

平坦瑞利衰落环境下 CDMA 系统的多用户检测性能¹

聂景楠 程时昕 尤肖虎

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘 要 在采用传统信号检测方式的 CDMA 无线通信网中,多址干扰限制了系统的容量和性能。多用户信号检测利用扩频码互相关信息在高斯信道中可以减小或消除多址干扰,缓解远近效应,增加系统容量。本文将多用户检测器直接用于平坦瑞利衰落的 CDMA 环境中,用分析与仿真相结合的方法讨论了典型多用户算法的误码性能。结果表明,平坦瑞利衰落信道中多用户检测算法的性能仍然优于传统检测算法。

关键词 码分多址,瑞利衰落,多用户检测

中图分类号 TN929.5

1 引 言

在 CDMA 无线通信网中,多址干扰的处理方式将直接影响到系统的容量和性能,因而成为 CDMA 用于公众移动通信和个人通信时需要研究的一个关键问题。近年来研究的多用户联合信号检测算法为处理多址干扰提供了新的有效方法。Verdu 等设计了高斯信道中的最优多用户检测器^[1],并讨论了几种实现较容易但性能次优的折衷方案^[2-4]。S. Vasudevan 等根据 Verdu 的思想研究了莱斯信道中的多用户检测问题^[5]。对于频率选择性信道,文献^[6]将 Rake 接收机分离出的各径信息等效为多用户信息进行处理。本文将讨论多用户检测算法直接用于平坦瑞利衰落信道^[7,8]时的性能,在建议了一种分析与仿真相结合的计算方法的基础上,比较了几种典型多用户算法的误码性能。

2 系统模型

考虑同步 CDMA 系统的信号检测。这样做不仅分析简单,而且不难推广到异步系统^[1]。假定传输信道为平坦瑞利衰落信道,此信道模型适于单径衰落的宽带传输系统,如市郊的 CDMA 移动信道^[7,8]等。基于这样的环境,接收机收到的信号可表示为

$$r(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{E_k} b_k f_k a_k(t) + n(t). \quad (1)$$

N 为同时接入网络的用户数, E_k 为接收到用户 k 的比特能量, b_k 是用户 k 的信息比特, $a_k(t)$ 为用户 k 的归一化扩频信号, $f_k = \alpha_k \exp(j\theta_k)$ 为用户 k 受到的衰落影响,假定对于不同的 k , f_k 为独立的零均值复高斯变量, $n(t)$ 是双边谱密度为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声。对接收信号作相关接收:

$$Y = \int_0^{T_d} r(t) S dt = REB + U, \quad (2)$$

¹ 1995-11-10 收到, 1996-07-23 定稿
国家 863 通信高技术资助项目 (863-317-9603-07)

这里

$$\mathbf{Y}^T = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)], \quad \mathbf{S}^T = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)], \quad s_k(t) = a_k(t) \exp(-j\theta_k);$$

$$\mathbf{R}: [N \times N], \quad R_{mn} = \int_0^{T_d} a_m(t) a_n^*(t) dt;$$

$$\mathbf{E}: [N \times N], \quad E_{mn} = \sqrt{E_m} \delta_{m-n};$$

$$\mathbf{B}^T = [\alpha_1 b_1, \alpha_2 b_2, \dots, \alpha_N b_N],$$

$$\mathbf{U}^T = \left[\int_0^{T_d} n(t) s_1(t) dt, \int_0^{T_d} n(t) s_2(t) dt, \dots, \int_0^{T_d} n(t) s_N(t) dt \right].$$

其中 \mathbf{Y} 表示相关输出矢量, \mathbf{S} 为匹配滤波器组, \mathbf{R} 为扩频码集的互相关系数矩阵, \mathbf{E} 是能量矩阵, \mathbf{B} 为待恢复的等效数据矢量, \mathbf{U} 为相关器输出的噪声矢量, T 表示矩阵转置, $*$ 表示共轭, T_d 为信息码元宽度. 在相关接收的基础上, 考虑两种典型的检测算法:

(1) 线性多用户检测算法^[2,3] 这种算法的主要思想是对相关输出矢量作线性处理, 以此获得新的判决矢量. 对于线性变换 C , 可得到未作信道估计时的判决矢量:

$$\mathbf{X} = C\mathbf{Y} = C\mathbf{R}\mathbf{E}\mathbf{B} + C\mathbf{U} = \mathbf{H}\mathbf{B} + \mathbf{V}, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{H} = C\mathbf{R}\mathbf{E}$, \mathbf{V} 是零均值高斯随机矢量 ($\mathbf{V} = C\mathbf{U}$), 其协方差阵为 $(N_0/2)\mathbf{G}$, $\mathbf{G} = C\mathbf{R}C^T$. 在恒定参数信道中的信号检测如下:

$$\hat{\mathbf{b}} = \text{sgn}[\mathbf{X}]. \quad (4)$$

(2) 最大似然序列检测算法 根据相关输出矢量, 在 2^N 个可能发送的信息矢量中选出与之欧氏距离最小者. 这一过程可以由 Viterbi 译码器实现, 虽然其算法复杂度随用户数的增加呈指数增长, 目前还难以实用, 但在性能上可以作为一个参考尺度. 设其算法是通过相关接收器后加 Viterbi 译码器实现的, 根据文献 [2] 可得到检测算法的渐近效率:

$$\eta = \sup \left\{ 0 \leq r \leq 1; \lim_{\sigma \rightarrow 0} \left[P_e^{(k)}(\sigma) / Q(\sqrt{rE_k}/\sigma) \right] < \infty \right\}. \quad (5)$$

3 性能分析和计算

假定在所讨论的平坦瑞利衰落信道中, 信道参数可以正确估计出来 (篇幅所限, 这里只讨论正确估计信道参数时的系统性能). 由 (3) 式可得到线性多用户检测算法中用户 k 的判决变量:

$$z_k = x_k \hat{\alpha}_k = H_{kk} b_k \alpha_k^2 + \sum_{i \neq k}^N H_{ki} b_i \alpha_i \alpha_k + v_k \alpha_k, \quad (6)$$

其中 x_k , v_k , b_k 分别为 (3) 和 (4) 式中相应矢量 \mathbf{X} , \mathbf{V} 和 \mathbf{b} 的第 k 分量, H_{ki} 为矩阵 \mathbf{H} 的第 (k, i) 元素, $\hat{\alpha}_k$ 为估计得到的信道参数. 若 β 为对 b_k 形成干扰的其余 $N-1$ 个用户的 $N-1$ 维

矢量, E_β 表示 $\beta \in [-1, 1]^{N-1}$ 上的集平均, 则用户 k 的误码率:

$$\begin{aligned} P_e^{(k)}(C) &= \text{Prob}[\hat{b}_k = 1/b_k = -1] = \text{Prob}[z_k > 0/b_k = -1] \\ &= E_\beta \left[\text{Prob} \left(v_k \alpha_k > H_{kk} \alpha_k^2 - \sum_{i \neq k}^N H_{ki} b_i \alpha_i \alpha_k \right) \right] \\ &= 2^{1-N} \sum_{\beta \in [-1, 1]^{N-1}} Q \left[\left(H_{kk} \alpha_k^2 - \sum_{i \neq k}^N H_{ki} b_i \alpha_i \alpha_k \right) / \sqrt{\sigma^2 G_{kk} \alpha_k^2} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\text{Prob}[\cdot]$ 表示求概率, G_{kk} 为矩阵 G 的第 (k, k) 元素, $\sigma^2 = N_0/2$, $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$. 对于最大似然序列检测, 根据渐近效率的定义不难得到用户 k 的误码率:

$$P_e^{(k)}(\text{MLSD}) = Q(\sqrt{\eta E_k} \alpha_k / \sigma). \quad (8)$$

在平坦瑞利衰落信道中, α_k ($k = 1, 2, \dots, N$) 相互独立且服从瑞利分布, 因此 (7) 和 (8) 式只是 α_k 确定条件下的条件概率, 实际误码率 P_{ae} 可通过在 α_k 的联合概率密度上求期望值来计算. 在此本文给出一种更为简单的计算方法. 由于

$$P_{ae}^k = \int \int \dots \int P_e^k g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) d\alpha_1 d\alpha_2 \dots d\alpha_N, \quad (9)$$

