

衰落信道中等增益分集用于调制分类

鲍丹, 王玉军, 杨绍全

(西安电子科技大学电子工程学院电子对抗研究所 135信箱, 陕西西安 710071)

摘要: 针对在 Rayleigh 和 Rician 慢衰落信道下的 QAM-g-~ 的调制分类问题, 提出一种新的基于等增益分集的调制分类算法。给出等增益分集用于调制分类的模型, 对合并器输出信号的归一化四阶累积量进行估计作为分类特征, 并推导了用于判决的等增益合并器输出信号的四阶累积量理论值。计算复杂度仅为 N 阶 (N 为样本个数), 数值仿真实验结果以及与已有方法的比较证明了理论分析的正确性和算法的实用性。

关键词: 调制分类; 累积量; 等增益合并; 衰落

中图分类号: TN911.72 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2007)02-0066-05

关于 QAM 信号调制分类问题, 早期的工作通常不考虑信道衰落, Swami 提出了基于四阶累积量的调制分类方法^[1]、Wei Wen 提出最大似然 (ML) 方法^[2], 用于加性高斯白噪声 (AWGN) 信道中信号的分类问题, 但实际情况往往是信道存在由于多径引起的衰落, 对于这类信号的调制分类问题就要复杂得多。Yawpo Yang 提出了衰落信道下的 ML 方法 QAM 信号分类器^[3], Ali Abdi 提出了衰落信道下的基于多重天线的伪混合似然率检验 (qHLRT) QAM 信号分类器^[4], 然而似然方法有较高的计算复杂度, 并且当模型不匹配时鲁棒性较差。

本文针对衰落信道下的 QAM 信号分类问题, 应用多重天线接收, 提出一种基于等增益分集的调制分类算法, 算法中用到接收信号的等增益和的四阶累积量作为分类特征。此方法不仅可以获得分集增益, 而且可以有效对抗多径衰落, 较 qHLRT 方法具有更强的实用性, 其计算复杂度仅为 N 阶 (N 为样本个数), 并且不需要假设衰落幅度在观察期间恒定, 不需要估计衰落幅度。

1 问题描述

对于给定的接收信号 $r(t) 0 \leq t \leq T$, 调制分类器是指能从 P 个可能的调制类型构成的集合 $\{\omega_1, \dots, \omega_p\}$ 中辨识出 $r(t)$ 的调制类型的系统。多重天线所提供的空间分集是无线通信中一种有效的工具, 对于一个 L 个分支的多重接收天线, 某个分支接收信号的基带信号可表示为^[1]

$$r_l(n) = \alpha_l e^{-j\varphi_l} s_n + g_l(n) \quad 0 \leq n \leq N-1, l=1, \dots, L \quad (1)$$

其中 $r_l(n)$ 是从通信信道中接收到的被加性噪声污染的信号经过预处理后的模型, 我们假定预处理是在相关、同步的环境下进行, 并且对接收信号进行了较好的载波、定时和波形恢复。 s_n 是符号序列, $g_l(n)$ 是加性高斯噪声序列。 N 是符号个数, $s_n \in \{S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,M_i}\}$ 是星座 i 中的一个符号, M_i 是星座 i 符号集的大小。 α_l 和 φ_l 表示衰落现象, 假设信道是平坦的、慢衰落信道, 衰落足够慢使得复衰落参数 α_l 至少在一个符号周期内恒定, 而 φ_l 在观测时间内恒定, 并且 α_l, φ_l 与 s_n 统计独立, 其中参数 φ_l 服从均匀分布^[5]

$$p_{\varphi_l} = \frac{1}{2\pi} \quad ; \quad 0 \leq \varphi_l < 2\pi \quad ; \quad l=1, \dots, L \quad (2)$$

而 α_l 服从 Rayleigh、Rician 分布。对于 Rayleigh 分布其概率密度函数为^[5]

收稿日期: 2006-09-06

作者简介: 鲍丹 (1975-), 男, 湖北松滋人, 博士生, 主要从事调制分类的研究。

$$p_{\alpha_l}(x) = \frac{2x}{\Omega} e^{-x^2/\Omega} \quad ; \quad x, \Omega \geq 0; l = 1, \dots, L \quad (3)$$

其中 $\Omega = E(x^2)$ 是 α_l 的均方值。对于 Rician 分布其概率密度函数为^[5]

$$p_{\alpha_l}(x) = \frac{2x(1+k)}{\Omega} e^{-\frac{(1+k)x^2+k\Omega}{2}} I_0\left(2x\sqrt{\frac{(1+k)k}{\Omega}}\right); \quad x, k, \Omega \geq 0; l = 1, \dots, L \quad (4)$$

其中 I_0 是第一类 0 阶修正 Bessel 函数, k 是信号中反射与漫反射功率的比值。

2 基于累积量的分类算法

通信信号处理中,分集接收可以有效对抗多径衰落,并能获得一定的分集增益。基于多重天线的分集接收机模型如图 1 所示,这是一个典型的等增益合并分集接收机,假设各分支相互独立。

等增益合并后的信号表示如下^[6]

