



Nakagami 衰落上 DE-QPSK 在联合收发分集下的性能分析

李光球,董家云

(杭州电子科技大学 杭州 310018)

摘要:利用高斯 Q 函数的高阶次幂在最大比合并(MRC)分集接收瑞利衰落信道上统计平均的结果,推导了 Nakagami 衰落信道上采用组合发射选择合并(SC)/接收 MRC 天线分集的相干检测差分编码四相相移键控(DE-QPSK)的平均误符号率(ASER)精确表达式。利用高斯 Q 函数的近似表达式和矩生成函数(MGF)方法,推导了 Nakagami 衰落信道上采用组合 SC/MRC 天线分集的相干检测 DE-QPSK 的 ASER 近似表达式。通过数值计算和仿真,验证了 DE-QPSK 的 ASER 精确表达式的正确性以及近似表达式的准确性。利用精确表达式和近似表达式可研究收发天线数目和衰落参数对 DE-QPSK 的 ASER 性能的影响,为实际 SC/MRC 天线分集方案的设计提供了理论指导。

关键词: Nakagami 衰落信道;选择合并;最大比合并;差分编码四相相移键控;误符号率

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015209

Performance Analysis of DE-QPSK with Joint Transmit and Receive Diversity in Nakagami Fading

Li Guangqiu, Dong Jiayun

(Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: By using the statistical average results of higher-order powers of Gaussian Q -function in multi-branch diversity reception with maximum ratio combining (MRC) in Rayleigh fading channel, exact closed-form for the average symbol error rate (ASER) of differentially encoded quadri-phase shift keying (DE-QPSK) using coherent detection with transmit selection combining (SC) and receive MRC (SC/MRC) in Nakagami fading channels was derived. Approximate closed-form for the ASER of DE-QPSK with SC/MRC in Nakagami fading channels was derived by using the approximate expression of Gaussian Q -function and moment generating function based analysis approach. Numerical and simulation results show that the theoretical analysis of the ASER of DE-QPSK is exact and the approximate closed-form for the ASER of DE-QPSK is accurate. The above results can be used to design SC/MRC antenna diversity systems with DE-QPSK.

Key words: Nakagami fading channel, selection combining, maximal ratio combining, differentially encoded quadric-phase shift keying, symbol error rate

收稿日期: 2015-04-30;修回日期: 2015-08-04

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(No.LY12F01008)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LY12F01008)

论文引用格式: 李光球,董家云. Nakagami 衰落上 DE-QPSK 在联合收发分集下的性能分析. 电信科学, 2015209

Li G Q, Dong J Y. Performance analysis of DE-QPSK with joint transmit and receive diversity in Nakagami fading. Telecommunications Science, 2015209

1 引言

差分编码四相相移键控 (differentially encoded quadri-phase shift keying, DE-QPSK) 可以克服相位模糊的缺点, 获得了广泛的应用^[1]。参考文献[2]推导了加性白高斯信道上采用 DE-QPSK 调制的平均误符号率 (average symbol error rate, ASER) 解析表达式。参考文献[3]推导了瑞利信道上采用最大比合并 (maximum-ratio combining, MRC) 天线分集接收的 DE-QPSK 的 ASER 解析表达式。研究表明采用组合收发天线分集方案能够使无线通信系统获得更高的天线分集增益, 可有效地抑制衰落信道引起的误码性能恶化^[4]。组合发射选择合并 (selection combined, SC)/接收 MRC 天线分集是一种低实现复杂度的收发天线分集方案^[5]。参考文献[5]研究了瑞利信道上采用组合发射 SC/接收 MRC 天线分集的 M 进制正交幅度调制的 ASER 性能。参考文献[6]研究了 Nakagami 衰落信道上采用组合发射 SC/接收 MRC 天线分集的 M 进制正交幅度调制、 M 进制幅度调制、 M 进制相移键控等几种数字调制的 ASER 性能。然而, 对于 Nakagami 衰落信道上采用组合 SC/MRC 天线分集的 DE-QPSK 的 ASER 性能分析, 目前尚未见有关报道, 本文拟推导其 ASER 的精确和近似表达式。

