

Nakagami衰落信道上编码MIMO WCDMA系统性能分析

徐福永, 李光球

(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

【摘要】研究了多址干扰下, MIMO WCDMA系统发射端采用空时分组码和卷积码、接收端采用最大比合并天线分集和软判决译码方案的误码性能。使用 $Q(x)$ 的另一种数学表达式和信干噪比的矩生成函数, 推导了Nakagami- m 衰落信道上存在多址干扰以及发射端发射不等功率下, 卷积编码系统的成对差错概率和误码性能联合限。讨论了在各种编码方案下空间路径分集接收机的误码性能。数值计算结果表明组合空间分集和卷积编码能显著改善MIMO WCDMA系统的误码性能。分析结果适用于MIMO WCDMA系统的上下行链路。

关键词 多输入多输出系统; 天线分集; 卷积编码; 多址干扰; Nakagami衰落; 成对差错概率
中图分类号 TN911.22 **文献标识码** A

Performance Analysis of Coded MIMO WCDMA Systems in Nakagami Fading Channels

XU Fu-yong, LI Guang-qiu

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University Hangzhou 310018)

Abstract The error probability performance for MIMO WCDMA systems with the space-time block codes and convolutional codes employed at the transmitter, maximal-ratio-combining antenna diversity and soft decoding schemes employed at the receiver is investigated under the condition of multiple access interference. Based on the alternative representations of $Q(x)$ and the moment generating function of SINR, the pairwise error probability of a convolutional coded system and union upper bound of error performance are derived under the condition of multiple access interference and nonidentical average transmitted power at each transmit antenna in Nakagami- m fading channels. The performance of a space-path diversity receiver in various coding schemes is illustrated. Numerical results show that the combination of convolutional coding and spatial combining leads to a dramatic performance improvement for MIMO WCDMA systems. The analysis result can be applied to uplink and downlink of MIMO WCDMA systems.

Key words multiple-input-multiple-output system; antenna diversity; convolutional coding; multiple access interference; Nakagami fading; pairwise error probability

多输入多输出 (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) 技术可以大大提高无线通信链路的容量^[1-2], 是当前通信传输领域的研究热点。无线信道中的多径干扰会严重恶化其性能, 天线分集是克服信道衰落不利影响的一种有效技术。文献[3]研究了衰落信道上存在多址干扰下, WCDMA系统采用组合发射和接收天线分集的性能, 但没有考虑信道编码技术。本文研究了Nakagami衰落信道上多址干扰下, MIMO WCDMA系统下行链路采用卷积码的误码性能, 推导了组合分集和卷积编码系统的成对差错概率和误码性能联合限, 并比较了空间路径分集接收机在各种编码方案下的误码性能。

1 宽带MIMO信道

考虑 (M_T, M_R) WCDMA系统的下行链路, 即基站有 M_T 副天线、移动台有 M_R 副天线。设定宽带MIMO信道由一个有 L 个多径分量的抽头延时线模型来模拟, 其等效的低通矢量信道为^[4]:

$$\mathbf{H}(\tau) = \sum_{l=1}^L \delta(\tau - \tau_l) \mathbf{h}_l \quad (1)$$

收稿日期: 2004-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69972014); 教育部高等学校骨干教师计划资助项目

作者简介: 徐福永(1980-), 男, 硕士生, 主要从事无线通信系统方面的研究。

式中 $\mathbf{h}_l = [h_{1,l}, h_{2,l}, \dots, h_{M_T,l}]$, $h_{i,l}$ 为从第 i 副发射天线以时延 τ_l 到达所有接收天线阵的信道系数, 其元素 $h_{i,j,l}$ 为从第 i 副发射天线到第 j 副接收天线之间的复信道系数。假设接收天线经历了相同的衰落, 每副发射天线和接收天线之间的路径独立, 信道衰落至少在连续两个符号间隔上是恒定的。

在 Nakagami 信道中, 信号包络 $r_l = |h_{i,j,l}|$ 的概率密度分布服从 Nakagami 分布:

$$p(r_l) = \frac{2}{\Gamma(m_l)} \left(\frac{m_l}{\Omega_l}\right)^{m_l} r_l^{2m_l-1} e^{-(m_l/\Omega_l)r_l^2} \quad (2)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 为 gamma 函数; $\Omega_l = E(r_l^2)$ 为第 l 条路径上的平均功率, 衰落指数 $m_l = 1/2$ 。

