



衰落信道上 TAS/MRC 的错误指数

李长水

(杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 使用梅哲-G 函数, 推导了 Nakagami- m 衰落发射天线选择 (TAS)/最大比合并 (MRC) 系统的随机编码错误指数 (RCEE)、遍历容量、截止速率、删改指数的精确表达式。计算结果表明, Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统的错误指数与信道衰落参数、信道编码速率、收发天线数目、信道相干时间等因素有关。信道衰落系数越大、编码速率越大、收发天线数目越多, 通信系统的 RCEE 越大, 相应的译码错误概率越小, 系统的通信可靠性越高。对于给定译码错误概率的 MIMO 无线通信系统, 可以通过计算系统的 RCEE 来估计信道所需的编码长度、收发天线数目、信道相干时间和空间衰落相关时的编码需求。

关键词: Nakagami- m 衰落信道; TAS/MRC 技术; 随机编码错误指数; 遍历容量; 截止速率; 删改指数

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016119

Error exponent for TAS/MRC fading channel

LI Changshui

Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Using Meijer-G function, exact expression for the random coding error exponent, ergodic capacity, cutoff rate, expurgated exponent of TAS/MRC Nakagami- m fading channel were derived. Numerical results show that the random coding error exponent is related to channel fading coefficient, coding rate, the number of transmitting and receiving antennas, and signal symbol period. With the coding rate, the number of the receiving and transmitting antennas and the average signal to noise ratio increasing, the RCEE of the system will become larger and the BER performance of the system will be better. For a given decoding error probability of a wireless communication system, necessary coding length, number of antennas, channel coherence time, and spatial fading correlation could be estimated by computing the random coding error exponent.

Key words: Nakagami- m fading channel, TAS/MRC technology, random coding error exponent, ergodic capacity, cutoff rate, expurgated exponent

1 引言

错误指数^[1]描述了作为编码长度函数的译码错误概率的衰减率, 在多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 无线通信系统中通常用来指示信息在低于信道容量

的速率进行传输时, 系统达到一定通信可靠性的困难度与系统的编码长度、收发天线数目和符号周期有关。参考文献[2]研究了平均或峰值功率受限的单输入单输出信道上的错误指数; 参考文献[3]给出了 MIMO 衰落信道上随机编码错误指数 (random coding error exponent, RCEE) 研究的



系统模型;参考文献[4]推导了平均功率受限的 Rayleigh 衰落 MIMO 信道上 RCEE 和截止速率的精确表达式;参考文献[5]研究了平均功率受限的 Nakagami- m 衰落信道上空时分组码系统的错误指数,给出了 RCEE 的精确表达式。在不增加发射功率和系统带宽的前提下,天线分集技术^[6]是抵抗多径衰落,提高传输可靠性的有效方式。其中,参考文献[3-5]是在输入信号服从高斯分布时进行的,本文同样研究输入信号为高斯分布时,Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统的错误指数,目前尚未有研究,具有重要的研究意义。本文中, $\star$ 表示共轭转秩, $E[\cdot]$ 表示数学期望, I_L 为 $z \times z$ 维单位矩阵, m 是 Nakagami- m 衰落的衰落系数。

2 系统模型

考虑具有 K 副发射天线和 L 副接收天线的 Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统,在发射端的第 i 个信号传输间隔,系统选择 K 个发射天线中的第 k 个天线发射信号;在接收端第 l 条接收天线接收到的等效信号为 $y_{kl}[i]=h_{kl}[i]x[i]+w_{kl}[i]$,其中, $h_{kl}[i]$ 为从第 k 条发射天线到第 l 条接收天线的时变复信道增益,其幅度服从 Nakagami- m 衰落分布,相位服从均匀分布; $x[i]$ 为传输的 M 进制数字调制信号; $w_{kl}[i]$ 是均值为 0、方差为 N_0 的复加性高斯白噪声变量;传输功率受限, $E[X^\star X] \leq P$ 。