2 系统模型

2.1 DE-QPSK 调制解调

DE-QPSK 调制可视为先进行差分编码、再进行绝对调制的 QPSK 的调制方式。差分编码规则^[1,7,8]为:

$$\begin{aligned} u_j &= (\overline{I_j \oplus Q_j})(I_j \oplus u_{j-1}) + (I_j \oplus Q_j)(Q_j \oplus v_{j-1}) \\ v_j &= (\overline{I_j \oplus Q_j})(Q_j \oplus v_{j-1}) + (I_j \oplus Q_j)(I_j \oplus u_{j-1}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, I_j 和 Q_j 分别为第 j 个码元时刻差分编码器的同相路和正交路的输入比特, u_j, u_{j-1} 和 v_j, v_{j-1} 分别是第 j 个码元、第 $j-1$ 个码元的同相路和正交路输出比特。

DE-QPSK 解调可视为先进行 QPSK 解调、再进行差分译码。差分译码规则^[1,7,8]为:

$$\begin{aligned} \hat{I}_j &= (\overline{\hat{u}_j \oplus \hat{v}_j})(\hat{u}_j \oplus \hat{u}_{j-1}) + (\hat{u}_j \oplus \hat{v}_j)(\hat{v}_j \oplus \hat{v}_{j-1}) \\ \hat{Q}_j &= (\overline{\hat{u}_j \oplus \hat{v}_j})(\hat{v}_j \oplus \hat{v}_{j-1}) + (\hat{u}_j \oplus \hat{v}_j)(\hat{u}_j \oplus \hat{u}_{j-1}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\hat{u}_j$ 和 $\hat{v}_j$ 第 j 个码元时刻差分译码器的同相路和正交路输入比特, $\hat{u}_{j-1}$ 和 $\hat{v}_{j-1}$ 是前一码元时刻差分译码器的同相路和正交路输入比特, 差分译码器相应的输出比特

为 $\hat{I}_j$ 和 $\hat{Q}_j$ 。

根据参考文献[2], 在加性白高斯信道上采用相干检测的 DE-QPSK 信号的条件误符号率为:

$$P(e|\gamma) = 4Q(\sqrt{\gamma}) - 8Q^2(\sqrt{\gamma}) + 8Q^3(\sqrt{\gamma}) - 4Q^4(\sqrt{\gamma}) \quad (3)$$

其中, γ 为信噪比, $Q(x)$ 为高斯 Q 函数。

2.2 组合 SC/MRC 分集方案

采用参考文献[5]的信道模型, 考虑 Nakagami 衰落信道上具有 K 根发射天线、 L 根接收天线的组合发射 SC/接收 MRC 天线分集方案。在第 i 个信号传输间隔, 假定使用 K 个发射天线中的第 k 个天线发射 DE-QPSK 信号, 则在第 l 个接收天线上的等效基带信号为:

$$\gamma_{kl}[i] = h_{kl}[i]s[i] + \eta_{kl}[i] \quad (4)$$

其中, $h_{kl}[i]$ 是从第 k 个发射天线到第 l 个接收天线的时变信道增益, 其幅度服从衰落系数为 m 的 Nakagami 分布, 相位服从均匀分布; $s[i]$ 是传输的能量为 E_s 的 DE-QPSK 信号; $\eta_{kl}[i]$ 为均值为 0、方差为 N_0 的加性白复高斯变量。

考虑理想天线选择, 并假定 MRC 具有理想的信道估值, L_m 为整数、每个接收支路的平均符号信噪比 $\bar{\gamma}$ 相同, 根据参考文献[6], 可得 SC/MRC 合并器输出瞬时接收信噪比 γ 的概率密度函数为:

$$f(\gamma) = \sum_{q=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{q(Lm-1)} U(K, L, m, n, q) \rho_r(\bar{\gamma}/[m(q+1)], Lm+n) \quad (5)$$

$$U(K, L, m, n, q) = \frac{K}{\Gamma(Lm)} (-1)^q \binom{K-1}{q} \frac{C_n(q)}{n!} \frac{(Lm+n-1)!}{(q+1)^{Lm+n}} \quad (6)$$

$$\rho_r(a, b) = \frac{1}{(b-1)! a^b} \gamma^{b-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{a}\right) \quad (7)$$

$$C_n(q) = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} [(q+1)i - n] C_{n-i}(q), & n \leq Lm-1 \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{Lm-1} \binom{n}{i} [(q+1)i - n] C_{n-i}(q), & n \geq Lm-1 \end{cases} \quad (8)$$

