

衰落环境中功率控制对 W-CDMA 系统性能的影响¹

邱 玲 朱近康 姜 明

(中国科技大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

摘 要 功率控制是码分多址 (CDMA) 移动通信系统中克服“远近效应”问题, 减小小区间干扰, 提高系统容量的有效方法, 同时, 功率控制可以使 W-CDMA 系统中的不同业务达到不同的服务质量要求, 但在衰落环境中, 功率控制很难做到完善, 在这篇文章中, 作者模拟了 W-CDMA 系统在衰落环境中功率控制步长的选取对功率控制补偿无线信道衰落的影响, 分析了功率控制对 W-CDMA 系统性能的影响, 给出了数字计算结果, 这些结果有利于进行 W-CDMA 系统设计。

关键词 W-CDMA, 性能分析, 功率控制

中图分类号 TN914.4

1 引 言

未来无线移动通信系统将支持语音、数据、图像和视频等多媒体业务, 由于 W-CDMA 通信系统具有大的系统容量、好的抗多径和抗干扰能力, 可以方便地支持多媒体业务传输等特性, 成为第三代移动通信的主要技术。

CDMA 移动通信系统是干扰受限系统, 降低干扰可以直接增加系统的容量。功率控制是采用相关技术的 CDMA 接收机中降低干扰、提高系统容量的必要方法, 同时, 功率控制用于 W-CDMA 系统, 还可以使不同业务达到不同的服务质量要求, 但由于多媒体业务有不同的传输速率和不同的服务质量要求, W-CDMA 移动通信系统中的功率控制将不同于单一业务系统中的功率控制, 因此, 功率控制对系统容量的影响也将不同, 早期的文献 [1-3] 分析功率控制对系统容量影响都是考虑单一业务的系统, 近来的文献 [4, 5] 分析了多业务 CDMA 系统的容量, 但他们没有考虑功率控制的影响, 实际上, 在衰落环境中, 受功率控制算法、控制速度、控制步长等因素的限制, 功率控制很难完全补偿无线信道的衰落, 在这篇文章中, 我们模拟了 W-CDMA 系统在衰落环境中功率控制步长对系统克服信道衰落的影响, 给出了对应于不同移动速度时的功率控制步长的优化规则, 分析了不完善功率控制对 W-CDMA 系统容量的影响, 给出了数字计算结果

2 W-CDMA 系统中功率控制对接收信号功率的影响

在 W-CDMA 移动通信系统中, 不同业务有不同的传输速率和不同服务质量的要求, 我们把多媒体信息按不同服务质量的要求分成不同的子业务进行传输^[6], 并对每种子业务根据其接收端测量得到的比特能量与干扰功率比值进行闭环功率控制, 用公式 (1) 表示如下, 其周期为 (2/3)ms。

$$P_i(t+1) = P_i(t) - \Delta P \cdot C(\Gamma - \gamma) \quad (1)$$

式中 Γ 为接收端测量得到的比特能量与干扰功率比值, γ 为门限比特能量与干扰功率比值, $C(\Gamma - \gamma)$ 为 +1 或 -1 的功率控制命令, ΔP 是功率控制步长。

¹ 1999-10-25 收到, 2000-03-23 定稿
863 计划资助项目 (863-317-03-01-01-99)

在衰落环境之中, 接收机接收到的信号功率是与传播距离、阴影和多径衰落有关的随机变量 [7],

$$P_r = C \cdot S(t) \cdot 10^{\xi/10} \cdot d^{-\alpha} \cdot P_t \quad (2)$$

其中 P_r 为接收信号功率, P_t 为发射信号功率, C 是常数, $S(t)$ 是快衰落 (这里假设为 Rayleigh 衰落) 造成的接收信号功率波动, $10^{\xi/10}$ 表示阴影衰落, d 是移动台与基站之间的距离, $d^{-\alpha}$ 表示由传播距离引起的损耗。

我们用计算机模拟了 W-CDMA 移动通信系统在衰落环境中闭环功率控制的控制步长的选择对系统克服衰落的影响。模拟中假设载波频率为 1.8GHz, ξ 是均值为零, 标准差为 6dB 的高斯变量。接收端采用相关最大比合并技术, 合并的多径数为 4, 模拟时忽略扩频码对多址干扰的影响。