考虑理想天线选择,并假定系统具有理想信道估计, Lm 为整数,每个接收支路的平均信噪比 $\bar{\gamma}$ 相同,由参考文献[7]可得 Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统接收端合并器输出瞬时信噪比 γ 的概率密度函数(PDF)为:

$$f_B(\gamma) = A(q, n) \exp\left(-\frac{m(q+1)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) (\gamma)^{Lm+n-1} \quad (1)$$

$$A(q, n) = \frac{Km}{\bar{\gamma} \Gamma(Lm)} \sum_{q=0}^{K-1} (-1)^q \binom{K-1}{q} \sum_{n=0}^{q(Lm-1)} \frac{1}{n!} C_n(q) (m/\bar{\gamma})^{Lm+n-1} \quad (2)$$

$$C_n(q) = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} [(q+1)i-n] C_{n-i}(q), & n \leq Lm-1 \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{Lm-1} \binom{n}{i} [(q+1)i-n] C_{n-i}(q), & n > Lm-1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, K, L 分别为发射和接收天线条数; m 为 Nakagami- m 衰落的衰落系数; F 为每个接收支路的平均信噪比; $T(u) = \int_0^\infty x^{u-1} e^{-x} dx, u > 0$, 当 u 为整数时, $T(u) = (u-1)!, q, n, i$ 均为整

数, $C_0(q)=1$ 。

3 错误指数

3.1 RCEE

参考文献[2]给出了 MIMO 无线通信系统的随机编码错误指数为:

$$E_r(p_X(\mathbf{X}), \rho, r, N_c) = \max_{0 \leq \rho \leq 1} \left(\max_{r \geq 0} (E_0(p_X(\mathbf{X}), \rho, r, N_c)) - \rho R \right) \quad (4)$$

其中, R 为信息传输速率, ρ 为之间的实数, N_c 为符号相干时间,输入信号 $\mathbf{X}$ 服从高斯分布^[1],其 PDF 为 $p_X(\mathbf{X})$ 。

$$E_0(p_X(\mathbf{X}), \rho, r, N_c) = -\frac{1}{N_c} \ln \left(\int_{\mathbf{H}} p_{\mathbf{H}}(\mathbf{H}) \int_{\mathbf{Y}} \left(\int_{\mathbf{X}} p_X(\mathbf{X}) e^{r[\text{tr}(\mathbf{X}\mathbf{X}^\star) - N_c P]} p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}, \mathbf{H})^{1/(1+\rho)} d\mathbf{X} \right)^{1+\rho} d\mathbf{Y} d\mathbf{H} \right) \quad (5)$$

其中, P 为 K 条发射天线的总功率,假定每条发射天线上的功率平均分配, $\mathbf{Y}$ 为接收信号矩阵, $p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}, \mathbf{H})$ 为信道的转移概率密度函数。

当输入信号 $\mathbf{X}$ 服从高斯分布时,式(5)可以简化为:

$$E_0(\rho, \beta, N_c, m) = A(\rho, \beta) - \frac{1}{N_c} \ln \cdot (E(\det(\mathbf{I}_L + \bar{\gamma}/(\beta(1+\rho)) \mathbf{H}\mathbf{H}^\star)^{-N_c \rho})) \quad (6)$$

其中, $\beta = K - rP$ 且 $\beta \in [0, K], A(\rho, \beta) = (1+\rho)(K-\beta) + K(1+\rho) \ln(\beta/K)$ 。

利用参考文献[5],将 Nakagami- m 衰落 OSTBC 系统错误指数的研究方法推广到 Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统,可将式(6)中 $E(\det(\mathbf{I}_L + \bar{\gamma}/(\beta(1+\rho)) \mathbf{H}\mathbf{H}^\star)^{-N_c \rho})$ 化简为:

$$E(\det(\mathbf{I}_L + b \mathbf{H}\mathbf{H}^\star)^{-N_c \rho}) = \int_{\theta} \det(\mathbf{I}_L + b\theta)^{-N_c \rho} p_{\theta}(\theta) d\theta \quad (7)$$

其中, $b = \bar{\gamma}/(\beta(1+\rho)), \theta \triangleq (\mathbf{H}\mathbf{H}^\star, L \leq K; \mathbf{H}^\star \mathbf{H}, L \geq K)$ 为高斯矩阵的矩阵二次型,其中 $p_{\theta}(\theta)$ 为:

$$p_{\theta}(\theta) = \frac{1}{\tilde{\Gamma}_m(n)} \det(\Phi_1)^{-n} \det(\Phi_2)^{-m} \det(\theta)^{n-m} {}_0\tilde{F}_0^{(n)}(-\Phi_1^{-1}\theta, \Phi_2^{-1}) \quad (8)$$