式(5)~式(8)对所有的 q 均有 $C_0(q)=1$ 成立。

3 精确性能分析

Nakagami 信道上采用 SC/MRC 分集的 DE-QPSK 调制信号的 ASER 可以由加性白高斯信道下条件误符号率 $P(e|\gamma)$ 对瞬时信噪比 γ 的概率密度函数 (式(5)) 求统计平均后得到, 表示为:



$$p = \int_0^\infty P(e|\gamma) f(\gamma) d\gamma \quad (9)$$

定义 I_s 为:

$$I_s = \int_0^\infty Q^s(\sqrt{\gamma}) \rho_\gamma(\bar{\gamma}/[m(q+1)], Lm+n) d\gamma, s=1,2,3,4 \quad (10)$$

则式(9)变为:

$$P = \sum_{q=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{q(Lm-1)} U(K, L, m, n, q) [4I_1 - 8I_2 + 8I_3 - 4I_4] \quad (11)$$

利用参考文献[2]中高斯 Q 函数的等效形式,可得:

$$I_1 = F_1(\bar{\gamma}/[2m(q+1)], Lm+n) \quad (12)$$

$$F_1(c, x) = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{c}{(1+c)}} \sum_{p=0}^{x-1} \binom{2p}{p} \left(\frac{1}{4(1+c)} \right)^p \right] \quad (13)$$

利用参考文献[2]的 $Q^2(x)$ 等效形式可得:

$$I_2 = F_2(\bar{\gamma}/[2m(q+1)], Lm+n) \quad (14)$$

$$F_2(c, x) = \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{c}{(1+c)}} \left\{ \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \sqrt{\frac{c}{(1+c)}} \right) \sum_{p=0}^{x-1} \binom{2p}{p} \frac{1}{(4(1+c))^p} - \sin \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{c}{(1+c)}} \right) \sum_{d=1}^{x-1} \sum_{w=1}^d \frac{T_{wd}}{(1+c)^d} \left[\cos \left(\tan^{-1} \sqrt{\frac{c}{(1+c)}} \right) \right]^{2(d-w)+1} \right\} \quad (15)$$

$$T_{wd} = \frac{\binom{2d}{d}}{\binom{2(d-w)}{d-w} 4^w [2(d-w)+1]} \quad (16)$$

当 $s \geq 3$ 时,根据参考文献[3],可推导 I_s 为:

$$I_s = \left(\frac{1}{2} \right)^s - \left(\frac{1}{2} \right)^s \frac{s}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{1}{1+2\mu}} \sum_{k=0}^{Lm+n-1} \frac{\Gamma\left(k+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(k+1)} \left(\frac{2\mu}{1+2\mu} \right)^k - \left(\frac{1}{2} \right)^s \frac{s}{\sqrt{2\pi}} \times \sum_{k=0}^{Lm+n-1} \mu^k \sum_{t=1}^{s-1} \frac{\Gamma\left(k+\frac{t}{2}+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(k+1)} \binom{s-1}{t} (-1)^t \left(\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \right)^t \left(\frac{2}{t+1+2\mu} \right)^{\frac{2k+t+1}{2}} \times F_A^{(t)} \left(k+\frac{t}{2}+\frac{1}{2}, \underbrace{1, \dots, 1}_{t \text{ 项}}, \underbrace{\frac{3}{2}, \dots, \frac{3}{2}}_{t \text{ 项}}, \underbrace{\frac{1}{t+1+2\mu}, \dots, \frac{1}{t+1+2\mu}}_{t \text{ 项}} \right) \quad (17)$$

其中, $\mu = m(q+1)/\bar{\gamma}$, $F_A^{(t)}(a, b_1, \dots, b_t; c_1, \dots, c_t; x_1, \dots, x_t)$ 是 Lauricella 超几何函数[3]。

