

## DS-CDMA 系统中结合多用户检测的功率控制研究

刘水生 沈元隆

(南京邮电学院电子工程系 南京 210003)

**摘要:** 功率控制和多用户检测是 CDMA 移动通信中克服远近效应, 抑制多址干扰 (MAI) 的两项关键技术。该文提出了一种在 DS-CDMA 系统中综合考虑功率控制和多用户检测的方案。该方案能更加有效地消除干扰信号, 同时在满足信干比(SIR)要求时, 所有用户发射总功率最小, 收敛速度最快。

**关键词:** 功率控制, 多用户检测 (MUD), 串行干扰删除

中图分类号: TN914.5, TN911.23 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)01-0075-03

## The Research of Power Control Combined with Multiuser Detection in DS-CDMA System

Liu shui-sheng Shen Yuan-long

(Dept of Electronic Eng., Nanjing University of Posts & Telecom., Nanjing 210003, China)

**Abstract** Power control and multiuser detection are two ways to cope with Multiple Access Interference (MAI) and near-far effect. This paper proposed a new scheme for DS-CDMA system combined power control and multiuser detection. This scheme can effectively mitigate interference of other users, and minimize the total transmit power under the constraint that all the users achieve the requisition of Signal-to-Interference Ratio(SIR), also the convergence of the SIRs to the common target SIR rapidly.

**Key words** Power control, Multiuser detection, Successive interference cancellation

### 1 引言

众所周知, CDMA 系统是干扰受限系统<sup>[1]</sup>。由于分配给各用户的扩频序列不可能完全正交, 因此总是存在多址干扰 (MAI), 以及远近效应 (Far/Near), 这就大大的制约了 CDMA 系统容量<sup>[2]</sup>。通常用来解决此问题的技术有功率控制, 多用户检测 (MUD)<sup>[3-7]</sup>。

多用户检测有很多种类型, 总的来说可以分成两类: 线性多用户检测和非线性多用户检测。线性多用户检测如: 最小均方误差 (MMSE) 检测和解相关多用户检测。而非线性检测有如: 串行干扰删除 (SIC), 并行干扰删除 (PIC)。

功率控制是满足信干比要求的情况下, 控制每个用户的发射功率, 减少彼此之间的干扰, 提高系统容量。本文综合考虑了功率控制, 多用户检测技术, 目的是在满足信干比要求的基础上尽可能降低每个用户的发射功率。文献[6]提出了一种功率控制与 MMSE 检测相结合的方案。本文方案 (称 MMSE-PC-SIC) 是在此基础上再添加 SIC, 从而能进一步提高系统的性能, 减少发射功率。

本文的第 2 节给出了系统的模型。第 3 节 MMSE 和功率控制予以阐明。第 4 节给出了本文方案(MMSE-PC-SIC)实

现。第 5 节对传统功率控制 (C-PC), 文献 [6] 算法 (MMSE-PC) 以及本文的算法 (MMSE-PC-SIC) 的仿真性能比较。第 6 节结论。

### 2 系统模型

考虑有  $K$  个用户, 多小区同步 DS-CDMA 系统, 每个用户都分配给一个独一的特征波形, 假设处理增益为  $G$ 。采用 BPSK 调制, 天线阵元为  $N$ ,  $T_b$  为比特间隔,  $T_c$  为码片间隔,  $G = T_b / T_c$  为处理增益。  $h_j$  为第  $j$  个用户分配给基站的信道增益。对用户  $j$  的接受信号表示如下<sup>[6]</sup>:

$$r(t) = \sum_{j=1}^K \sqrt{p_j h_j} b_j s_j(t) + n(t) \quad (1)$$

其中  $p_j$  表示第  $j$  个用户发射的功率,  $s_j(t)$  表示分配给用户  $j$  的特征波形。  $b_j \in \{-1, 1\}$  表示第  $j$  个用户发射的比特数据;  $n(t)$  具有单位功率谱密度的加性高斯白噪声。

接收信号以码片速率抽样, 则通过第  $k$  滤波器的输出信号为

$$y_k = \sqrt{p_k h_k} (c_k^T s_k) b_k + \sum_{j \neq k} \sqrt{p_j h_j} (c_k^T s_j) b_j + z_k \quad (2)$$

$s_k$  是第  $k$  用户特征波形的向量表示,  $c_k$  是第  $k$  个滤波器系

数向量,  $z_k$  表示输出信号的高斯噪声。

### 3 功率控制和 MMSE

Yates 提出了标准干扰函数的定义<sup>[4]</sup>。标准干扰函数为如果干扰函数  $I(\mathbf{p})$  满足以下 3 个性质:

(1)非负性 (Positivity)  $I(\mathbf{p}) > 0$  ;

(2)单调性 (Monotonicity) 如果  $\mathbf{p} \geq \mathbf{p}'$  则  $I(\mathbf{p}) \geq I(\mathbf{p}')$  ;

(3)伸缩性 (Scalability) 对于  $\alpha > 1$  则有  $\alpha I(\mathbf{p}) \geq I(\alpha \mathbf{p})$  成立; 则称  $I(\mathbf{p})$  为标准干扰函数。

Yates 同时证明了以下定理:

定理 1 如果存在  $\mathbf{p}' \geq I(\mathbf{p}')$ , 对于任何初始的功率向量  $\mathbf{p}(0)$ , 迭代算法  $\mathbf{p}(n) \geq I(\mathbf{p}(n-1))$  收敛到一个唯一的点  $\mathbf{p}^*$ , 并且满足对任何  $\mathbf{p}' \geq I(\mathbf{p}')$ ,  $\mathbf{p}^* \leq \mathbf{p}'$ 。接收到第  $i$  个用户的信干比为

$$\text{SIR}_i = \frac{p_i h_{ii} (\mathbf{c}_i^T \mathbf{s}_i)^2}{\sum_{j \neq i} p_j h_{ij} (\mathbf{c}_i^T \mathbf{s}_j)^2 + \sigma^2 (\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i)} \quad (3)$$

假设每个用户所需要满足的信干比都是相同的, 且为  $\gamma$ , 则最优功率定义为求

$$\min \sum_{i=1}^K p_i \quad (4)$$

约束条件为

$$p_i \geq \frac{\gamma}{h_{ii}} \min_{\mathbf{c}_i} \frac{\sum_{j \neq i} p_j h_{ij} (\mathbf{c}_i^T \mathbf{s}_j)^2 + \sigma^2 (\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i)}{(\mathbf{c}_i^T \mathbf{s}_i)^2} \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, K.$$

定义

$$I_i(\mathbf{p}, \mathbf{c}_i) = \frac{\gamma}{h_{ii}} \frac{\sum_{j \neq i} p_j h_{ij} (\mathbf{c}_i^T \mathbf{s}_j)^2 + \sigma^2 (\mathbf{c}_i^T \mathbf{c}_i)}{(\mathbf{c}_i^T \mathbf{s}_i)^2} \quad (5)$$

$$T_i(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{c}_i} I_i(\mathbf{p}, \mathbf{c}_i) \quad (6)$$

其迭代功率算法为

$$\mathbf{p}(n+1) = T(\mathbf{p}(n)), \quad T(\mathbf{p}) = [T_1(\mathbf{p}), T_2(\mathbf{p}), \dots, T_N(\mathbf{p})]^T \quad (7)$$

$T(\mathbf{p})$  是一个标准干扰函数, 证明见文献[6]。其迭代功率公式包括 MMSE 滤波器系数更新方程表示如下:

$$\mathbf{c}_k[i] = \sqrt{p_k[i] h_k} / (1 + p_k[k] h_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{A}_k^{-1} \mathbf{s}_k) \quad (8)$$

$$p_k[i+1] = (\gamma / h_k) \left[ \sum_{j \neq k} p_j[i] h_j (\mathbf{c}_k^T[i] \mathbf{s}_j)^2 + \sigma^2 (\mathbf{c}_k^T[i] \mathbf{c}_k[i]) / (\mathbf{c}_k^T[i] \mathbf{s}_k)^2 \right] \quad (9)$$

其中  $\mathbf{A}_k = \sum_{j \neq k} p_j[i] h_j \mathbf{s}_j \mathbf{s}_j^T + \sigma^2 \mathbf{I}$ 。

其迭代算法分成两步: 第一步由式(8), 用初始功率  $\mathbf{p}(0)$  算出 MMSE 滤波器系数  $\mathbf{c}_i$ ; 第二步由式(9)和第一步得出

的滤波器系数  $\mathbf{c}_i$  调整其发射功率, 然后再根据调整的功率算出 MMSE 滤波器系数  $\mathbf{c}_2$ 。由于  $T(\mathbf{p})$  是一个标准干扰函数, 由上面定理 1 得出。经过若干次迭代后必然收敛到最小的发射功率  $\mathbf{p}^*$  和 MMSE 滤波器系数  $\mathbf{c}^*$ 。