其中, $\tilde{\Gamma}_m(\alpha) = \pi^{m(m-1)/2} \prod_{i=0}^{m-1} \Gamma(\alpha-i), \Re_i(\alpha) > m-1, \Gamma(x)$ 为 Gamma 函数, Φ_1, Φ_2 由参考文献[5]给出, ${}_p\tilde{F}_q^{(n)}$ 为两个 Hermitian 矩阵的超几何函数。

利用参考文献[5]中式(18)、式(19)将式(6)化简,可得:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_0(\rho, \beta, N_c, m) &= A(\rho, \beta) - \frac{1}{N_c} \ln \\ &\left(\int_0^\infty \frac{A(q, n)}{\Gamma(N_c \rho)} \exp\left(-\frac{m(q+1)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) (\gamma)^{Lm+n-1} G_{1,1}^{1,1} \left[b\gamma \middle| \begin{matrix} 1-N_c \rho \\ 0 \end{matrix} \right] d\gamma \right) \end{aligned} \quad (9)$$

利用式(10)梅哲-G函数化简公式^[8],可得:

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty \xi^{-\lambda} e^{-\beta \xi} G_{p,q}^{m,n} \left[\alpha \xi \middle| \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right] d\xi \\ &= \beta^{\lambda-1} G_{p+1,q}^{m,n+1} \left[\frac{\alpha}{\beta} \middle| \begin{matrix} \lambda, a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)化简,可得:

$$\begin{aligned} E_0(\rho, \beta, N_c, m) &= A(\rho, \beta) - \frac{1}{N_c} \ln \\ &\left(\frac{A(q, n) \alpha^{\lambda-1}}{\Gamma(N_c \rho)} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{b}{\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1-N_c \rho \\ 0 \end{matrix} \right] \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\alpha = m(q+1)/\bar{\gamma}$, $\lambda = 1 - Lm - n$ 。

将式(11)带入式(4),可得 Nakagami-m 衰落 TAS/MRC 系统 RCEE 的精确表达式:

$$\begin{aligned} E_r(R, N_c, m) &= \max_{0 \leq \rho \leq 1} \left(\max_{0 \leq \beta \leq K} \left(A(\rho, \beta) - \frac{1}{N_c} \ln \right. \right. \\ &\left. \left. \left(\frac{A(q, n) \alpha^{\lambda-1}}{\Gamma(N_c \rho)} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{b}{\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1-N_c \rho \\ 0 \end{matrix} \right] \right) \right) - \rho R \right) \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 遍历容量

信息速率 R 在 $\rho=0$ (即 $\beta(0)=K$) 时的值为 MIMO 无线通信系统的遍历容量,即:

$$\begin{aligned} <C> = \left[\partial E_0(\rho, \beta, N_c) / \partial \rho \right]_{\rho=0, \beta=K} \quad (\text{nat / symbol}) \\ &= E(\ln \det(\mathbf{I}_L + \bar{\gamma} \boldsymbol{\Theta} / K)) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, nat/symbol 为以 e 为底计算出的容量的单位。参考文献[5]将 Nakagami-m 衰落 OSTBC 系统遍历容量的研究方法推广到 Nakagami-m 衰落 TAS/MRC 系统中,利用参考文献[5]中式(18)、式(19)和式(10),可得 Nakagami-m 衰落 TAS/MRC 系统的遍历容量为:

$$\begin{aligned} <C> &= \int_0^\infty \ln(1 + \bar{\gamma} \gamma / K) \times A(q, n) \\ &\exp\left(-\frac{m(q+1)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) (\gamma)^{Lm+n-1} d\gamma \quad (\text{nat / symbol}) \end{aligned} \quad (14)$$

利用参考文献[9]中的式(29)可得 Nakagami-m 衰落 TAS/MRC 系统的遍历容量为:

$$\begin{aligned} <C'> &= \int_0^\infty \ln(1 + \bar{\gamma} \gamma / K) f_B(\gamma) d\gamma \quad (\text{bit / symbol}) \\ &= \int_0^\infty \ln(1 + \bar{\gamma} \gamma / K) \times A(q, n) \\ &\exp\left(-\frac{m(q+1)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) (\gamma)^{Lm+n-1} d\gamma \quad (\text{bit / symbol}) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, B 为信号带宽,将式(15)与式(14)进行比较,计算方法相同。