将式(12)、式(14)和式(17)代入式(11),即可得到

Nakagami 衰落信道上采用 SC/MRC 天线分集的 DE-QPSK 的 ASER 精确公式。若将式(17)记为 $F(s, L, m, n, \mu)$, 则 ASER 精确公式可以表示为:

$$P = \sum_{q=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{q(Lm-1)} U(K, L, m, n, q) [4F_1(1/(2\mu), Lm+n) - 8F_2(1/(2\mu), Lm+n) + 8F(3, L, m, n, \mu) - 4F(4, L, m, n, \mu)] \quad (18)$$

当 $K=1, L=1, m=1$ 时,由前面的分析并结合参考文献[2]可知, $I_1 \sim I_4$ 分别为:

$$I_1 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+2}} \quad (19)$$

$$I_2 = \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}+2}{\bar{\gamma}}} \quad (20)$$

$$I_3 = \frac{1}{8} - \frac{3}{8} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+2}} + \frac{3}{4\pi} \frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+1} {}_2F_1\left(1, 1; \frac{3}{2}; \frac{\bar{\gamma}}{2\bar{\gamma}+2}\right) - \frac{3}{8\pi\sqrt{2}} \left(\frac{2\bar{\gamma}}{3\bar{\gamma}+2} \right)^{\frac{3}{2}} F_A^{(2)}\left(\frac{3}{2}, 1, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}; \frac{\bar{\gamma}}{3\bar{\gamma}+2}, \frac{\bar{\gamma}}{3\bar{\gamma}+2}\right) \quad (21)$$

$$I_4 = \frac{1}{16} - \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+2}} + \frac{3}{4\pi} \frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+1} {}_2F_1\left(1, 1; \frac{3}{2}; \frac{\bar{\gamma}}{2\bar{\gamma}+2}\right) - \frac{3}{4\pi\sqrt{2}} \left(\frac{2\bar{\gamma}}{3\bar{\gamma}+2} \right)^{\frac{3}{2}} \times F_A^{(2)}\left(\frac{3}{2}, 1, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}; \frac{\bar{\gamma}}{3\bar{\gamma}+2}, \frac{\bar{\gamma}}{3\bar{\gamma}+2}\right) + \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2\bar{\gamma}}{2\bar{\gamma}+1} \right)^2 F_A^{(3)}\left(2, 1, 1, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}, \frac{3}{2}; \frac{\bar{\gamma}}{4\bar{\gamma}+2}, \frac{\bar{\gamma}}{4\bar{\gamma}+2}, \frac{\bar{\gamma}}{4\bar{\gamma}+2}\right) \quad (22)$$

其中, ${}_2F_1(a, b; c; x)$ 是高斯超几何函数[9]。将式(19)~式(22)带入式(11),并运用参考文献[9]和参考文献[10]的变换公式:

$${}_2F_1(a, b; c; x) = (1-x)^{c-a-b} {}_2F_1(c-a, c-b; c; x) \quad (23)$$

$$\tan^{-1} x = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{x^2}{1+x^2}\right) \quad (24)$$

$$\tan^{-1} x = \frac{x}{2} - \tan^{-1} \frac{1}{x}, x > 0 \quad (25)$$

得到瑞利衰落信道上 DE-QPSK 调制的 ASER 精确公式为:

$$P = \frac{3}{4} - \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}+2}} - \frac{2}{\pi^2} \left(\frac{\bar{\gamma}}{2\bar{\gamma}+1} \right)^2$$

$$F_A^{(3)} \left(2, 1, 1, 1; \frac{3}{2}, \frac{3}{2}, \frac{3}{2}; \frac{\bar{\gamma}}{4\bar{\gamma}+2}, \frac{\bar{\gamma}}{4\bar{\gamma}+2}, \frac{\bar{\gamma}}{4\bar{\gamma}+2} \right) \quad (26)$$

不难发现,式(26)与参考文献[3]中的式(29)相同,参考文献[3]中的结果可视为本文的特殊情况。

由于 DE-QPSK 的 ASER 计算涉及 Lauricella 超几何函数,计算较为复杂,下面研究一种只包含初等函数的近似计算方法。

4 近似性能分析

由参考文献[12],矩生成函数可定义为:

$$\varphi_{\gamma}(s) = \int_0^{\infty} \exp(s\gamma) f(\gamma) d\gamma \quad (27)$$

