\left(n; \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (24)$$

结论 3

考虑一个 m 发 n 收的正交 STBC 系统,采用正方形 QAM 调制,符号速率为 R , $m \neq n$,当信噪比较大时,Keyhole 信道下符号错误概率的近似表达式为

$$P_s(E) = \frac{4 \cdot (q-p-1)}{\pi(q-1)! \cdot \left[\frac{3}{2(M-1)mR} \cdot \frac{E_s}{N_0} \right]^p} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \left[I\left(p; \frac{\pi}{2}\right) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) I\left(p; \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (25)$$

其中, $p = \min(m, n)$, $q = \max(m, n)$.

式(25)可以用来估算正交 STBC 方案在中高信噪比下的误符号率,在以下的仿真结果中,可以看到基于式(25)的近似计算结果与仿真结果在高信噪比下相吻合.另一方面,在低信噪比情况下,式(25)可以做为误符号率的上界.

5 仿真结果分析

在本节,我们提供了计算机仿真结果,以验证分析结果的准确性.空时分组码分别采用文献[1]和[2]定义的全速率的 G_2 (Alamouti Code)和 $1/2$ 码率的 G_4 编码方案.

图 2 显示了在 4-QAM 调制下,采用 G_4 方案的 STBC 系统的符号错误概率随接收天线处 SNR 的变化曲线.我们分别给出在接收天线数目为 1 和 2,在独立 Rayleigh 和 Keyhole 两种衰落信道下的误符号率性能,同时给出了近似的计算结果.当接收天线数目为 1 时,STBC G_4 在独立同分布的 Rayleigh 信道下可以获得的分集增益为 4,而在 Keyhole 信道下,仅能获得 1 阶的分集

增益,这些结果与我们的分析结果相吻合,在 $m \neq n$ 的情况下,Keyhole 信道所能取得的分集增益为 $\min(m, n)$.当接收天线数目为 2 时,Keyhole 信道可以获得 2 阶的分集增益,但是相同的 STBC 系统在独立 Rayleigh 信道下可以获得的分集增益为 8,性能下降的原因在于 Keyhole 信道的自由度仅为 1.在接收天线数目为 2,符号错误概率为 10^{-6} 时,由于 Keyhole 效应引起的性能下降约为 17dB.当 SNR > 18dB 时,近似的结果与仿真结果十分吻合,可以用来迅速准确的估计在 Keyhole 信道下系统在中高信噪比的性能.

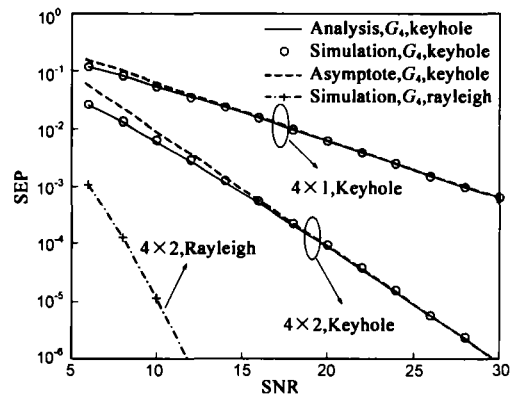


图 2 STBC $G_4(m=4, n=1, 2)$ 在 Keyhole 信道和 Rayleigh 信道下的符号错误概率性能

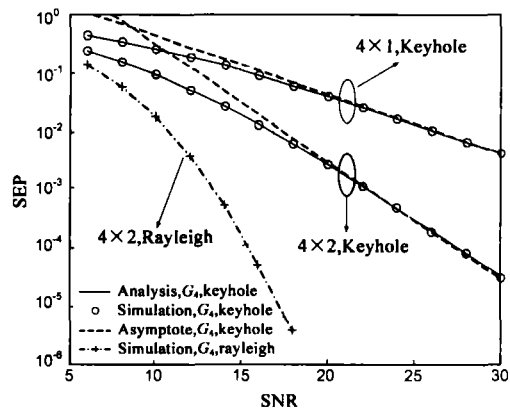


图 3 STBC $G_4(m=4, n=1, 2)$ 在 Keyhole 信道和 Rayleigh 信道下的符号错误概率性能

图 3 表示在 16-QAM 调制下,采用 G_4 方案的正交 STBC 系统的符号错误概率性能.接收天线数目分别为 1 和 2,仿真信道采用 Rayleigh 和 Keyhole 两种信道,同时提供了近似的结果.可以得到类似的结论,当接收天线数目为 2 时,STBC G_4 在独立同分布的 Rayleigh 信道下可以获得的分集增益为 8,而在 Keyhole 信道下,仅能获得 2 阶的分集增益,与我们的分析结果相吻合;与 Rayleigh 信道下的性能相比,由于 Keyhole 效应的影响,系统性能在符号错误概率为 10^{-3} 时,性能下降了约 9dB.