$g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ 为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 的联合概率密度函数, 取下式作为 $P_{ae}^{(k)}$ 的估计:

$$\hat{P}_{ae}^{(k)} \approx \frac{1}{M_s} \sum_{i=1}^{M_s} P_e^{(k)}(i). \quad (10)$$

M_s 为随机实验的样本数, $P_e^{(k)}(i)$ 表示第 i 次随机实验计算的 $P_e^{(k)}$ 值, 根据强大数定理:

$$\text{Prob} \left[\lim_{M_s \rightarrow \infty} \hat{P}_{ae}^{(k)} = P_{ae}^{(k)} \right] = 1, \quad (11)$$

即当 M_s 充分大时, $\hat{P}_{ae}^{(k)}$ 以概率 1 接近 $P_{ae}^{(k)}$. 注意到 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 彼此是独立的, 满足 $g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) = g(\alpha_1)g(\alpha_2)\dots g(\alpha_N)$, $g(\alpha_k)$ 为 $g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ 的边缘分布概率密度. 因此每次随机实验都可独立地产生随机变量 α_k , 从而进行仿真计算.

依此对 (7), (8) 两式进行计算, 先模拟产生信道参数 α_k , 然后代入 (7)(8) 两式进行计算, 最后由 (10) 式作统计平均. 考虑两用户的 CDMA 系统, 在传统检测器中 C 是单位阵, 在解相关检测算法^[2]中 $C = R^{-1}$, R 如前定义. 选取仿真计算的次数 (样本数) $M_s = 10^6$, 这对于计算误码率小于 10^{-5} 时是准确的^[9]. 取瑞利随机变量的方差 $\sigma_f^2 = 2/\pi$. 为了便于比较, 分别计算了两用户互相关值为 $R_{12} = R_{21} = 0.3$ 和 $R_{12} = R_{21} = 0.7$ 时的两组性能, 在每一组中, 又对“远近效应”的影响 ($E_2/E_1 = 0\text{dB}$ 和 $E_2/E_1 = 9\text{dB}$) 作了比较, 得到用户 1 的误码性能曲线显示在图 1 中.

由图看出, (1) 在各种情况下, 解相关检测和最大似然检测算法都优于传统的检测算法, 这是因为前二者利用两用户扩频码的互相关信息对相关输出作了有益的处理, 而传统检测算法

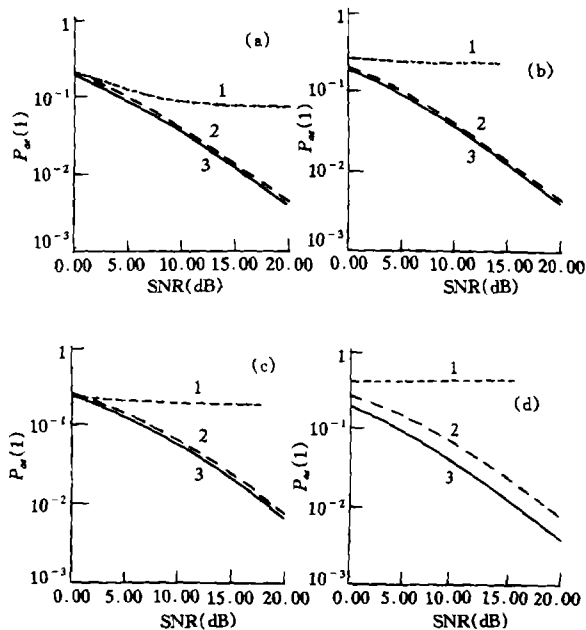


图1 传统检测算法(曲线1),解相关检测算法(曲线2)和最大似然序列检测算法(曲线3)在平坦瑞利衰落信道中的误码性能。

(a) $R_{12} = 0.3, E_2/E_1 = 0\text{dB}$; (b) $R_{12} = 0.3, E_2/E_1 = 9\text{dB}$;

(c) $R_{12} = 0.7, E_2/E_1 = 0\text{dB}$; (d) $R_{12} = 0.7, E_2/E_1 = 9\text{dB}$