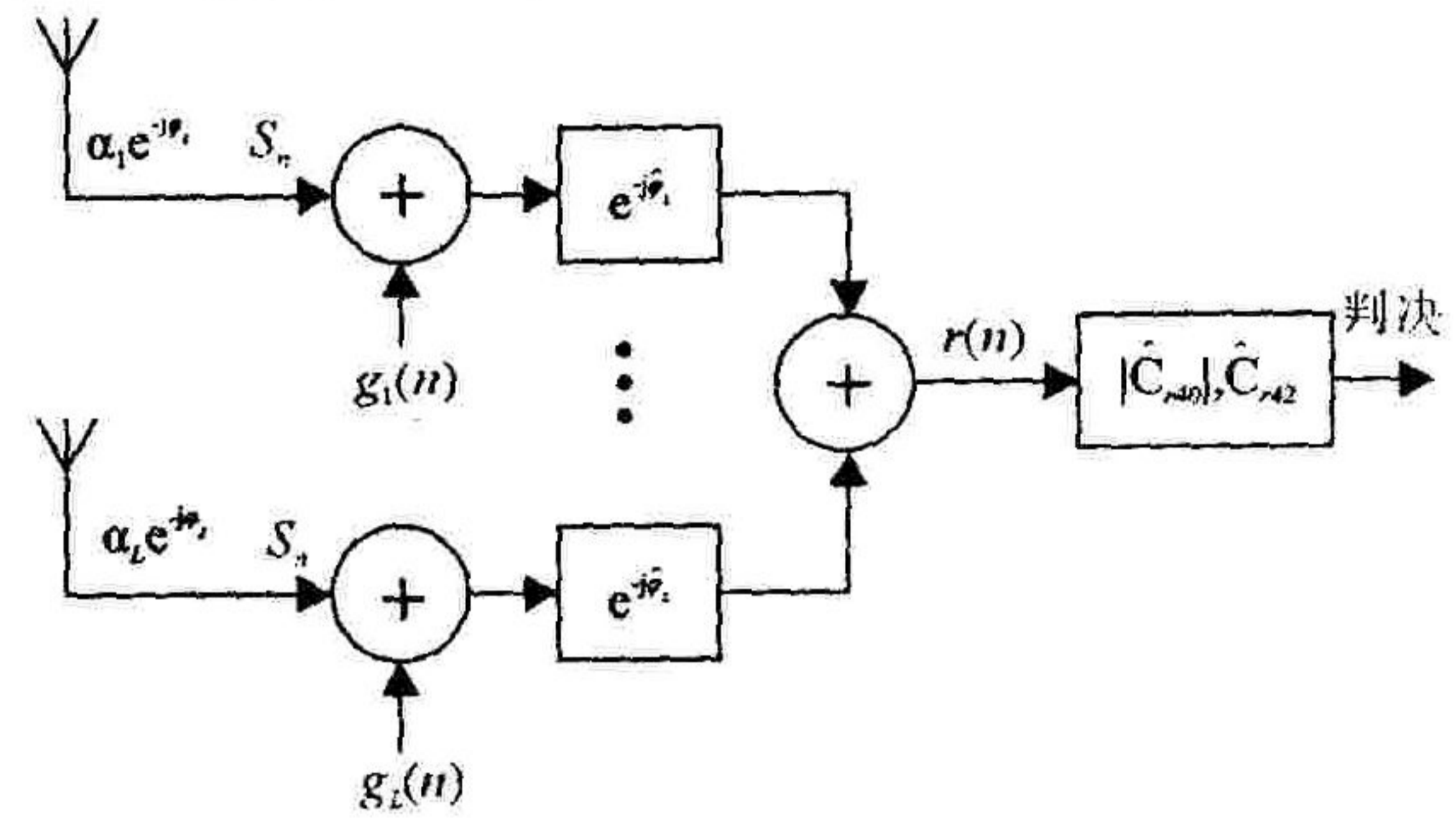


图1 等增益分集用于调制分类的模型

$$r(n) = \sum_{l=1}^L r_l(n) e^{j\hat{\phi}_l} = \sum_{l=1}^L \alpha_l s_n + \sum_{l=1}^L g_l(n) e^{j\phi_l} = A s_n + g(n) \quad ; \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (5)$$

其中

$$A = \sum_{l=1}^L \alpha_l \quad (6)$$

而 $\hat{\phi}_l$ 是对 l 分支多径相位 ϕ_l 的估计,应用高阶累积量方法^[7] 得到,此方法对相位的估计会有 4 重模糊,但是这不会影响后面的调制分类,因为基于高阶累积量的调制分类方法对星座相位旋转并不敏感,只要在估计 ϕ_l 时使 L 个分支的相位保持相互一致即可。

从式(5)可以看出,等增益合并后的信号 $r(n)$ 中仍然含有一个未知参数 A ,而 $g(n)$ 仍然是复高斯噪声。本文选用四阶累积量作为调制类型分类的统计量,来解决衰落信道下 QAM 信号的分类问题,因为它对星座旋转有天然的鲁棒性。下面首先给出需要使用的四阶累积量的定义,及其对于各种调制方式四阶累积量的理论值,然后给出从实际数据中估计累积量的方法。在这里假定 $r(n)$ 的各阶累积量存在。