由参考文献[5]可知,Nakagami 衰落信道上采用组合 SC/MRC 的合并器输出信号信噪比的矩生成函数为:

$$\varphi_{\gamma}(s) = \frac{K}{\Gamma(Lm)} \sum_{q=0}^{K-1} (-1)^q \binom{K-1}{q} \sum_{n=0}^{q(Lm-1)} \frac{C_n(q)}{n!}$$

$$\frac{(Lm+n-1)!}{(q+1)^{Lm+n}} \frac{1}{[1-s\bar{\gamma}/(m(q+1))]^{Lm+n}} \quad (28)$$

定义 Z_s 为:

$$Z_s = \int_0^{\infty} Q_s(\sqrt{\gamma}) f(\gamma) d\gamma, s=1,2,3,4 \quad (29)$$

根据参考文献[11],高斯 Q 函数的近似公式为:

$$Q^s(\sqrt{\gamma}) \cong \left(\frac{w_1}{2} \right)^s \sum_{a=0}^s \binom{s}{a} \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^a \exp \left(-\frac{\gamma b(s+a)}{2} \right) \quad (30)$$

其中, $w_1=0.3017$, $w_2=0.4389$, $b=1.0510$ 。将式(30)带入式(29),并利用式(27)得到:

$$Z_s \cong \left(\frac{w_1}{2} \right)^s \sum_{a=0}^s \binom{s}{a} \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^a \varphi_{\gamma} \left(-\frac{b(s+a)}{2} \right) \quad (31)$$

利用式(3)、式(9)和式(29)可得:

$$P=4Z_1-8Z_2+8Z_3-4Z_4 \quad (32)$$

将式(31)带入式(32),得到 Nakagami 衰落信道上采用 SC/MRC 天线分集的 DE-QPSK 的 ASER 近似公式为:

$$P \approx 0.603 \, 4\varphi_{\gamma}(-0.525 \, 5) + 0.695 \, 8\varphi_{\gamma}(-1.051 \, 0) - 0.502 \, 2\varphi_{\gamma}(-1.576 \, 5) - 0.267 \, 5\varphi_{\gamma}(-2.102 \, 0) + 0.612 \, 3\varphi_{\gamma}(-2.627 \, 5) + 0.058 \, 2\varphi_{\gamma}(-3.153 \, 0) - 0.025 \, 5\varphi_{\gamma}(-3.678 \, 5) - 0.009 \, 3\varphi_{\gamma}(-4.204 \, 0) \quad (33)$$

不难看出,式(33)只包含简单的初等函数,无需计算复杂的 Lauricella 超几何函数。

5 数值计算与仿真

使用 MATLAB 软件,在收、发天线数和 m 不同的情况下,对 Nakagami 衰落信道上采用组合 SC/MRC 的 DE-QPSK 的 ASER 性能进行数值计算和仿真。

图 1 给出了 $(K,L)=(2,4)$ 时, m 不同时 DE-QPSK 的 ASER 性能。由图 1 可知,固定 K 和 L ,信道条件越好,信道衰落参数 m 越大,DE-QPSK 的 ASER 性能越好。

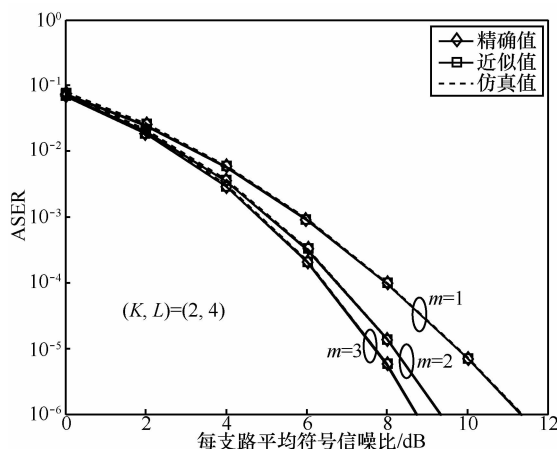


图 1 不同 m 对 DE-QPSK ASER 性能影响

图 2 给出了 $m=2$, $K \times L=8$ 时,取不同 (K,L) 时 DE-QPSK 的 ASER 性能。 $K \times L$ 相同意味着天线分集增益相同。由图 2 可知, $(8,1)$ 组合性能最差, $(4,2)$ 、 $(2,4)$ 其次, $(1,8)$ 性能最好; $(K,L)=(4,2)$ 和 $(2,4)$ 组合比 $(8,1)$ 组合的 ASER 性能好,这是由于 MRC 分集性能优于 SC 分集性能; $(1,8)$ 组合比 $(4,2)$ 和