2 组合分集和编码

考虑卷积编码 (M_T, M_R) MIMO WCDMA 系统, 发送端采用空时分组码来提高空间分集增益。假定接收天线相互独立并有理想的信道向量估计, 接收端采用最大比合并天线分集, 所有可分离路径的衰落独立。

RAKE 接收机瞬时输出 (Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio, SINR) 为:

$$\gamma = \sum_{j=1}^{M_R} \gamma_j = \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{j=1}^{M_R} \gamma_{i,j} = \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{l=1}^L \gamma_{i,l} = \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{j=1}^{M_R} \sum_{l=1}^L \gamma_{i,j,l} \quad (3)$$

式中 $\gamma_{i,j,l}$ 为从第 i 副发射天线到第 j 副接收天线之间第 l 条路径的瞬时 SINR。对 WCDMA 系统中的多址干扰用高斯近似, $\gamma_{i,j,l}$ 为^[3]:

$$\gamma_{i,j,l} = \frac{0.5h_{i,j,l}^2 \alpha_{i,j}}{\frac{\alpha_{i,j}}{3G} \left[(U-1)E(h_{i,j,l}^2) + U \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^L E(h_{i,j,k}^2) \right] + \frac{N_0}{2E_b}} \quad (4)$$

式中 G 为扩频增益; U 为系统中活动用户的数目; $E(\cdot)$ 为统计平均; E_b 为所有发射天线发射每比特的总能量; $N_0/2$ 为噪声的双边功率谱密度; $\alpha_{i,j}$ 为一常数, 表示对总的接收功率发射功率在第 i 副发射天线与第 j 副接收天线对之间的分配比例。

由于卷积编码系统的性能联合上限能够准确地反映编码系统的性能^[4], 因此本文采用联合上限来研究卷积编码 MIMO WCDMA 系统的性能。对于卷积码 (n, k, C_L) , k 为每次输入的信息比特数; n 和 C_L 分别为码长和码的约束长度。码率 $R_c = k/n$ 的卷积码平均误比特率 (BER) 联合上限为^[4]:

$$P_e \leq \frac{1}{k} \sum_{d=d_{\text{free}}}^{\infty} \beta_d P_2(d) \quad (5)$$

式中 d_{free} 为码字的自由距离; $\{\beta_d\}$ 为码字的转移函数 $T(D, N)$ 对 N 的一阶导数在 $N=1$ 时的展开系数^[5]; $P_2(d)$ 为网格中错误路径 x' 首次与全零路径 x 汇合的平均成对差错概率, 若路径 x' 和 x 在 d 个比特位置 p_1, p_2, \dots, p_d 上不同。假定接收机采用 MRC 以及解调器输出端不进行量化, 对于 L 径频率选择 Nakagami 衰落信道上的 (M_T, M_R) MIMO 系统, 使用 BPSK 调制的卷积编码系统的成对差错概率为:

$$P_2(d) = E \left[Q \left(\sqrt{2 \sum_{n=1}^d \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{j=1}^{M_R} \sum_{l=1}^L \gamma_{i,j,l}(p_n)} \right) \right] \quad (6)$$

式中 $\gamma_{i,j,l}(p_n) = \frac{0.5h_{i,j,l}^2(p_n) \alpha_{i,j}}{\frac{\alpha_{i,j}}{3G} [(U-1)E(h_{i,j,l}^2) + U \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^L E(h_{i,j,k}^2)] + N_0/2E_s}$ 。为了公正比较编码和未编码系统, 设传输 k 个

信息比特和传输 n 个编码比特的能量相同, 则 $E_s = E_b R_c$ 。使用 $Q(x)$ 的另一种表达式为^[4]:

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \sin^2 \theta}\right) d\theta \quad x \geq 0 \quad (7)$$

可将式(6)变为:

$$P_2(d) = \frac{1}{\pi} E \left[\int_0^{\pi/2} \exp \left(-\frac{\sum_{n=1}^d \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{j=1}^{M_R} \sum_{l=1}^L \gamma_{i,j,l}(p_n)}{\sin^2 \theta} \right) d\theta \right] \quad (8)$$

假定采用理想的交织和解交织, 则 $h_{i,j,l}(p_n)$ 是独立同分布的随机变量, 应用文献[3]中Nakagami衰落信道上SINR的矩生成函数, 可以得到卷积编码系统的成对差错概率为:

$$P_2(d) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{i=1}^{M_T} \prod_{j=1}^{M_R} \prod_{l=1}^L \left(1 + \frac{\bar{\gamma}_{i,j,l}}{m_l \sin^2 \theta} \right)^{-d m_l} d\theta \quad (9)$$