3 不同星座的四阶累积量理论值

下面计算接收信号 $r(n)$ 的各阶累积量在理想情况下的理论值,从而以它们作为分类依据。在不考虑频偏、相位偏差和残余信道效应的情况下,由假设 $\alpha_l, \phi_l (l = 1, \dots, L)$ 与 s_n 统计独立,可以得到以上累积量的理论值(这里考虑无噪声时的理论值),由式(5) 四阶累积量为^[1]

$$C_{r20} = E(A^2)E(s_n^2) \quad (7) \quad C_{r21} = E(A^2)E(|s_n|^2) \quad (8)$$

$$C_{r40} = E(A^4)E(s_n) - 3C_{r20}^2 \quad (9) \quad C_{r42} = E(A^4)E(|s_n|^4) - |C_{r20}|^2 - 2C_{r21}^2 \quad (10)$$

其中 $E(A^m) (m = 2, 4)$ 是因子 A 的 m 阶矩, A 的存在改变了接收信号的累积量, $E(|s_n|^m)$ 是符号序列幅值的 m 阶矩, $m = 2, 4$ 。为了计算式(7) - (10) 的理论值,需要知道 A 的 m 阶矩,这又需要分为两种情况,即 $\alpha_l (l = 1, \dots, L)$ 在整个观测周期恒定和在一个符号周期恒定。 A, α_l 在一个符号周期恒定,这意味着 A 在符号之间是随机变化的,它的 m 阶矩计算如下。

$$E[A^m] = -j^m \phi_A^{(m)}(0) \quad (11)$$

其中 ϕ_A 是 A 的特征函数, (m) 表示导数。由于假设各分支足够远,使得各分支相互独立,因此 $\alpha_l (l = 1, \dots, L)$ 相互独立,并且假设它们在一次观测中服从相同的分布,也就是具有相同的特征函数,这里记为 ϕ_α ,于是由式(6) 有

$$\phi_A(\omega) = \phi_\alpha^L(\omega) \quad (12)$$

为了得到 $E(A^m)$,由式(11) 可见首先要计算 A 的特征函数的各阶导数,推导如下:

$$\phi_A'(\omega) = L\phi_\alpha^{L-1}(\omega)\phi_\alpha'(\omega) \quad (13) \quad \phi_A''(\omega) = L\phi_\alpha^{L-1}(\omega)\phi_\alpha''(\omega) + L(L-1)\phi_\alpha^{L-2}(\omega)\phi_\alpha'^2(\omega) \quad (14)$$

$$\phi'''_A(\omega) = L\phi_\alpha^{L-1}(\omega)\phi'''_\alpha(\omega) + 3L(L-1)\phi_\alpha^{L-2}(\omega)\phi'_\alpha(\omega)\phi''_\alpha(\omega) + L(L-1)(L-2)\phi_\alpha^{L-3}(\omega)\phi_\alpha^3(\omega) \quad (15)$$

$$\phi^{(4)}_A(\omega) = L\phi_\alpha^{L-1}(\omega)\phi^{(4)}_\alpha(\omega) + 4L(L-1)\phi_\alpha^{L-2}(\omega)\phi'_\alpha(\omega)\phi''_\alpha(\omega) + 3L(L-1)\phi_\alpha^{L-2}(\omega)\phi_\alpha^4(\omega) + 6L(L-1)(L-2)\phi_\alpha^{L-3}(\omega)\phi_\alpha^2(\omega)\phi'_\alpha(\omega) + L(L-1)(L-2)(L-3)\phi_\alpha^{L-4}(\omega)\phi_\alpha^4(\omega) \quad (16)$$

在式(13) - (16)中, $\phi_\alpha^{(m)}(0)$ 对于 Rayleigh 衰落为^[5]

$$\phi_{\alpha-Ra}^{(m)}(0) = j^m \Omega^{m/2} \Gamma(1 + m/2) \quad (17)$$

其中 Γ 是 Gamma 函数。而对于 Rician 衰落为^[5]

$$\phi_{\alpha-Ri}^{(m)}(0) = j^m \left(\frac{\Omega}{1+k}\right)^{m/2} e^{-k} \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) {}_1F_1\left(1 + \frac{m}{2}, 1, k\right) \quad (18)$$

其中, F_1 是合流超几何函数, 其定义为^[5]

$${}_1F_1(v, \lambda, k) = 1 + \frac{vk}{1!} + \frac{v(v+1)k^2}{\lambda(\lambda+1)2!} + \dots \quad (19)$$

将式(13) - (19)代入式(11)式可以得到 A 的 m 阶矩, 再将式(11)代入式(7) - (10)可以得到不同星座下 $r(n)$ 的各阶累积量在理想情况下的理论值。为了消除幅度不同带来的影响, 进一步选用归一化的四阶累积量^[1]。

$$c_{r40} = C_{r40}/C_{r21}^2 \quad (20) \quad c_{r42} = C_{r42}/C_{r21}^2 \quad (21)$$