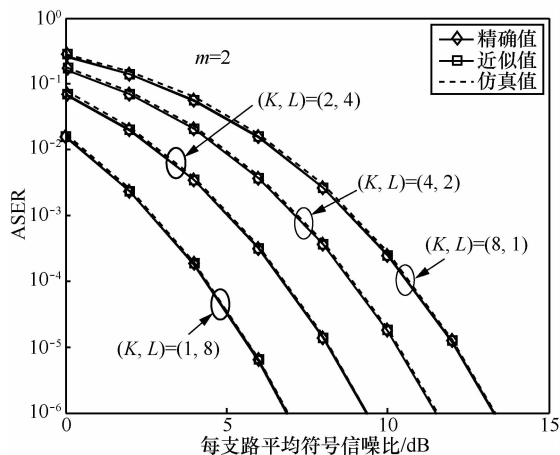


图 2 $K \times L=8$ 不同组合对 DE-QPSK ASER 性能影响



(2,4)组合的 ASER 性能好,这是因为(1,8)组合的收发天线总数为 9,多于(2,4)组合的收发天线总数 6;接收天线数越大 MRC 性能越好。

图 3 给出了 $m=2, K+L=6$ 时,取不同 (K,L) 时 DE-QPSK 的 ASER 性能。 $K+L$ 相同意味着收发天线总数相同。由图 3 可知, (5,1)组合性能最差, (4,2)、(3,3)其次; (1,5)在低信噪比比(3,3)性能好,在高信噪比比(3,3)性能差; (2,4)性能最好; $(K,L)=(2,4)$ 组合比(5,1)组合的 ASER 性能好,这是因为 L 越大, MRC 分集效果越好; (2,4) 组合分集增益为 8, (5,1)组合分集增益为 5。

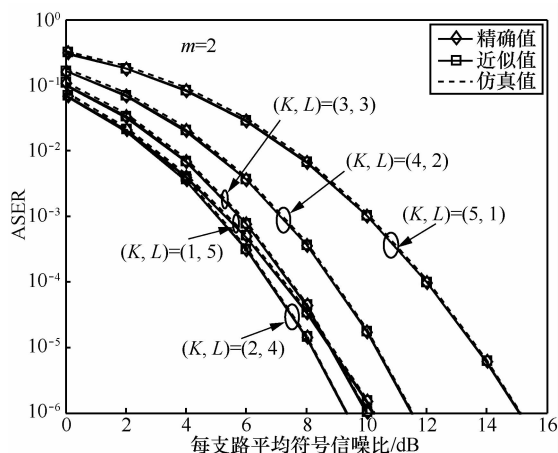


图 3 $K+L=6$ 不同组合对 DE-QPSK ASER 性能影响

图 4 给出了 $m \times K \times L=8$ 的几种不同组合情况下 DE-QPSK 的 ASER 性能。由图 4 可知, (m,K,L) 的 (4,2,1)组合性能最差, (1,2,4)组合性能最好。当衰落信道恶化时, 天线分集带来的性能改善可以弥补信道恶化导致的性能降低。

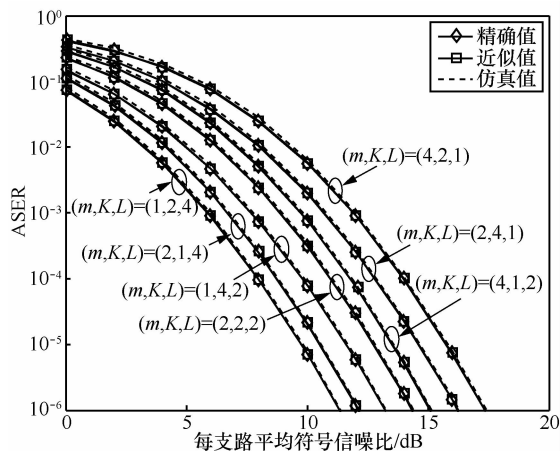


图 4 $m \times K \times L=8$ 不同组合对 DE-QPSK ASER 性能影响

另外,由图 1~图 4 可以看出,式 (33) 的 DE-QPSK 的 ASER 精确值和仿真值吻合;近似计算与精确值、仿真值非常接近。理论结果与仿真结果一致,从而验证了理论分析的正确性。