式中 $\bar{\gamma}_{i,j,l}$ 为第 i 副发射天线到第 j 副接收天线之间第 l 条路径的平均SINR。将式(9)代入式(5)即可得到组合分集和编码MIMO WCDMA系统的误码性能联合上限。式(9)可通过部分分式法得到解析表达式。对于收发天线对之间等功率分配, 即 $\alpha_{i,j} = 1/M_T$, 利用文献[2]可得到 $P_2(d)$ 的表达式为:

$$P_2(d) = \frac{1}{\pi} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{M_T M_R d m_l} \mu_l^{(M_T M_R d m_l - k)} I_S[0, \pi/2, \bar{\gamma}_l / m_l, k] \quad (10)$$

式中 $\bar{\gamma}_l$ 是第 l 条路径的平均信干噪比。

$$\mu_l^{(M_T M_R d m_l - k)} = \frac{(\bar{\gamma}_l / m_l)^{k - M_T M_R d m_l}}{(M_T M_R d m_l - k)!} \frac{d^{M_T M_R d m_l - k}}{dt^{M_T M_R d m_l - k}} \left[\prod_{i=1, i \neq l}^L \left(\frac{1}{t \bar{\gamma}_i / m_i + 1} \right)^{M_T M_R d m_l} \right]_{t=-1/(\bar{\gamma}_l / m_l)} \quad (11)$$

$$I_S(\theta_L, \theta_U, a, b) = (\theta_U - \theta_L) + \sum_{n=1}^b (-1)^n \sum_{r=0}^{n-1} \frac{a^{n-r-1/2}}{(1+a)^{n-1/2}} \binom{b}{n} \binom{n-1}{r} p\left(\sqrt{\frac{1+a}{a}} \tan \theta_L, \sqrt{\frac{1+a}{a}} \tan \theta_U, 1+r\right) \quad (12)$$

$$p(a, b, n) = \frac{(2n-3)!!}{2^{n-1}(n-1)!} (\tan^{-1} b - \tan^{-1} a) + \frac{(2n-3)!!}{(n-1)!} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(n-k-1)!}{2^k (2n-2k-1)!!} \left[\frac{b}{(1+b^2)^{n-k}} - \frac{a}{(1+a^2)^{n-k}} \right] \quad (13)$$

式中 $(2n-3)!! = 1 \times 3 \times \dots \times (2n-3)$; $(n-1)! = 1 \times 2 \times \dots \times (n-1)$ 。

对于无编码(M_T, M_R)系统的误码性能, 应用文献[3]可得到平均BER为:

$$P_b = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{i=1}^{M_T} \prod_{j=1}^{M_R} \prod_{l=1}^L \left(1 + \frac{\bar{\gamma}_{i,j,l}}{m_l \sin^2 \theta} \right)^{-m_l} d\theta \quad (14)$$

3 数值计算

本文考虑了几种低码率最大自由距离卷积码, 表1所示列出了其参数。对于组合分集和编码系统的平均BER联合上限, 可采用式(5)中的前6项进行计算^[4]。发射机采用Alamouti提出的空时分组码方案^[6], 以无发射和接收分集的(M_T, M_R)=(1,1)系统为基准来计算总的空间分集增益。表2所示列出了UMTS信道模型即室内A、步行A和车载A模型。本文以室内A环境为例, 在数值计算中设定:(1)接收天线分支相互独立, 扩频增益 $G=128$, 系统中活动用户数 $U=10$; (2)总的发射功率固定, 每副发射天线发射不等的功率($a_{1j}=0.6$, $a_{2j}=0.4$), 所有可分离路径衰落系数相同。

表1 最大自由距离卷积码的参数

n	k	C_L	d_{free}	生成多项式(8进制)
2	1	7	10	133, 171
2	1	4	6	15, 17
3	1	4	10	13, 15, 17
4	1	3	10	5, 7, 7, 7
4	1	4	13	13, 15, 15, 17

表2 UMTS信道模型

信道模型	平均功率/dB	时延/ μs
室内 A	0, -10, -30	0, 0.24, 0.485
步行 A	0, -12.5, -25	0, 0.024, 0.485
车载 A	0, -1, -9, -10	0, 0.31, 0.71
	-15, -20	1.09, 1.73, 2.51

