

用于 WCDMA 系统的 MMSE 接收机的功率与 数据速率相结合的分配算法

刘家彬 朱世华 李文元

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘要: 该文针对 3GPP WCDMA 系统的反向链路, 提出了一种基于 MMSE 接收机的功率和数据速率相结合的控制算法。该算法可以保证用户在达到目标信干比的同时, 减小平均发射功率、加快收敛速度, 从而提高系统的整体性能。仿真结果验证了所提出方案的正确性和优化算法的有效性。采用该文提出的算法, 与 MMSE 功率控制算法比较, 系统容量可增加近 10%, 而收敛速度可提高 30% 左右。

关键词: 功率控制, 数据速率, 宽带码分多址, 移动通信, MMSE 多用户接收机

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)04-0584-04

A Joint Power and Rate Allocation Scheme for MMSE Receiver in WCDMA Systems

Liu Jia-bin Zhu Shi-hua Li Wen-yuan

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract A combined power control and data rate adjustment scheme with Minimum Mean Square Error (MMSE) receiver for the 3GPP Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) reverse link is proposed. It can guarantee target SIR while keeps transmit power at the minimum level and faster convergence, resulting an optimal overall system performance. Computer simulation shows that the proposed scheme is appropriate and the optimization algorithm is effective and correct. Simulation results show that, using the proposed algorithm, the capacity of system is increased by about 10% and the speed of convergence is sped up by about 30 % compared with those obtained using MMSE power control algorithm.

Key words Power control, Data rate, WCDMA, Mobile communications, MMSE multi-user receiver

1 引言

制约码分多址 (CDMA) 移动通信系统容量和性能的主要因素有“远近效应”和多址干扰 (MAI)^[1]。因此, 任何减少干扰的措施都有利于系统容量的提高。多用户接收机作为减轻“远近效应”和 MAI 的手段之一, 受到人们多年的重视, 目前已经研究出多种形式。其中, 最小均方误差 (MMSE) 多用户接收机由于可以自适应地改变滤波器系数并且实现复杂度相对较小, 被认为是一种较理想的多用户检测器^[2]。

功率控制是 CDMA 移动通信系统抵抗干扰、提高系统容量的另一个有效手段^[3, 4]。其主要目的是在满足各用户服务质量要求 (QoS) 的前提下, 使系统总发射功率最小。在文献[5]中, Yates 首次提出了标准干扰函数的概念。

他指出, 任何功率控制算法 (PCA), 在系统可行的前提下, 只要干扰函数是标准的, 都可以收敛到唯一的最小功率解。这为我们构造新的 PCA 提供了一个基本框架, 简单而有效。

当信道处于深衰落状态, 发射功率必须足够大才能抵消衰落的影响, 这势必对其他用户造成更大的干扰, 不利于系统容量的最大化。对于数据业务, 我们可以将发射功率固定在某个适当的水平, 通过调节数据发射速率来满足各用户的 QoS 要求^[6, 7]。

实际中, 综合上述 3 种手段, 发挥各自抗干扰特点、最大化系统容量 (总发射功率最小) 是可能的。本文就这方面的研究做了尝试。

本文建立了采用 MMSE 接收机时的功率控制系统模型, 并提出了基于 MMSE 的功率控制算法。由于与均方

误差存在一定关系的干扰函数是标准的,因此,本文所提算法是收敛的。考虑到信道衰落的影响,在所提出的MMSE功率控制算法的基础上引入了数据速率调节机制,进一步降低干扰,从而增加系统容量。仿真结果表明,采用本文提出的算法,与MMSE功率算法比较,系统容量增加了近10%,而收敛速度提高了30%左右。

2 系统模型及其描述

考虑一同步WCDMA多媒体蜂窝移动通信系统,有 M 个移动用户可以与 B 个基站之一进行通信,扩频带宽为 W Hz。移动用户按最小路径损耗的原则选取基站。本文以上行链路为例进行讨论,分析的结果不难推广应用于下行链路。