中未经处理的互相关影响则是不同用户信号间相互干扰的根源。(2)对于传统检测算法,互相关系数数值越大,检测某一用户信号时受到另一用户信号的干扰就越大。 $E_2/E_1 = 0\text{dB}$ 时,两用户的信噪比是同时增加(减小)的,较大的互相关系数使得用户2的部分信号能量作为噪声加到了用户1的判决时刻,大大抵消了用户1信噪比增加带来的益处,因此曲线1看起来随信噪比增加变化不大($R_{12} = 0.7$ 的情况更劣于 $R_{12} = 0.3$)。(3)在“远近效应”影响下(无功率控制, $E_2/E_1 = 9\text{dB}$),用户1的信号几乎淹没在用户2通过互相关系数形成的噪声之中,传统的检测算法已无法正确恢复信号,而多用户检测算法减小了两用户信号间相关性^[1,2],缓解了相互干扰,克服了“远近效应”的影响。

4 结 论

本文讨论了多用户检测算法在平坦瑞利衰落信道中的性能,运用分析与仿真结合的方法对典型的多用户检测算法的误码性能进行了计算,指出在平坦瑞利衰落信道中,就误码率而言,解相关检测算法和最大似然检测算法仍然优于传统的检测算法,而且多用户检测算法的抗“远近效应”能力也不因信道的衰落而改变。本文的结论对进一步研究衰落信道中的多用户检测算法有积极的意义。

参 考 文 献

- [1] Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels. *IEEE Trans. on IT*, 1986, IT-32(1): 85-96.
- [2] Lupas R, Verdu S. Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channel. *IEEE Trans. on IT*, 1989, IT-35(1): 123-136.
- [3] Lupas R, Verdu S. Near-far resistance of multiuser detectors in asynchronous channels. *IEEE Trans on COM*, 1990, COM-38(4): 496-508.
- [4] Varanasi M K, Aazhang B. Near-optimum detection in synchronous code-division multiple access systems. *IEEE Trans on COM*, 1991, COM-39(5): 725-736.
- [5] Vasudevan S, Varanasi M K. Optimum diversity combiner based multiuser detection for time-dispersive Rician fading CDMA channels. *IEEE J. of SAC*, 1994, SAC-12(4): 580-591.
- [6] Wijayasuria S S H, McGeehan J P, Norton G H. RAKE decorrelating receiver for DS-SS-SS-SS mobile radio networks. *Electron. Lett.*, 1993, 29(4): 395-396.
- [7] Turin G. The effects of multipath and fading on the performance of direct sequence CDMA systems. *IEEE Trans. on VT*, 1984, VT-33(3): 213-219.
- [8] Lee W. Overview of cellular CDMA. *IEEE Trans. on VT*, 1991, VT-40(2): 291-302.
- [9] Jeruchim M C. Techniques for estimating the bit error rate in the simulation of digital communication systems. *IEEE J. of SAC*, 1984, SAC-2(1): 153-170.

PERFORMANCE OF MULTIUSER DETECTION FOR
CDMA SYSTEM IN FLAT RAYLEIGH FADING ENVIRONMENT

Nie Jingnan Cheng Shixin You Xiaohu

(National Mobile Communications Lab., Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract In a CDMA wireless communication network using the conventional signal detection, the capacity of the system is limited and the performance is degraded by the multi-access interference (MAI). The multiuser signal detection, which make use of cross-correlation information between two spread spectrum codes, can reduce or eliminate the MAI in a Gaussian channel so as to mitigate the near-far effects and increase the system capacity. This paper extends the multiuser detector to the flat Rayleigh fading CDMA environment and discusses the bit error rate of typical multiuser detection algorithms in such a environment by combining analysis and simulation. It is concluded that the multiuser detection is superior to conventional detections in the flat Rayleigh fading channels.

Key words CDMA, Rayleigh fading, Multiuser detection

聂景楠: 男, 1962 年生, 博士生, 现从事 CDMA 移动通信的研究.

程时昕: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 现从事数字移动通信与个人通信网理论与实现的研究.

尤肖虎: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 现从事智能信号处理及 CDMA 移动通信实现的研究.