模拟结果显示, 经过反馈式功率控制后, 接收信号功率是服从对数正态分布的随机变量, 其均值为 $m = \exp(\mu + \sigma^2/2)$, 方差为 $D^2 = \exp(2\mu + \sigma^2) \cdot [\exp(\sigma^2) - 1]$, μ 和 σ 分别为与此对数正态分布相对应的正态分布的均值和标准差。在 W-CDMA 系统中, 功率控制速度是一定的, 但控制步长是可变的, 为了能正确选择合适的步长, 我们模拟了移动台以不同速度移动时, 不同衰落环境中功率控制步长对功率控制误差 (σ) 的影响, 如图 1、2 所示。

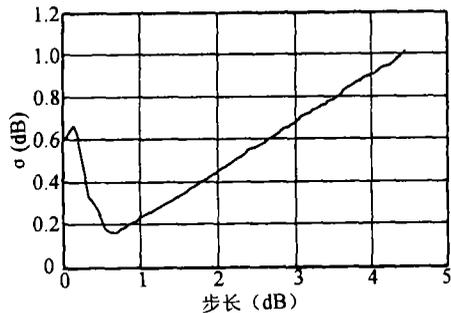


图 1 仅考虑慢衰落影响时步长的选取

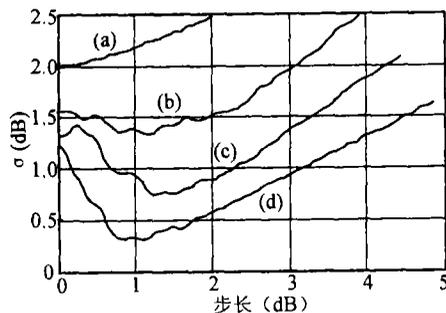
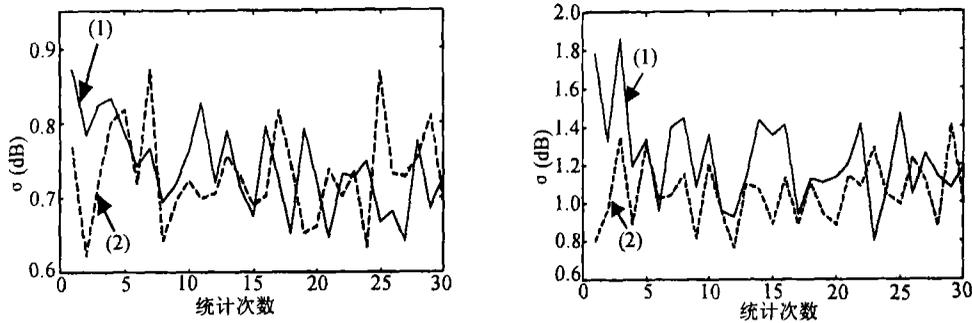


图 2 仅考虑快衰落影响时步长的选取, 移动速度:
(a) 240km/h, (b) 120km/h
(c) 80km/h, (d) 30km/h

从图 1 可知, 在不考虑快衰落时, 通过正确选择步长, 闭环功率控制可以比较有效地补偿无线信道衰减。图 2 表明, 当移动台移动速度不太高时, 在采用合适步长时, 功率控制能够比较好地克服多径衰落, 此时, 控制步长随移动台速度增大而增大, 而当移动台移动速度很快时, 受功率控制速度等因素的影响, 功率控制克服多径衰落的效果不好, 从模拟结果看, 此时, 应选择小的步长, 这是因为此时功率控制速度已经跟不上衰落变化, 大的控制步长只能加大控制误差。图 3(a) 显示, 在步长合适时, 对于仅考虑快衰落和同时考虑快衰落和慢衰落两种情形, 虽然两者功率控制误差曲线 (σ) 不同, 但互有大小, 其平均值大小基本相同, 这说明, 如果功率控制步长选取的合适, 慢衰落的影响可以忽略, 而如果步长取得不合适, 慢衰落的影响不能被忽略, 结果如图 3 (b) 所示。



(a) 步长 = 1.08(dB), 移动速度: 80km/h (b) 步长 = 1.75(dB), 移动速度: 60km/h

图 3 快慢衰落同时考虑情况下功率控制步长对控制误差的影响
(1) 同时考虑快、慢衰落, (2) 仅考虑快衰落

3 W-CDMA 系统容量分析

在这篇文章中, 我们仅考虑 W-CDMA 系统反向链路的容量。我们假设 W-CDMA 系统中每个用户有 K 种不同的业务, 每个小区中每种业务的数量为 $N_j(j = 1, 2, \dots, K)$ 个, 不考虑扩频码和噪声的影响时, 定义第 k 种业务的瞬时比特能量与干扰比为

$$(E_b / I_0)_k = \Gamma_k = \frac{X_k}{Y_{\text{intra},k} + Y_{\text{inter},k}} \cdot \frac{W}{R_k} \quad (3)$$