基站接收机前端收到的信号(一个信息比特周期 T_b 内)在 G 维信号空间中可表示为

$$r = \sum_{j=1}^M \sqrt{p_j} \sqrt{h_j} d_j s_j + n \quad (1)$$

式中 r , s_j 和 n 都是 G 维矢量,分别代表总接收信号,第 j 个用户的特征序列,加性白高斯噪声(AWGN); $G = T_b W$,为扩频增益; p_j , d_j 分别是用户 j 的发射功率和数据信息比特。本文按惯例假设 $\langle s_i, s_j \rangle = \delta_{ij}$, $E[n] = 0$ 和 $E[nn^T] = \sigma^2 I$ 。 h_j 是用户 j 与基站之间的链路增益,它与路径损耗、阴影慢衰落和瑞利快衰落有关。如果假设在信息比特周期 T_b 内瑞利快衰落的均值不变,则 h_j 可表示为^[7]

$$h_j = \kappa \cdot r_j^{-\beta} \cdot 10^{\xi/10} \quad (2)$$

其中 κ 是某个常数(路径损耗中值), r_j 是用户 j 至基站的距离, β 是路径衰减指数(一般取4), ξ 是零均值,标准差为 σ_ξ (dB)的高斯随机变量。这样, h_j 的概率密度函数为^[8]

$$f_{h_j}(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_h \cdot h} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln h - \ln L_j)^2}{2\sigma_h^2}\right] \quad (3)$$

这里, $L_j = \kappa \cdot r_j^{-\beta}$, $\sigma_h = \sigma_\xi \ln(10)/10$ 。

设 c_j 是第 j 个用户MMSE接收机滤波器系数,则滤波器输出第 j 个用户的每比特能量与干扰功率谱密度之比为^[9-11]

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_j = \frac{p_j h_j (c_j^T s_j)^2 W / R_j}{\sum_{i \neq j} p_i h_i (c_j^T s_i)^2 + \sigma^2 (c_j^T c_j)} \quad (4)$$

其中 R_j 是用户 j 的发射数据速率(bit/s)。根据文献[2]的推导,MMSE接收机滤波器系数如下:

$$c_j = \frac{\sqrt{p_j}}{1 + p_j s_j^T A_j^{-1} s_j} A_j^{-1} s_j \quad (5)$$

它使式(4)最大。这里, $A_j = \sum_{i \neq j} p_i h_i s_i s_i^T + \sigma^2 I$ 。而均方误差为^[2]

$$e_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_j \frac{R_j}{W}} \quad (6)$$

我们的目的是根据信道衰落情况,决定 p_j , c_j 和 R_j ,使系统在满足各用户QoS要求的前提下,总发射功率(或总接收功率)最小。

3 MMSE功率和数据速率分配算法

文献[5]中给出的传统功率控制算法为

$$p(n+1) = T[p(n)] = \frac{\gamma^*}{\gamma(n)} p(n) \quad (7)$$

其中 $p(n)$ 是用户发射功率矢量, γ^* 是目标SIR, $\gamma(n)$ 是当前SIR, $T[\cdot]$ 是干扰函数, n 是迭代步骤。

采用MMSE接收机时,干扰函数 $T_{\text{mmse}}[\cdot]$ 应是均方误差矢量 e 的函数。将式(6)代入式(7),并经简单推导化简,可以得出MMSE功率控制算法:

$$p(n+1) = T_{\text{mmse}}[p(n)] = \frac{1 - e^*}{1 - e(n)} p(n) \quad (8)$$

类似于文献[5],可以证明 $T_{\text{mmse}}[\cdot]$ 是标准的,因此算法收敛。

实际中如果无线链路损耗太大(链路增益 h_j 太小),为了满足用户的QoS要求,必须提高发射功率,这势必增加对其他用户的干扰,使系统容量(服务的用户数)下降。为此,我们提出了分布式MMSE功率和数据速率分配算法,其流程图如图1所示。图中的 h_{j0} 和 p_{j0} 是系统预设值,一般由实验确定^[7]。