利用参考文献[5]中式(18)、式(19)和式(10),将式(14)与式(15)进行化简,经推导可得:

$$<C> = A(q, n) \times \alpha^{\lambda-1} G_{3,2}^{1,3} \left[\frac{\bar{\gamma}}{K\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right] \quad (\text{nat / symbol}) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} <C'> &= \ln e \times A(q, n) \times \alpha^{\lambda-1} G_{3,2}^{1,3} \left[\frac{\bar{\gamma}}{K\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right] \quad (\text{bit/symbol}) \\ &= A(q, n) \times \alpha^{\lambda-1} G_{3,2}^{1,3} \left[\frac{\bar{\gamma}}{K\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right] \quad (\text{nat/symbol}) \end{aligned} \quad (17)$$

比较式(17)与式(16)可知:

$$<C'> = <C> \quad (18)$$

即两种计算方法的信道容量结果一致,证明了数值计算的正确性。

3.3 截止速率

由参考文献[1]中式(26)可知 MIMO 无线通信系统的截止速率是 $E_0(\rho, \beta, N_c)$ 取 $\rho=1$, $\beta=K$ 时的值:

$$\begin{aligned} R_0 &= E_0(\rho, \beta, N_c) \Big|_{\rho=1, \beta=K} \\ &= -\frac{1}{N_c} \ln(E((\mathbf{I}_L + \bar{\gamma} \boldsymbol{\Theta} / (2K))^{-N_c})) \end{aligned} \quad (19)$$

利用参考文献[5]中式(18)、式(19)和式(10),可得 Nakagami-m 衰落 TAS/MRC 系统的截止速率为:

$$R_0 = -\frac{1}{N_c} \ln \left(\frac{A(q, n)}{(N_c - 1)!} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{\bar{\gamma}}{2K\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1-N_c \\ 0 \end{matrix} \right] \right) \quad (20)$$

3.4 删改指数

由参考文献[10]中式(20)可知 MIMO 无线通信系统的删改指数 $E_x(R, N_c)$ 为:

$$\begin{aligned} E_x(R, N_c) &= \max_{0 \leq \rho \leq 1} \left(\max_{r \geq 0} A'(\rho, \beta) - \frac{1}{N_c} \ln \right. \\ &\left. (E(\det(\mathbf{I}_L + b'HH^*)^{-N_c \rho})) - \rho R \right) \end{aligned} \quad (21)$$

参考 RCEE 的计算过程,利用参考文献[5]中式(18)、式(19)和式(9),可得 Nakagami-m 衰落 TAS/MRC 系统的删改指数为:



$$E_x(R, N_c) = \max_{0 \leq \rho \leq 1} \left(\max_{0 \leq \beta \leq K} \left(A'(\rho, \beta) - \frac{1}{N_c} \ln \left(\frac{A(q, n) \alpha^{\lambda-1}}{(N_c \rho - 1)! \bar{\gamma}^{KL}} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{b'}{\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1 - N_c \rho \\ 0 \end{matrix} \right] \right) - \rho R \right) \right) \quad (22)$$

其中, $A'(\rho, \beta) = 2\rho(K - \beta) + 2\rho K \ln(\beta/K)$, $b' = \bar{\gamma}/(2\rho\beta)$ 。

3.5 特殊情况

利用参考文献[10],下面给出了 Nakagami- m 信道上在接收端采用 L 支路 MRC 分集接收时的错误指数的表达式。

RCEE 为:

$$E_r(\rho, R, N_c) = \max_{0 \leq \rho \leq 1} \left(\max_{r \geq 0} \left(A(\rho, \beta) - \frac{1}{N_c} \ln \left(A(m) \frac{\alpha^{\lambda-1}}{\Gamma(N_c \rho)} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{b}{\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1 - N_c \rho \\ 0 \end{matrix} \right] \right) - \rho R \right) \right) \quad (23)$$

遍历容量为:

$$\langle C \rangle = \left(\frac{m}{\bar{\gamma}} \right)^{Lm} \frac{\alpha^{\lambda-1}}{\Gamma(Lm)} G_{3,2}^{1,3} \left[\frac{\bar{\gamma}}{K\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right] \quad (24)$$

截止速率为:

$$R_0 = -\frac{1}{N_c} \ln \left(A(m) \frac{\alpha^{\lambda-1}}{\Gamma(N_c)} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{\bar{\gamma}}{2K\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1 - N_c \\ 0 \end{matrix} \right] \right) \quad (25)$$