式中 X_k 是基站接收到的第 k 种业务的有用信号功率。 $Y_{\text{intra},k}, Y_{\text{inter},k}$ 分别为第 k 种业务接收到的来自本小区的干扰信号功率和其它小区的干扰信号功率。接收信号功率的波动是由传播距离、阴影和多径衰落引起的。 W 是信道带宽, R_k 是第 k 种业务的传输速率。

与单一业务的 CDMA 系统不同, 在 W-CDMA 系统中, 小区中各用户的不同业务之间有干扰, 不同用户的同一种业务之间也会产生干扰, 因此, 小区中的干扰信号功率可以表示为

$$Y_{\text{intra},k} = \sum_{j=1}^K N_j \alpha_j X_j - \alpha_k x_k \quad (4)$$

α_j 是取值为 0, 1 的二项分布随机变量, 其均值和方差分别为: $E(\alpha_j) = \rho_j, \text{var}(\alpha_j) = \rho_j(1 - \rho_j)$, ρ_j 是第 j 种业务的激活因子, N_j 是小区内第 j 种业务的个数。

在 W-CDMA 通信系统中, 存在突发业务, 接收机接收到的信号比特能量与干扰比是具有大的变化的概率分布, 因此, 仅用平均信噪比表示通信链路质量是不够的, 我们用中断概率 $P_{\text{outage},k}$, 即用 Γ_k 的分布来描述第 k 种业务所需要的传输质量要求。

$$\begin{aligned} P_{\text{outage},k} &= \Pr \left\{ \frac{X_k}{Y_k} < \frac{\gamma_k}{W/R_k} = \beta_k \right\} = 1 - P(x > 0) P \left(y < \frac{x}{\beta_k} \right) \\ &= 1 - \int_0^\infty \int_0^{x/\beta_k} f_x(x) f_y(y) dx dy \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $f_y(y)$ 和 $f_x(x)$ 分别是基站接收的有用信号功率和干扰信号功率的概率密度函数。

系统容量是传输质量的函数, 定义为系统中各种业务要求的中断概率小于其门限值 λ_k 时小区中最多可以容纳的每种业务的数量, 这里假设各小区中用户数相同。

在经过上述的功率控制后, 有用信号功率是服从对数正态分布的随机变量, 其概率密度函数为

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

文献 [1, 5] 在分析 CDMA 系统容量时, 把干扰信号功率看作是高斯变量, 在不完善功率控制时, 这种假设是不成立的. 定义 f 为小区间干扰与小区内干扰之比 [8], 假设每个小区的容量是相同的, 先不考虑 α_j 的影响, 由于每种业务的发射功率是独立控制的, 各业务发射功率经功率控制后到达基站的功率是相互独立的对数正态同分布随机变量, 因此, 基站接收到的总的干扰功率可以近似为对数正态分布随机变量, 此随机变量的概率密度函数为

$$f_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y y} \exp\left[-\frac{(\ln y - \mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}\right] \quad (7)$$

式中

$$\sigma_{Y,k}^2(n_j) = \ln[m^2(Y_k) + D^2(Y_k)] - 2\ln[m(Y_k)] \quad (8)$$

$$\mu_{Y,k}(n_j) = \frac{1}{2} \ln[m^2(Y_k) + D^2(Y_k)] - \sigma_{Y,k}^2(n_j) \quad (9)$$

其中 $m(Y_k) = \sum_{j=1}^K (1+f)N_j \exp(\mu_j + \sigma^2/2) - \exp(\mu_k + \sigma^2/2)$, $D^2(Y_k) = \sum_{j=1}^K (1+f)N_j \exp(2\mu_j + \sigma^2)[\exp(\sigma^2) - 1]$.

将 (6) 式和 (7) 式代入 (5) 式, 得到第 k 种业务的中断概率为

$$P_{\text{outage},k}(n_j) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} \cdot \text{erf}\left(z_k \frac{\sigma_{Y,k}(n_j)}{\sigma} + \frac{\ln(\beta_k) - \mu_k + \mu_{Y,k}(n_j)}{\sqrt{2}\sigma}\right) dz_k \quad (10)$$

$\text{erf}(\cdot)$ 是误差函数, $z_k = \frac{\ln y_k - \mu_{Y,k}(n_j)}{\sqrt{2}\sigma_{Y,k}(n_j)}$.