6 结束语

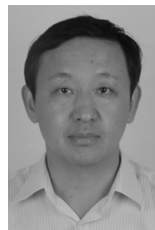
本文推导了 Nakagami 衰落信道上采用组合 SC/MRC 天线分集的 DE-QPSK 调制信号的 ASER 精确和近似表达式。理论结果与仿真结果都表明:衰落系数 m 越大, DE-QPSK 的 ASER 性能越好;增加收发天线数目,可以明显改善 DE-QPSK 的 ASER 性能。由于 MRC 分集性能优于 SC 分集性能,所以在收发天线总数一定时,适当增加接收端天线数目,可改善采用组合 SC/MRC 的 DE-QPSK 的 ASER 性能,为实际天线方案的选择提供了理论指导。

参考文献

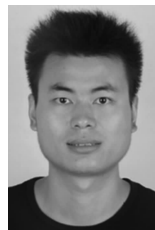
- 1 Xiong F. Digital Modulation Techniques. London: Artech House, 2006
- 2 Simon M K, Alouini M S. Digital Communication over Fading Channels. New York: John Wiley & Sons Inc, 2005
- 3 Radaydeh R M, Matalgah M M. Results for infinite integrals involving higher-order powers of the Gaussian Q-function with application to average SEP analysis of DE-QPSK. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(3): 793~798
- 4 Goldsmith A. 无线通信. 杨鸿文, 李卫东, 郭文彬等译. 北京: 人民邮电出版社, 2007
Goldsmith A. Wireless Communications. Translated by Yang H W, Li W D, Guo W B, et al. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007
- 5 李光球, 曹晓波. 瑞利衰落信道上采用组合发射机 SC/接收机 MRC 的 MQAM 性能分析. 电子学报, 2003, 31(7): 1080~1082
Li G Q, Cao X B. Performance analysis of MQAM with combined transmit SC/ receive MRC in rayleigh fading channels. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(7): 1080~1082
- 6 李光球. Nakagami 衰落信道上组合 SC /MRC 的性能分析. 电波科学学报, 2007, 22(2): 187~190
Li G Q. Performance analysis of combined transmit SC/receive MRC in Nakagami fading channels. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(2): 187~190
- 7 Ha T T. Theory and Design of Digital Communication Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2010

- 8 Simon M K. On the bit-error probability of differentially encode QPSK and offset QPSK in the presence of carrier synchronization. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 54(5): 806~812
- 9 Exton H. Multiple Hypergeometric Functions and Applications. New York: John Wiley, 1976
- 10 Jeffrey A, Zwillinger D. Table of Integrals, Series, and Products. Pittsburgh: Academic Press, 2007
- 11 Annamalai A, Adebola E, Olabiyi O. Further results on the dirac delta approximation and the moment generating function techniques for error probability analysis in fading channels. International Journal of Computer Networks & Communications, 2013, 5(1): 21~39
- 12 Proakis J G. Digital Communications. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006

[作者简介]



李光球,男,博士,杭州电子科技大学教授,主要研究方向为无线通信、信息论与编码,已主持完成3项国家自然科学基金项目和2项省部级基金项目,发表学术论文90余篇。



董家云,男,杭州电子科技大学硕士生,主要研究方向为无线通信。

2015209-6

勘误说明

林金桐,许晓东同志所撰写的稿件《第五代移动互联网》(编号:2015136)已在我刊2015年第5期上刊登,文稿部分内容修正如下:

(1)2015136-3页,左栏第3行,“上网”应更改为“网上”;右栏第27行,“主要用于工业现场自动化数据控制技术和标准的建立”应更改为“这些技术和标准的建立”。

(2)2015136-8页,左栏第19行,“但学者和工程师们没有一个认识到”应更改为“但学者和工程师们没有一个不认识到”。

特此更正,并向读者、作者致歉!

《电信科学》编辑部
2015年8月