删改指数为:

$$E_x(R, N_c) = \max_{0 \leq \rho \leq 1} \left(\max_{0 \leq \beta \leq K} \left(A'(\rho, \beta) - A(m) \frac{\alpha^{\lambda-1}}{\Gamma(N_c \rho)} G_{2,1}^{1,2} \left[\frac{b}{\alpha} \middle| \begin{matrix} \lambda, 1 - N_c \rho \\ 0 \end{matrix} \right] - \rho R \right) \right) \quad (26)$$

其中, $A(m) = (m/\bar{\gamma})^{Lm}/\Gamma(Lm)$ 。

4 理论分析

图 1 给出了 Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统中,当 $m=1, N_c=1, \bar{\gamma}=15$ dB, $K+L$ 为固定值时的 RCEE。由图 1 可知,当 $K+L=5$ 时,随着选择发射天线数目的增加, RCEE 减小,相应的译码错误概率增加,相应的通信可靠性降低;比较 $K+L=5$ 和 $K+L=4$, 可以看出当选择发射天线数目一定时,分集接收天线数目越多, RCEE 越大,相应的译码错误概率越小,通信可靠性越大。

图 2 给出了当 $N_c=1, \bar{\gamma}=15$ dB, $mKL=4$ 时的 RCEE,当 $mKL=4$ 时,随着选择发射天线数目的增加, RCEE 增加,相应的错误概率减小,通信可靠性增加;比较 $(m, K, L)=(1, 2, 2)$ 和 $(m, K, L)=(2, 2, 1)$, 可以看出当选择发射天线数目一定时,

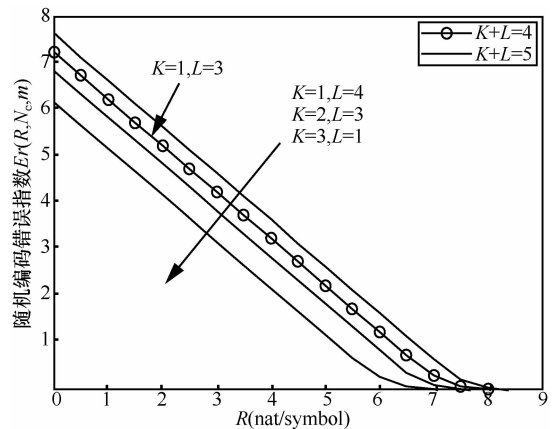


图 1 $K+L$ 为固定值时 TAS/MRC 的 RCEE

分集接收天线数目越多, RCEE 越大, 相应的译码错误概率越小, 衰落系数越大, RCEE 越小, 译码错误概率越高, 相应的通信可靠性越低。

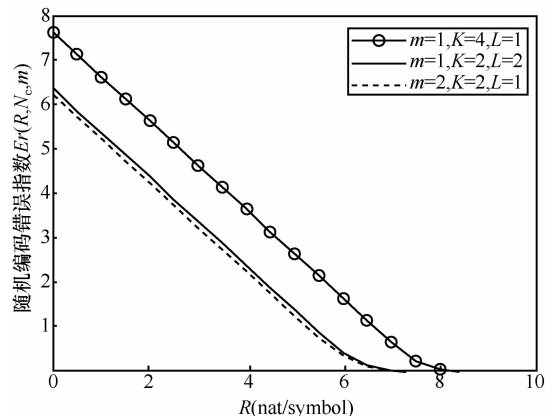


图 2 mKL 为固定值时 TAS/MRC 的 RCEE

图 3 给出了在 2×2 的 Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统中,当 $m=1, \bar{\gamma}=15$ dB, N_c 取不同值时的 RCEE,随着信息速率和符号周期 N_c 的增大, RCEE 减小, 相应的译码错误概率增加,通信可靠性降低。

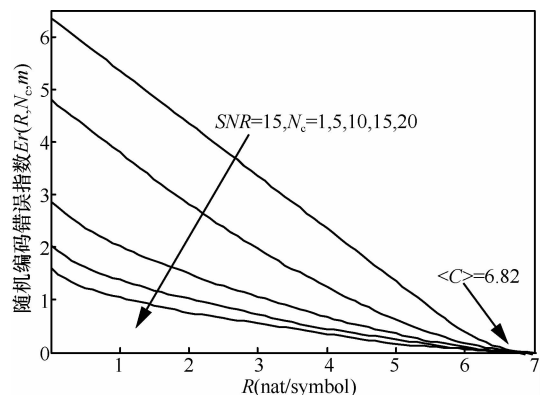


图 3 不同 N_c 时 TAS/MRC 的 RCEE

图4给出了 2×2 的 Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统, 当 $N_c=1, m=1$, 平均信噪比 $\bar{\gamma}$ 取不同值时的 RCEE, 随着平均信噪比的增大, RCEE 增大, 相应的译码错误概率减小, 通信可靠性增加。