作为分类统计量。为了比较将一些理论值列在表1, (a_i 在整个观察周期恒定)。

表1 理论值

	Rayleigh (Rician $k=0$)					Rician								
						$k=0.1$		$k=1$		$k=10$		$k=100$		
	$L=1$	$L=2$	$L=3$	$L=4$	$L=5$	$L=1$	$L=2$	$L=1$	$L=2$	$L=1$	$L=2$	$L=1$	$L=2$	
c_{40}	16QAM	-1.36	-1.04	-0.92	-0.86	-0.83	-1.35	-1.03	-1.19	-0.95	-0.80	-0.74	-0.69	-0.69
	32QAM	-0.38	-0.29	-0.26	-0.24	-0.23	-0.38	-0.29	-0.33	-0.27	-0.22	-0.21	-0.19	-0.19
	64QAM	-1.24	-0.94	-0.84	-0.78	-0.75	-1.23	-0.94	-1.08	-0.87	-0.73	-0.67	-0.63	-0.63
c_{42}	16QAM	0.64	0.01	-0.21	-0.33	-0.40	0.63	0.01	0.31	-0.15	-0.45	-0.56	-0.65	-0.67
	32QAM	0.62	-0.00	-0.23	-0.34	-0.41	0.61	-0.01	0.29	-0.16	-0.46	-0.57	-0.66	-0.68
	64QAM	0.76	0.10	-0.13	-0.25	-0.32	0.75	0.10	0.42	-0.06	-0.38	-0.50	-0.59	-0.61

此时 A 在符号之间是恒定的, 这种特殊情况比较简单, 虽然 A 在每次观测周期不同, 其具体的值也无法得知, 但是四阶累积量的归一化可以消除它的影响, 此时的各个星座的归一化四阶累积量 c_{r40} 及 c_{r42} 的理论值如表2所示。

表2 归一化值

	16QAM	32QAM	64QAM
c_{40}	-0.680 2	-0.190 1	-0.619 3
c_{42}	-0.679 5	-0.689 5	-0.618 6

从表1和表2中发现在衰落信道中对于不同的星座, 其归一化四阶累积量 c_{40} 及 c_{42} 有较大差别, 这样 c_{40} 及 c_{42} 就可以作为区分各种调制类型的标志, 这为对衰落信道下 QAM 信号的调制分类提供了依据。再从接收信号中估计其四阶累积量, 根据上面计算的理论值进行判决^[1]。

4 仿真结果

通过几个 Monte Carlo 仿真实验来分析所提出算法的性能。考虑3个类别 {16QAM, 32QAM, 64QAM} 的分类问题, 每次实验用到的归一化四阶累积量 \hat{c}_{40} \hat{c}_{42} 判决准则如图2所示。分类正确率的定义为^[1]

$$P_c = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P P_r[H_i | H_i] \quad (22)$$

其中 $P_r[H_i | H_i]$ 为实际调制类型为 i 时算法判断为 i 的概率。

首先看看 Rice 衰落下不同 k 参数时, 分类的正确率。图3是当 $N=2048, L=2$ 时不同 k 值的分类正确率, $k=0.1$ 是接近 Rayleigh 衰落时的分类性能, $k=\infty$ 是理想 AWGN 信道的分类性能, 可以看到随着信道衰

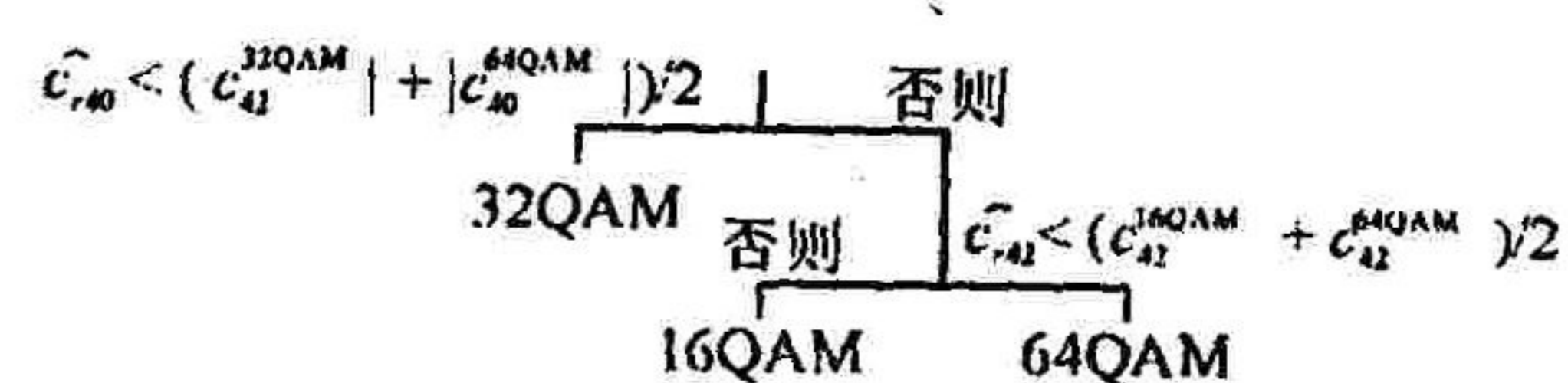


图2 3类别的谱系分类方法

落严重程度的增大分类性能随之下降。当 $k > 10$ 时,分类性能接近 AWGN 的性能,在 10 dB 时就有接近 100% 的正确率。

分支数 L 对分类性能的影响如图 4 所示,此时 $N = 2\ 048$, Rayleigh 衰落,可见分支 L 从 1 增加到 4 时性能改善比较明显,当 $L > 4$ 时,性能的改善变得不明显,此时单纯增加分支数已经不能较明显地提高性能,且当 $SNR > 10$ dB 时,随着 SNR 的提高, P_c 也没有显著提升,这时只有数据长度 N 才能起到关键作用。总之基于等增益分集的分类不仅可以对抗衰落,而且本身可以获得较大的分集增益。