算法的最大特点是根据链路增益变化情况,来决定调节功率还是调节数据速率或者两者都调。该算法特别适用于多媒体通信环境,业务种类越多算法效率越高。

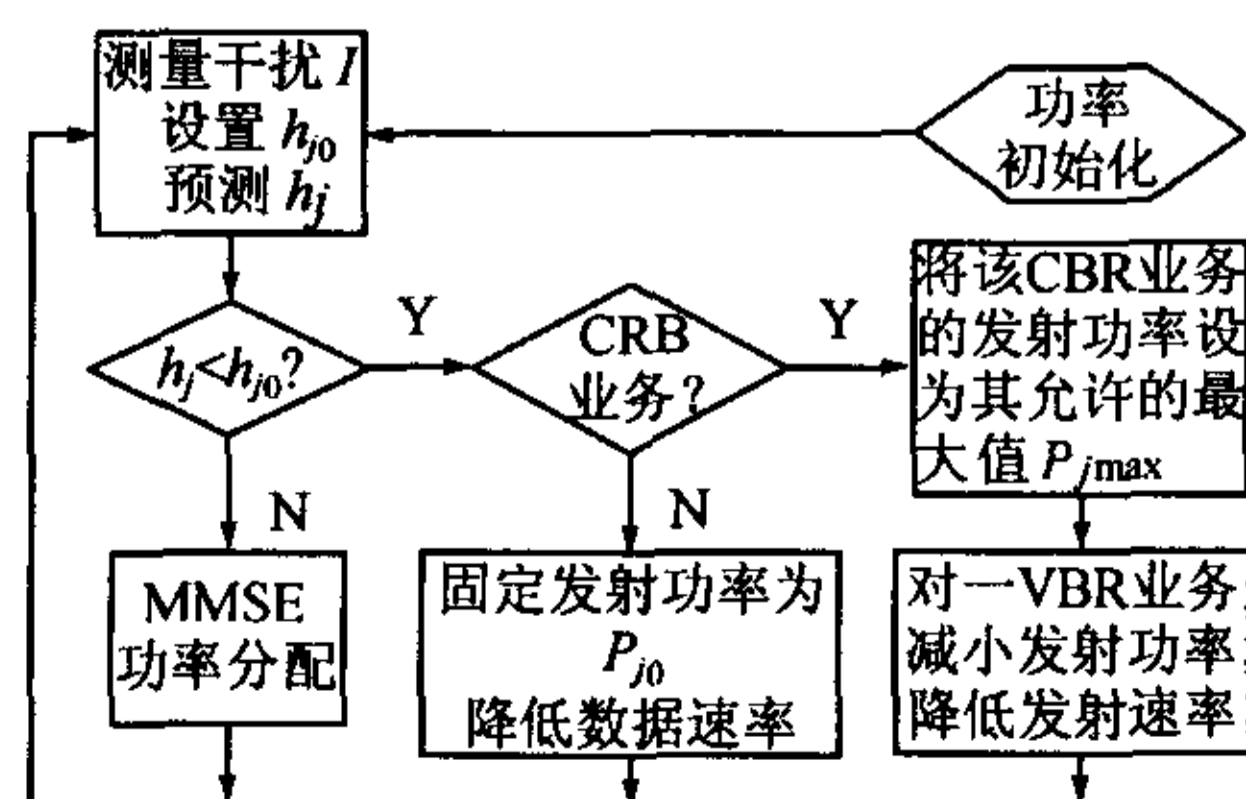


图1 MMSE功率和数据速率分配算法流程图

当 $h_j < h_{j0}$ 时, 说明通信链路损耗较大。对于固定数据速率 (CBR) 业务 (比如语音), 由于数据速率不可调, 发射功率又达到最大值, 根据当前的干扰情况, 算法利用散列函数^[12]选择一个可变数据速率 (VBR) 业务做如下处理: (1)同时降低发射功率和数据速率; (2)暂时中断发射 (Email 等业务), 从而减小干扰, 最大限度地保证 CBR 业务的正常通信, 否则将发生掉话。对于 VBR 业务, 可以固定发射功率为 p_{j0} ^[7]、降低发射数据速率。如果速率降到其允许的最小极限还不能满足该业务的 QoS 要求, 则停止发射数据。

当 $h_j \geq h_{j0}$ 时, 说明通信链路损耗较小, 如果系统是可行的, 则各业务可以其最大数据速率传输。因此, 算法只进行 MMSE 功率控制, 不调节发射数据速率。

文献[7]证明了当路径损耗如式(2)所示时, 为了满足各用户的 QoS 要求, 通过调节发射功率或发射数据速率, 用户 j 的平均发射功率 p_{jT} 为

$$p_{jT} = E[p_j] = p_{j0} \int_0^{h_{j0}} f_{h_j}(h) dh + p_{jR} \int_{h_{j0}}^{\infty} \frac{f_{h_j}(h)}{h} dh, \quad j=1, 2, \dots, M \quad (9)$$