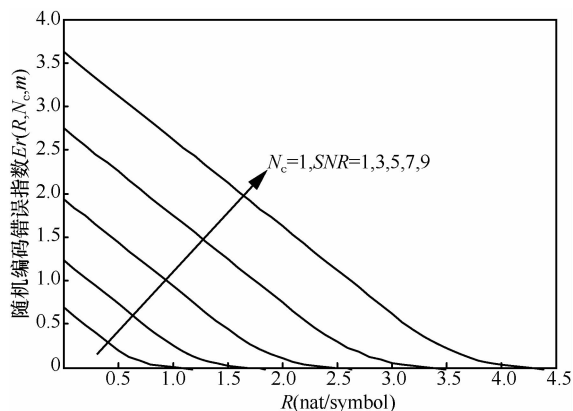


图4 不同 $\bar{\gamma}$ 时 TAS/MRC 的 RCEE

5 结束语

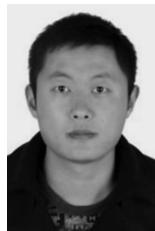
使用梅哲-G函数, 推导了 Nakagami- m 衰落 TAS/MRC 系统的 RCEE、遍历容量、截止速率和删改指数的精确表达式, 与参考文献[1]比较, 本文的计算方法更加简单。数值计算结果表明, 编码速率越大、收发天线数目越多、平均信噪比越大, RCEE 越大, 相应的译码错误概率越小, 系统通信可靠性越高。随着信道衰落系数、符号周期、信息传输速率的增大, RCEE 减小, 相应的译码错误概率增大, 通信可靠性降低。对于给定译码错误概率的通信系统, 可以通过计算随机编码错误指数来估计 MIMO 无线通信系统所需的编码长度、收发天线数目、信道相干时间和空间衰落相关时的编码需求, 为设计类似衰落信道提供了理论指导。

参考文献:

- [1] HYUNDONG S, WIN M Z. Gallager's exponent for MIMO channels: a reliability-rate tradeoff [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(4): 972-985.
- [2] ZHANG Y, XUE J, RATNARAJAH T, et al. Error exponents analysis of dual-hop η - μ and κ - μ fading channel with amplify-and-forward relaying [J]. IET Communications, 2015, 9(11): 1367-1379.

- [3] SARKAR M Z I, SHIN H, WIN M Z. Random coding exponent for MIMO channels [C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'08 Spring), May 11-14, 2008, Singapore. New Jersey: IEEE Press, 2008: 559-563.
- [4] JIANG X, SARKAR M Z I, RATNARAJAH T, et al. Error exponents for Rayleigh fading product MIMO channels[C]//2012 IEEE International Symposium on Information Theory, July 1-6, 2012, Cambridge, MA, England. New Jersey: IEEE Press, 2012: 2166-2170.
- [5] JIANG X, SARKAR M Z I, RATNARAJAH T. Random coding error exponent for OSTBC Nakagami- m fading MIMO channel[C]//IEEE Vehicular Technology Conference, May 15-18, 2011, Yokohama, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [6] 顾声飞, 杨宇航. 天线分集技术[J]. 通信技术, 2003(4): 56-57.
- [7] 李光球. Nakagami 衰落信道上组合 SC/MRC 的性能分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 187-190.
- [8] TORABI M, AISSA S, SOLEYMANI M R. On the BER performance of space-frequency block coded OFDM systems in fading MIMO channels [J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2007, 6(4): 1366-1373.
- [9] MOHAMED S A, ANDREA J G. Capacity of Rayleigh fading channels under different adaptive transmission and diversity-combining techniques [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(4): 1165-1181.
- [10] JIANG X, SARKAR M Z I, RATNARAJAH T. Error exponents for Nakagami- m fading MIMO channels[J]. IEEE transactions on Wireless Communications, 2012, 50(2): 85-89.

[作者简介]



李长水(1990-), 男, 杭州电子科技大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。