前面推导中假设各天线各分支相互独立,这里看看如果存在相关,对于分类性能有何影响。如图 5 所示,此时 $L = 2, N = 2\ 048$, Rayleigh 衰落。两个分支之间的相关性由 $\rho = E[z_1 z_2^*]$ 定义,其中 $z_1 = \alpha_1 \exp(-j\varphi_1), z_2 = \alpha_2 \exp(-j\varphi_2)$ 是零均值复高斯变量。可以看到当信道相关程度增大时,分类性能很快下降,当 $\rho = 0.4$ 时,性能已经下降到和 $\rho = 1$ 近似的程度。说明分集接收对接收天线的分离程度是比较敏感的。

最后看看当 $\alpha_l (l = 1, \dots, L)$ 在整个观测周期恒定时, L 对于分类性能的影响。如图 6 所示, $N = 2\ 048$, Rayleigh 和 AWGN 信道, SNR 分别为 5 dB 和 10 dB,可以看到增加一个分支性能增加最为明显,并且当 $SNR = 10$ dB, L 的值增大到 4 时, Rayleigh 衰落时的分类性能与 AWGN 一样,都接近 100%,证明分集接收能有效地对抗深度衰落。

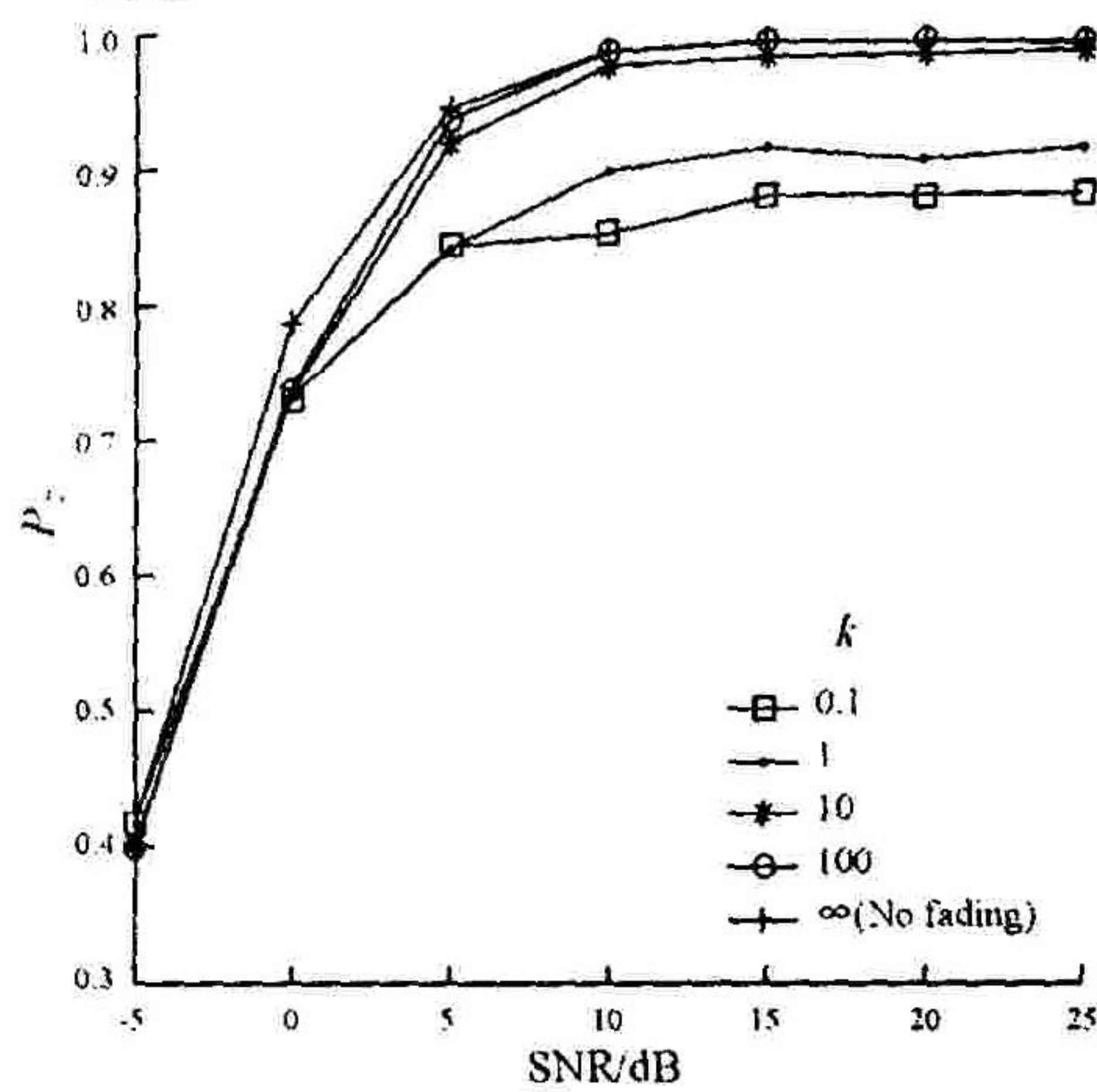


图 3 Rice 衰落 k 参数对正确率的影响

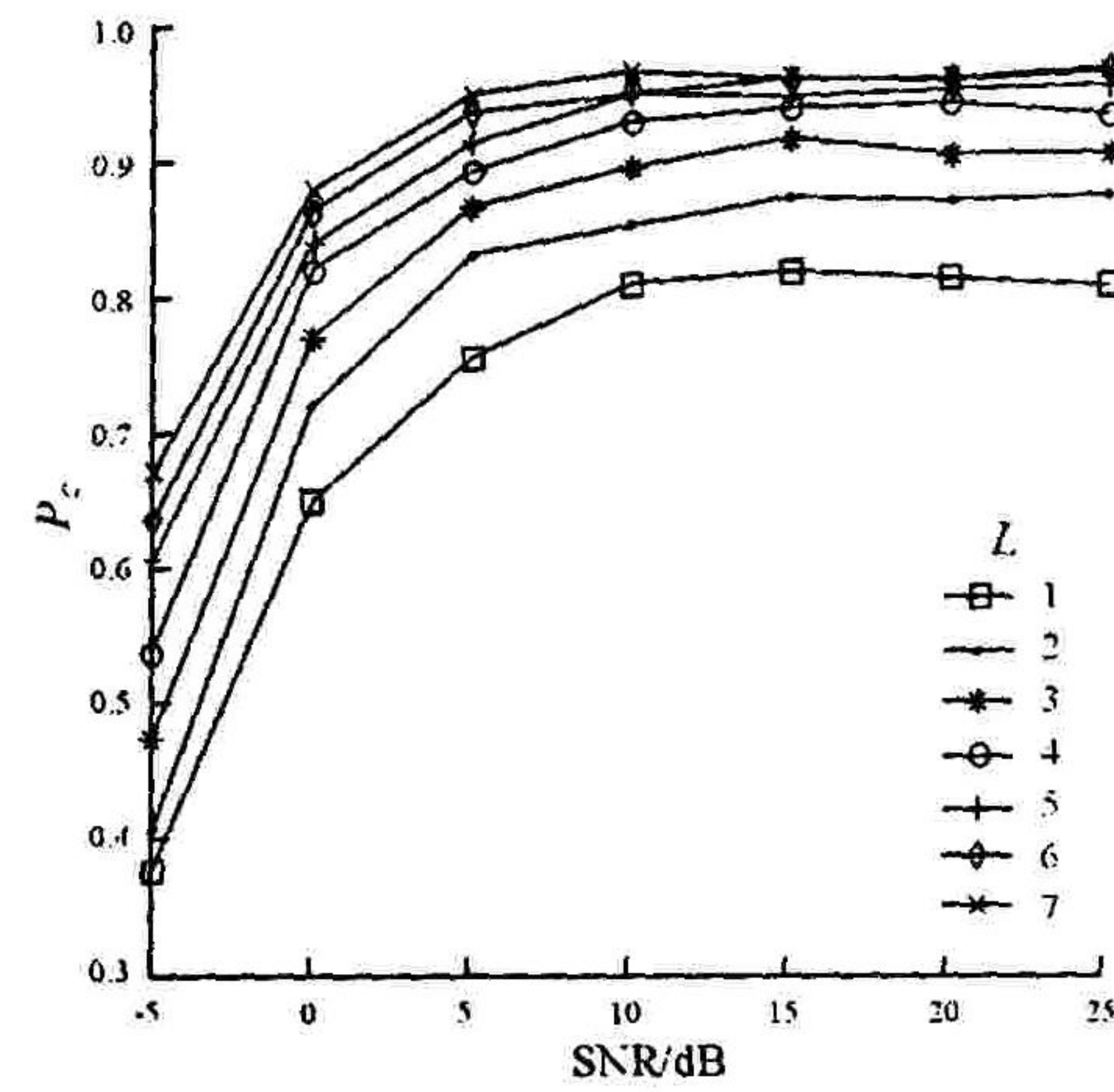


图 4 分支数 L 对分类性能的影响

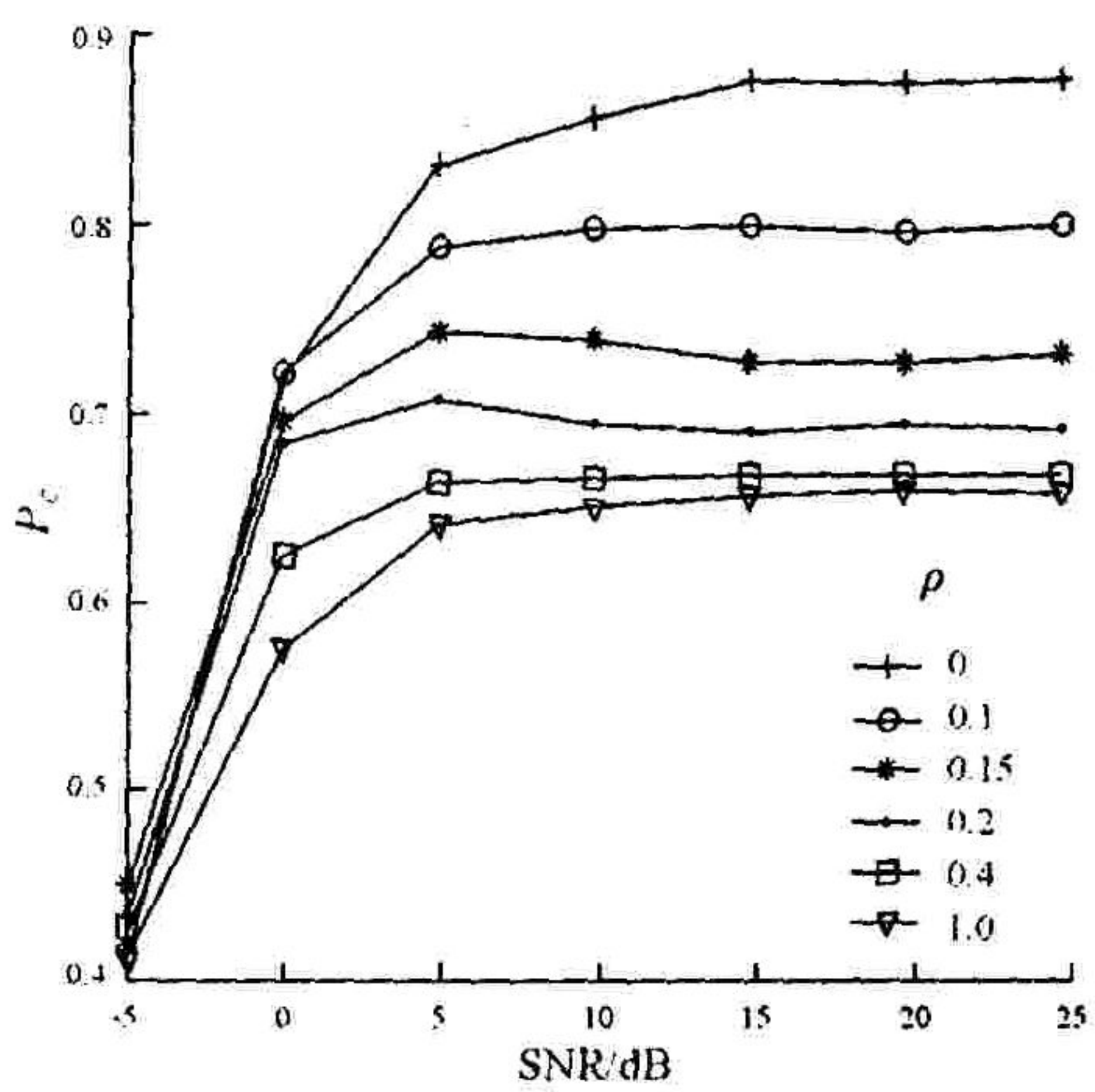


图 5 天线相关程度对分类性能的影响

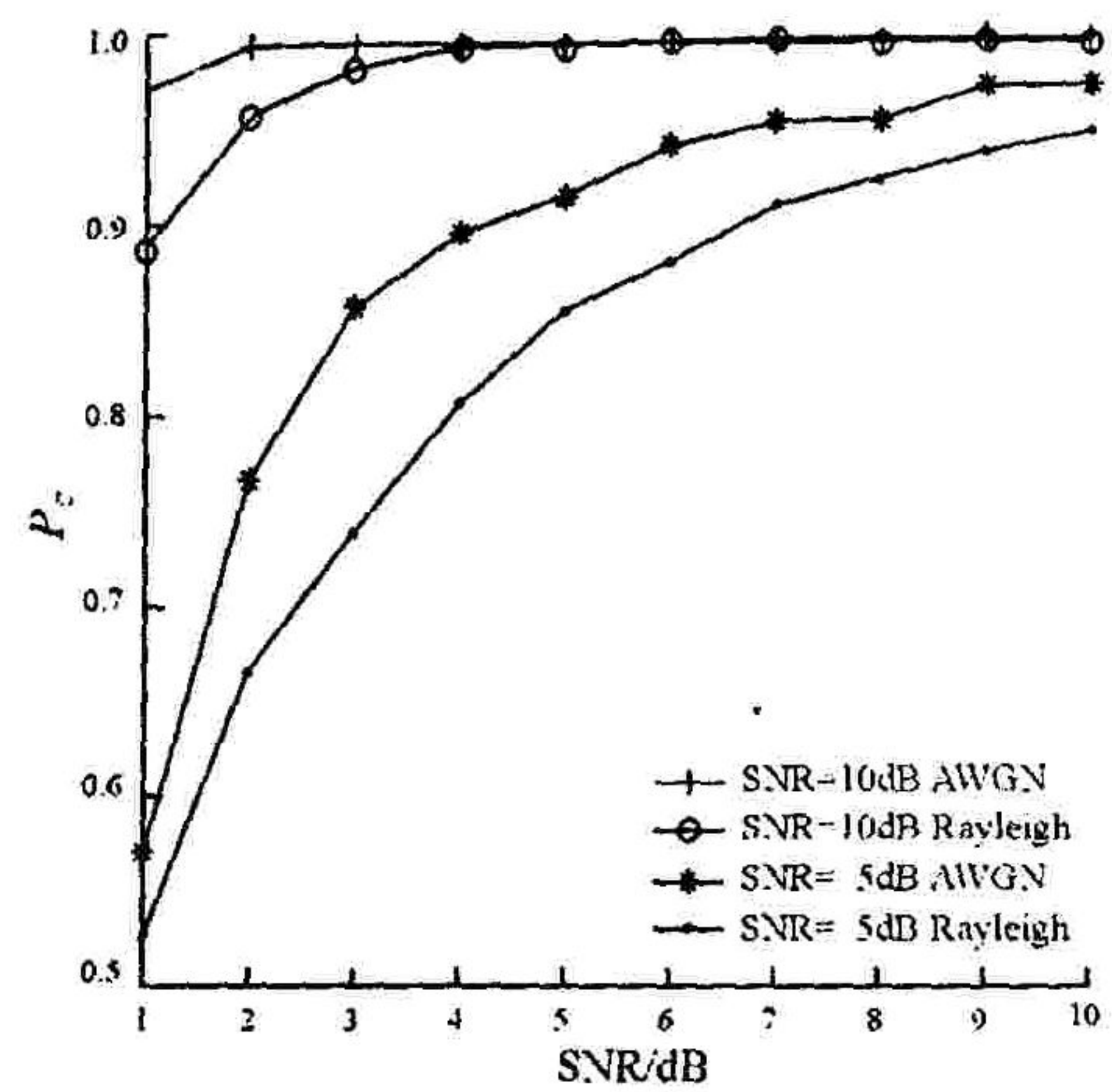


图 6 $\alpha_l (l = 1, \dots, L)$ 分支数 L 对分类性能的影响

5 结束语