图1所示描述了不同衰落指数下, (2,2)系统采用两种相同码率($R_c=1/2$)不同约束长度卷积编码和未编码系统的误码性能。由图1可知, 编码系统比未编码系统有了很大的性能改善, 衰落系数越大, BER性能改善越显著。在相同码率下, 由于自由距离的影响, 误码随着卷积码约束长度的增加而得到改善, 译码的复杂性也相应地随着 C_L 以指数数量级增加。

图2所示比较了Nakagami衰落信道下(衰落系数 $m=0.5$), (1,1)、(2,1)和(2,2)系统采用三种相同约束长度($C_L=4$)不同码率卷积码的误码性能。由图2可知, 由于采用了接收分集, (2,2)系统的性能优于(2,1)系统, 并且在相同约束长度下, 码字随着码率的减小自由距离增大, 使系统的性能随着码率的减小而提高。

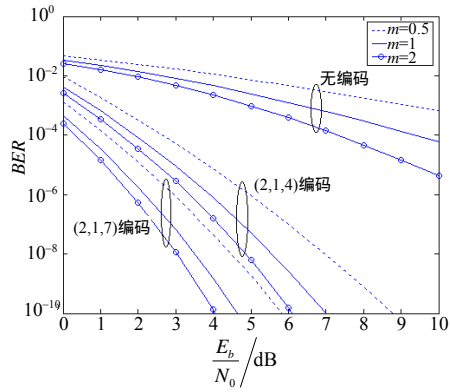


图1 采用两种相同码率卷积码的性能比较

图3所示比较了Nakagami衰落信道下(衰落参数 $m=0.5$), (1,2)和(2,2)系统采用三种相同自由距离($d_{\text{free}} = 10$)不同码率卷积码的误码性能。由此可见,具有相同自由距离、较高码率的码字能够提供较好误码性能,这是因为在成对差错概率的估算中较高码率的码字提供较大的 $\bar{\gamma}$ 。

4 结束语

本文推导了Nakagami- m 衰落信道上存在多址干扰以及发射端发射不等功率下, MIMO WCDMA系统采用组合分集和卷积编码方案的误码性能联合上限。研究了各种编码方案下空间分集接收机的性能,计算结果表明,在衰落环境下结合空间路径分集和编码能取得显著的性能改善。本文的分析结果适用于MIMO WCDMA系统的上下行链路。

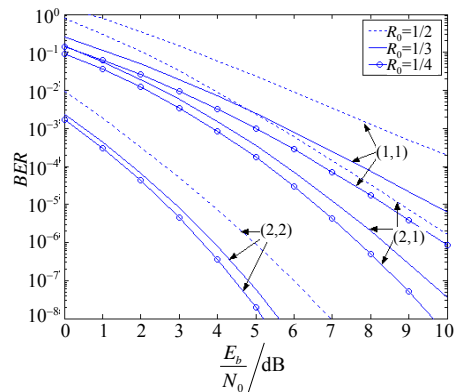


图2 采用三种相同约束长度卷积码的性能比较

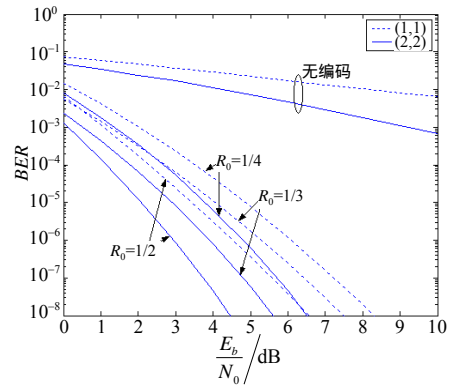


图3 采用三种相同自由距离卷积码的性能比较

参 考 文 献

- [1] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] Annamalai A, Tellambura C. Error rates of Nakagami- m fading multichannel reception of binary and M-ary signals[J]. IEEE Trans. Commun., 2001, 49(1): 58-68.
- [3] Vanganuru K, Annamalai A. Combined transmit and receive antenna diversity for WCDMA in multipath fading channels[J]. IEEE Commun. Lett., 2003, 7(8): 353-355.
- [4] Jianxia L, Zeidler J R, Proakis J G. Error probability performance for W-CDMA systems with multiple transmit and receive antennas in correlated Nakagami fading channels[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2002, 51(6): 1502-1516.
- [5] Conan J. The weight spectra of some short low-rate convolutional codes[J]. IEEE Trans. Commun., 1984, 32(9): 1050-1056.
- [6] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communication[J]. IEEE JSAC, 1998, 16(8): 1451-1458.

编辑 黄 莘