### 4 本文方案(MMSE-PC-SIC)

本文的方案是先经过 MMSE-PC, 由前面的迭代算法式(8), (9), 得到最优的功率向量, 设  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]$  且其总的功率最小  $\sum_{i=1}^K p_i$ 。然后按照各用户的功率大小分成若干组, 每组中各用户的功率值大致相等, 假设将其分成 3 组 ( $G_1, G_2, G_3$ ), 如图 1 所示:

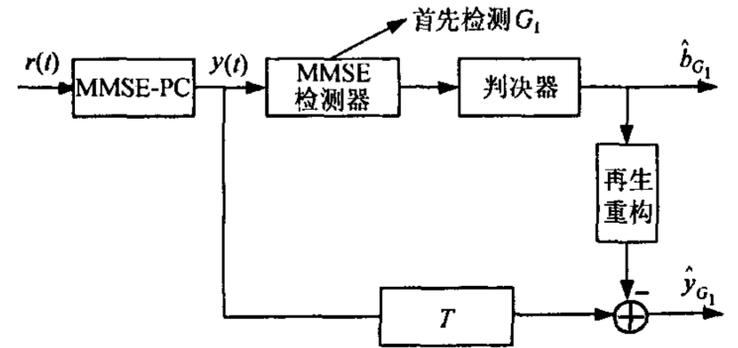


图 1 本文方案(MMSE-PC-SIC)

假设按照功率从大到小顺序排列 ( $G_1, G_2, G_3$ ), 先检测最强功率中  $G_1$  的用户, 经过 MMSE 检测器和判决器, 得出属于  $G_1$  中各用户的判决:

$$\hat{b}_{k_1} = \text{sgn}[(M_{\text{MMSE}} y(t))_{k_1}], \quad k_1 \in G_1 \quad (10)$$

其中  $M_{\text{MMSE}}$  由 MMSE 滤波器决定。

然后解调出次最强功率( $G_2$ )的用户数据, 从总的接收信号中减去重构的干扰信号 ( $G_1$  中各用户的看作是干扰信号), 即

$$\hat{y}_{G_1} = y(t) - \sum_{j \in G_1} \sqrt{p_j h_j} (\mathbf{c}_k^T \mathbf{s}_j) \hat{b}_j \quad (11)$$

由  $\hat{y}_{G_1}$  再利用式(10)判决得出  $G_2$  中各用户信号, 即

$$\hat{b}_{k_2} = \text{sgn}[(M_{\text{MMSE}} \hat{y}_{G_1})_{k_2}], \quad k_2 \in G_2 \quad (12)$$

同理利用  $G_2$  和式(11)得到

$$\hat{y}_{G_2} = \hat{y}_{G_1} - \sum_{j \in G_2} \sqrt{p_j h_j} (\mathbf{c}_k^T \mathbf{s}_j) \hat{b}_j \quad (13)$$

再从中解调出  $G_3$  中各用户的信号, 即

$$\hat{b}_{k_3} = \text{sgn}[(M_{\text{MMSE}} \hat{y}_{G_2})_{k_3}], \quad k_3 \in G_3 \quad (14)$$

分析本方案的基本思想: 由于在串行干扰删除之前, 进行了功率控制的迭代运算, 在满足目标信干比条件下减少了各用户的发射功率, 且系统总发射功率也最小, 所以减少了各用户间干扰。由于按照其功率大小进行分组, 使得具有相同功率且功率最大的用户首先解调, 通过干扰删除, 也进一步减

少了强信号对弱信号的干扰作用。而且, 由于分组使得进行干扰删除运算次数大大减少, 计算量明显减少, 同时进一步克服了串行干扰处理时延大的缺点。

## 5 计算机仿真分析

在仿真实验中, 为了简化, 我们考虑固定基站排列的情况, 采用  $3 \times 3$  排列的 9 个小区 CDMA 系统。并假设对每个用户要满足要求的信干比相同, 为  $SIR = 5(7\text{dB})$ , 处理增益为 10, 随机选出码长为 31 的 Gold 序列作为扩频码。采用均匀直线阵, 天线阵阵元数  $N=2$ , 间隔半波长。

为了对比分析本算法的性能, 对以下 3 种算法进行比较:

(1) 传统功率控制 (C-PC)。单天线接收后经过匹配滤波<sup>[5]</sup>。

(2) 功率控制和多用户检测 (MMSE-PC)。单天线接收后经过 MMSE 接收机<sup>[6]</sup>。

(3) 功率控制和 MMSE 和 SIC (MMSE-PC-SIC)。本文的方案。首先经过 MMSE 接收后, 然后再经过串行干扰删除。

图 2 给出了用户数为 12, 天线阵元为 2, 处理增益  $G=10$  时不同算法的总发射功率的比较。

可以看出 C-PC 总的发射功率最大, 而本文方案总的发射功率最小且约比 C-PC 小 7.0dB, MMSE-PC 次之。随着用户数的增加, 比如用户数为 60, 用户数超过了 C-PC 的最大支持的数目, C-PC 变得不可行, 比较 MMSE-PC 和 MMSE-PC-SIC, 仍得出 MMSE-PC-SIC 总的发射功率最小。图 3 是只考虑第 12 个用户 SIR 的收敛情况, 及比较其收敛

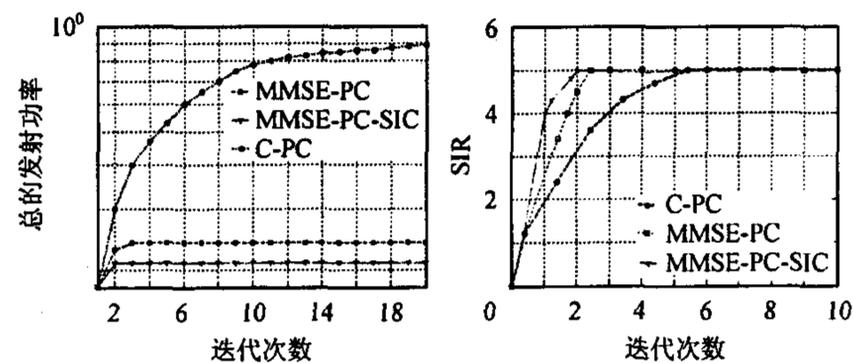


图 2  $K=12, N=2$  时不同算法的总发射功率

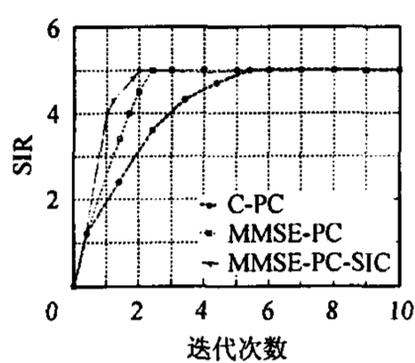


图 3 目标  $SIR=5(7\text{dB})$  时收敛性情况

到目标  $SIR=5(7\text{dB})$  的迭代次数。由图看出, C-PC 要迭代 5 次后, 才能收敛到目标  $SIR=5(7\text{dB})$ 。而本文方案 (MMSE-PC-SIC) 在迭代 2 次后就收敛到目标  $SIR=5(7\text{dB})$ , 可见其收敛速度最快。

## 6 结论

本文提出了一种在 DS-CDMA 系统中综合考虑功率控制和多用户检测的方案。充分考虑了功率控制, MMSE 接收机以及串行干扰删除各自的优点, 弥补了各自的不足的地方。并且对 C-PC, MMSE-PC, MMSE-PC-SIC 3 种算法进行比较。本文提出的 MMSE-PC-SIC 发射总功率最小且收敛速度最快。

## 参考文献

- [1] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 420 - 482.
- [2] Proakis J G 著, 张力军, 张宗橙, 郑宝玉译. 数字通信(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 404 - 436.
- [3] Varanasi M K, Das D. Fast stochastic power control algorithms for nonlinear multiuser receivers[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(11): 1817 - 1827.
- [4] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems [J]. *IEEE J. on Selected Areas in Communication*, 1995, 13(7): 1341 - 1347.
- [5] Zander J. Distributed cochannel interference control in cellular radio systems [J]. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1992, 41(3): 305 - 311.
- [6] Ulukus S, Yates R D. Adaptive power control and MMSE interference suppression[J]. *Wireless Networks*, 1998, 4(6): 489 - 496.
- [7] Agrawal A, Andrews J, Cioffi J, Meng T. Power control for successive interference cancellation with imperfect cancellation [J]. *IEEE ICC*, New York, May 2002: 356 - 360.

刘水生: 男, 1977 年生, 硕士, 目前主要研究方向是通信网络的可靠性分析。

沈元隆: 男, 1946 年生, 教授, 目前主要从事系统可靠性、图论及其应用以及电路理论的教学与科研工作。