本文针对衰落信道下的 QAM 信号分类问题,提出了一种基于等增益分集的调制分类算法,仿真实验表明当天线分支为 2 时就能获得很大的性能改善,分支数越大调制分类对抗深度衰落的能力也就越强,AGWN 信道下文中算法有最好的分类性能,随着信道衰落严重程度的增加,分类性能随之下降,同时分集接收也能

获得较大的分集增益。本文算法仅需要大约 $4N$ 个复数乘法,有较小的计算复杂度和较强的实用性。

参考文献:

- [1] Swami Ananthram, Sadler Brian M. Hierarchical Digital Modulation Classification Using Cumulants[J]. IEEE Transactions On Communications, 2000, 48: 416 - 429.
- [2] Wei Wen, Mendel Jerry M. Maximum - Likelihood Classification for Digital Amplitude - Phase Modulations[J]. IEEE Transactions On Communications, 2000, 48: 189 - 193.
- [3] Yang Yawpo, Chang Jen - Ning, Liu Ji - Chyun. Maximum Log - Likelihood Function - Based QAM Signal Classification over Fading Channels[J]. Wireless Personal Communications, 2004, 28: 77 - 94.
- [4] Ali Abdi, Octavia A. Dobre, Rahul Choudhry, et al. Modulation Classification in Fading Channels Using Antenna Arrays[A]. 2004 IEEE Military Communications Conference[C]. 2004, 211 - 217.