图 4 给出了在 16-QAM 调制下,采用 G_2 方案的正交 STBC 系统在 Keyhole 信道下的符号错误概率性能,同时

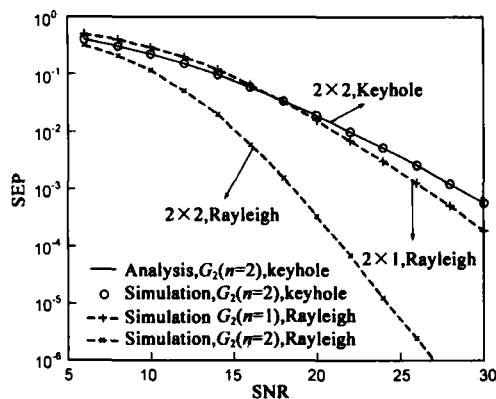


图4 STBC $G_2(m=2, n=1, 2)$ 在 Keyhole 信道和 Rayleigh 信道下的符号错误率性能 16-QAM 调制

提供了在独立 Rayleigh 信道下的结果以供对比。从图 4 可以看出, $G_2(m=2, n=1)$ 在独立同分布的 Rayleigh 衰落信道下可以取得的分集增益为 2, 而 $G_2(m=n=2)$ 在 Keyhole 信道下, 所取得的分集增益介于 1 和 2 之间(从高信噪比时曲线的斜率得以体现)。以上结果证实了我们的分析结果, 当 $m=n$ 时, Keyhole 信道下系统所能获得的分集增益大于 $m-1$, 小于 m 。为了方便比较, 我们还给出 $G_2(m=n=2)$ 在独立同分布的 Rayleigh 衰落信道的性能, 其分集增益为 4。

6 结束语

本文分析了在正方形 M-QAM 调制方式下, 正交 STBC 系统在 Keyhole 信道下的符号错误率性能。对于任意的收发天线数目, 分析了在 Keyhole 信道下的分集增益, 给出严格的封闭的符号错误率表达式, 特别是在收发天线数目不相等的条件下, 我们给出了简单的近似表达式, 在高信噪比时, 与实际仿真结果十分吻合。基于蒙特卡罗方法的计算机仿真结果证明了本文的分析结果。最为重要的是, 本文提供的误符号率的结果可以用来快速评估采用正交 STBC 方案的无线通信系统在 Keyhole 信道下的性能, 从而避免了复杂的积分运算和冗长的计算机仿真时间。

参考文献:

- [1] S M Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE J. Select. Areas Commu., 1998, 16(8): 1451 - 1458.
- [2] V Tarokh, H Jafarkhani, A R Calderbank. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1999, 45(5): 1456 - 1467.
- [3] Y Gong, K B Letaief. Concatenated space-time block coding with trellis coded modulation in fading channels[J]. IEEE Trans. Wireless Commu., 2002, 1(4): 580 - 590.
- [4] D Chizhik, G J Foschini, M J Gans, R A Valenzuela. Keyholes,

correlations, and capacities of multielement transmit and receive antennas[J]. IEEE Trans. Wireless Commu., 2002, 1(2): 361 - 368.

- [5] D Gesbert, H Blokskei, D A Gore, A J Paulraj. Outdoor MIMO wireless channels: models and performance prediction[J]. IEEE Trans. Commu., 2002, 50(12): 1926 - 1934.
- [6] H Shin, J H Lee. Effect of keyholes on the symbol error rate of space-time block codes[J]. IEEE Commu. Lett., 2003, 7(1): 27 - 29.
- [7] S Sanayei, A Hedayat, A Nersisyan. Space-time codes in keyhole channels: analysis and design[J]. IEEE Trans. Wireless Commu., 2007, 6(6): 2006 - 2011.
- [8] Y Gong, K B Letaief. Space-time block codes in keyhole fading channels: error rate analysis and performance results[A]. VTC 2006, Melbourne, Australia, May, 2006. 1903 - 1907.
- [9] M K Simon, M S Alouini. Digital communication over fading channels: A unified approach to performance analysis. New York USA: John Wiley & Son, 2000.
- [10] I S Gradshteyn, I M Ryzhik. Table of integrals, Series, and Products. San Diego, USA: Academic Press, 2000.

作者简介:



赵宏志 1997 年毕业于电子科技大学通信学院, 获工学学士学位, 2004 年毕业于电子科技大学通信学院, 获通信与系统专业硕士, 现为电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室博士研究生, 主要研究方向为移动通信、MIMO。目前在新加坡南洋理工大学从事 WiMAX 方面的研究工作。E-mail: lyn@uestc.edu.cn



Yi Gong 分别于 1995 年, 1998 年获得中国南京东南大学学士和硕士学位, 2002 年获得香港科技大学博士学位。2002 年到 2003 年, 工作于香港应用科技研究院, 从事无线局域网的算法研究。2003 年 7 月, 进入新加坡南洋理工大学电子与电气工程学院, 任助理教授。一直担任 IEEE 下属多个会议的技术委员会委员, IEEE 会员。E-mail: EYGong@ntu.edu.sg



唐友喜 1985 年在军械工程学院获学士学位, 1993 年, 1997 年分别在电子科技大学获通信与系统专业硕士、博士学位, 1997 年进入中国科技大学、华为个体博士后流动站做博士后, 主要研究 CDMA WLL 及第三代移动通信。2000 年进入电子科技大学博士后流动站做博士后。电子科技大学通信与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为: 数字通信、扩频通信, 包括 CDMA、OFDM、B3G、UWB、分布 MIMO、传感器网络等。E-mail: tangyx@uestc.edu.cn