其中 $p_{jR} = h_{j0} p_{j\max}$, 是链路增益为 h_{j0} 、发射功率为最大值 $p_{j\max}$ 时的接收功率。从式 (9) 可以看出, 同时调节功率和数据速率时的平均发射功率小于只调节发射功率时的平均发射功率 (相当于 $h_{j0}=0$), 因而减少了干扰, 有利于系统容量的提高。仿真结果证实了这一结论。

MMSE 功率控制包括以下步骤: (1)利用式(5)计算滤波器系数; (2)利用式(6)计算均方误差; (3)利用式(8)进行功率分配。有关发射数据速率的调节细节请参考文献[7]。

像所有其它功率控制算法一样, 本文提出的算法也必须与呼叫准入控制算法配合使用才能使系统更加稳定、可靠和高效。

4 仿真结果

考虑 19 个正六边形蜂窝小区。假设基站位于小区中心, 移动台在各小区内均匀分布。仿真用参数如下: 扩频带宽 $W=3.84\text{MHz}$, 基站背景噪声密度 $N_0=-169\text{dBm/Hz}$, 路径损耗指数 $\beta=4$, 高斯随机变量 ξ 的标准差 $\sigma_\xi=8\text{dB}$, 语音用户的发射数据速率固定为 9.6kbps , 数据用户的速率在 $0\sim 153.6\text{kbps}$ 之间按 2 的倍数可变。为方便起见, 设所有用户的目标 $E_b/I_0=6\text{dB}$, 这样一个高速数据用户可以等效为若干个语音用户, 系统所能支持的总用户数 M 也就是最多语音用户数。

我们比较了传统功率控制算法^[5]、MMSE 功率控制算法^[11]和本文提出的算法, 主要考察平均发射功率和收敛速度。每个移动台的平均发射功率 (相对于语音业务)

如图 2 所示。当系统负载较重时, 由于干扰和噪声的影响, 采用传统的功率控制算法系统是不可行的。但采用 MMSE 功率控制算法和本文提出的算法时, 系统却是可行的见(图(2a))。由图(2b)可以看出, 在负载因子为 60% 时, 本文提出算法的平均发射功率分别比 MMSE 功率控制算法和传统功率控制算法小 10%和 23%左右, 因此系统容量可分别提高约 10%和 23%。