- [5] Proakis John G. 数字通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [6] Zhang Q T. A Simple Approach to Probability of Error for Equal Gain Combiners over Rayleigh Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(4), 1551 - 1554.
- [7] Kenneth V, Cartwright. Blind Phase Recovery in General QAM Communication Systems Using Alternative Higher Order Statistics [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 12: 327 - 329.

(编辑: 门向生)

Equal Gain Combining for Modulation Classification in Fading Channel

BAO Dan, WANG Yu- jun, YANG Shao- quan

(Institution of Electronic Countermeasure, School of Electronic Engineering, XIDIAN University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To study the modulation classification problem for M -ary quadrature amplitude modulation (QAM) signals traveled slowly over Rayleigh and Rician fading channels, a new algorithm based on equal gain combining is proposed in the paper. The equal gain diversity model for modulation classification is given in which equal gain combining is used to combine the signals received by multiple antennas. The normalized fourth - order cumulants of the signal at the output of the combiner are estimated, which can be used as modulation classification features. The theoretical values of the normalized fourth - order cumulants of the signal at the output of the combiner for various constellations are derived as the classification criterions. The computational complexity of the developed algorithm is order N , where N is the number of the complex base - band data samples. The theoretical arguments and the practicability of the algorithm are verified via extensive simulations and comparisons with the existing approaches.

Key words: modulation classification ; cumulant; equal gain combining; fading