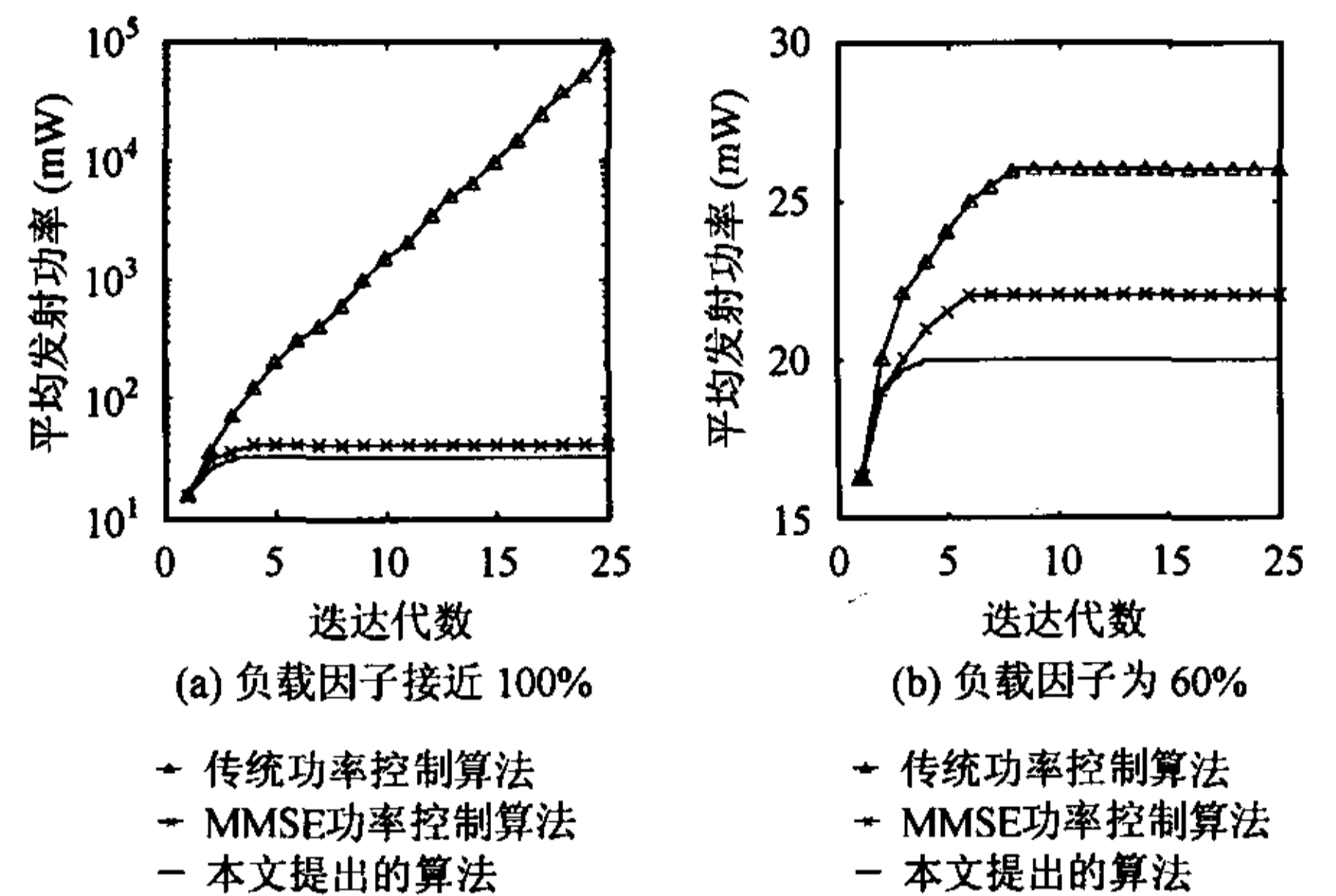


图 2 各种算法平均发射功率比较

由于结合了数据速率调节, 所以每当降低发射速率, 相当于减少了若干干扰源, 再加上 MMSE 接收机对噪声和干扰的抑制作用, 极大地缓解了功率控制中的相互攀比现象, 故收敛速度较快。而传统功率控制算法存在功率攀比现象, 收敛速度较慢, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 本文提出算法的收敛速度分别比 MMSE 功率控制算法和传统功率控制算法提高了 30%和 43%左右。

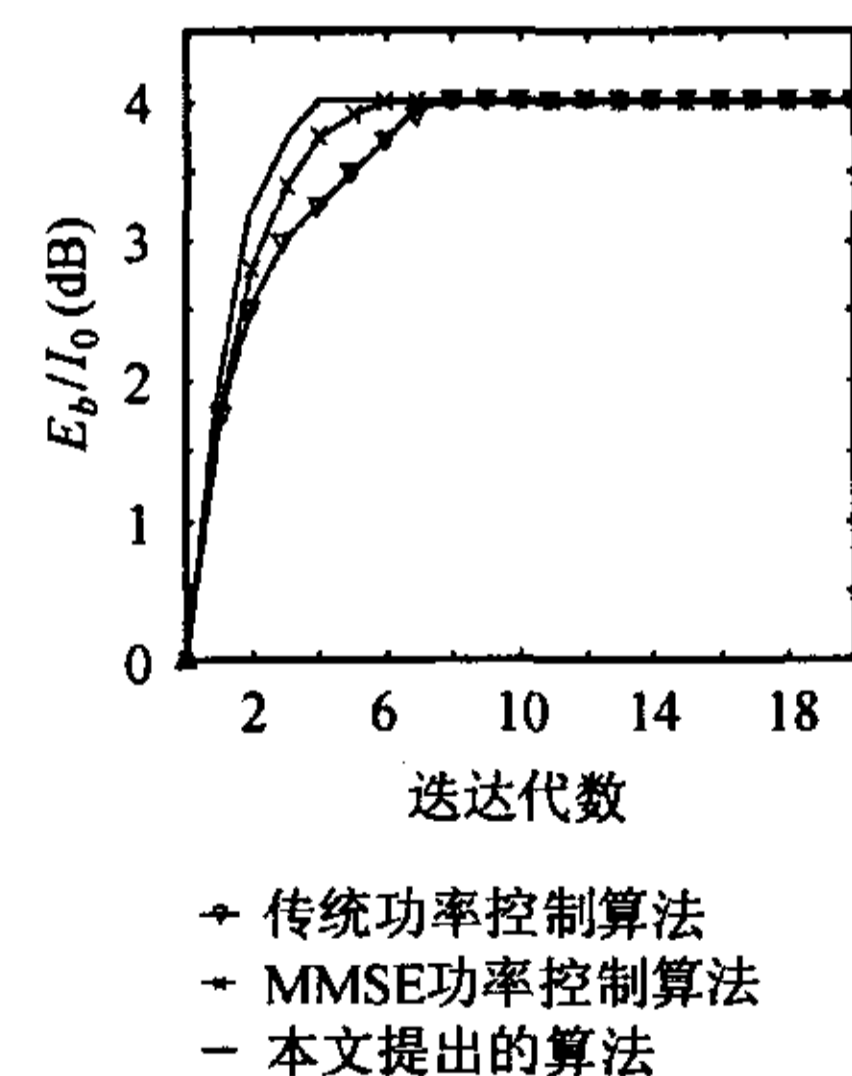


图 3 各种算法平均收敛速度比较 (负载因子为 60%)

5 结论

本文主要讨论了多媒体 WCDMA 移动通信系统上行链路采用 MMSE 多用户接收机时的功率控制和数据速率调节的问题。对于 CBR 业务主要倾向于 MMSE 功率控制; 而对于非实时数据业务 (比如, 文件传输、电子邮件等), 根据信道衰落情况再结合发射数据速率的调节, 可以更加有效地降低平均发射功率, 从而减少不必

要的干扰、增加系统容量,也加快了收敛速度。仿真结果表明,采用本文提出的算法,与 MMSE 功率控制算法比较,系统容量增加了近 10%,而收敛速度提高了 30% 左右,从而验证了理论推导的正确性。今后的研究可以结合空时编码等技术,进一步提高多媒体系统的整体性能。

参 考 文 献

- [1] Gilhousen K S, Jacobs I M, Padovani R, *et al.*. On the capacity of a cellular CDMA system. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1991, 40(2): 303 – 311.
- [2] Madhow U, Honig M L. MMSE interference suppression for direct-sequence spread-spectrum CDMA. *IEEE Trans. on Commun.*, 1994, 42(12): 3178 – 3188.
- [3] Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio system. *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, 1992, 41(1): 57 – 62.
- [4] Herdtner J D, Chong E K P. Analysis of a class of distributed asynchronous power control algorithms for cellular wireless systems. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 2000, 18(3): 436 – 446.
- [5] Yates R D. A framework for uplink power control in cellular radio systems. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1995, 13(7): 1341 – 1348.
- [6] Kim S W, Lee Y H. Combined rate and power adaptation in DS/CDMA communications over Nakagami fading channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 2000, 48(1): 162 – 168.
- [7] Liu Jiabin, Zhu Shihua, Li Wenyuan. A combined rate and power control scheme and its impact on the capacity of multimedia DS-CDMA systems. in Proc. of International Conferences on Info-tech and Info-net, IEEE ICII'2001, Beijing, Oct. 2001, vol.2: 156 – 161.
- [8] Simon M K, Alouini M S. Digital Communication over Fading Channels——A Unified Approach to Performance Analysis. New York, John Wiley and Sons, Inc., 2000: 18 – 23.
- [9] Ulukus S, Yates R. Adaptive power control and mmse interference suppression. *Wireless Networks*, 1999, 4(6): 489 – 496.
- [10] Kumar P S, Holtzman J. Power control for a spread spectrum system with multiuser receivers. *IEEE PIMRC'95*, Toronto, Ont., Canada, 1995: 955 – 959.
- [11] Liu Y, Wong T F. Power control algorithms for MMSE receivers in CDMA systems. in Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall'02), Vancouver, Canada, Sep. 2002, vol. 3: 1749 – 1753.
- [12] Lee J S, Miller L E. 许希斌, 周世东, 等. CDMA 系统工程手册. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 254 – 259.

刘家彬: 男, 1961 年生, 北京石油化工学院副教授, 博士生, 研究领域为下一代移动通信功率控制技术以及容量方面的研究。

朱世华: 男, 1950 年生, 西安交通大学电信学院院长, 教授, 博士生导师, 长期从事数字通信系统、移动通信和个人通信系统的研究工作。

李文元: 男, 1964 年生, 博士生, 研究领域为下一代移动通信系统的多用户检测方面的研究。