(9) 式没有考虑 α_j 的变化, 当 α_j 服从二项分布时, (10) 式变为

$$P_{\text{outage},k}(N_j) = \sum_{j=1}^K \sum_{n_j=1}^{N_j} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} \text{erf}\left(z \frac{\sigma_{Y,k}(n_j)}{\sigma} + \frac{\ln(\beta_k) - \mu_k + \mu_{Y,k}(n_j)}{\sqrt{2}\sigma}\right) dz \right] \times \binom{N_j}{n_j} \rho_j^{n_j} (1 - \rho_j)^{N_j - n_j} \quad (11)$$

4 数值计算

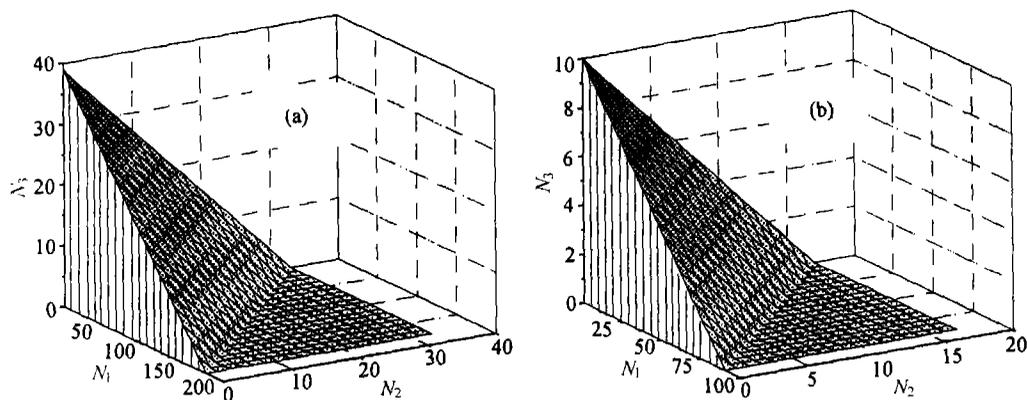
下面以 W-CDMA 系统为例, 给出计算结果, W-CDMA 系统的参数如表 1 所示.

表 1 W-CDMA 系统参数

k, j	$W(\text{MHz})$	$R_k(\text{kbps})$	ρ_k	λ_k
1		8	0.5	10^{-2}
2	4.096	64	0.1	10^{-3}
3		384	0.02	10^{-4}

令 (11) 式中等号右边等于 λ_k ，并将 (6)、(7) 式和表 1 的参数代入，通过求解方程组即可求得在给定中断概率时小区中各种业务的数量，这些值代表系统容量。计算结果如图 4 所示。

功率控制对 W-CDMA 通信系统容量的影响很大，不完善功率控制造成系统容量下降，图 4(b) 所示为功率控制误差为 0.5 时小区中三种业务的数量，他们明显小于图 4(a) 中的值。



(a) 完善功率控制 ($\sigma = 0$)

(b) 不完善功率控制 ($\sigma = 0.5\text{dB}$)

图 4 多小区完善和不完善功率控制时反向链路的容量

5 结束语

在 W-CDMA 移动通信系统中，功率控制是保证通信链路传输质量，提高系统容量的重要方法。但在衰落环境中，受功率控制算法、控制速度、功率调整步长等因素的限制，使得功率控制不能完全补偿无线信道衰落。本文针对 W-CDMA 系统，模拟了衰落信道中，移动台以不同速度移动时功率控制步长对功率控制克服信道衰落的影响，模拟结果显示，通过合适地选择功率控制步长，可以使功率控制误差减小。本文还分析了功率控制误差对 W-CDMA 系统容量的影响，给出了数值计算结果，这些结果有利于进行 W-CDMA 系统的设计。

参 考 文 献

- [1] K. S. Glihouse, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr, C. E. Wheatley III, On the capacity of a cellular system, *IEEE Trans. on Vehicular Technol.*, 1991, VT-40(2), 303-312.
- [2] R. Prasad, A. Kegel, Capacity analysis of a cellular direct sequence code division multiple access system with imperfect power control, *IEICE Trans. Communication*, 1993, E76-B(8), 894-904.
- [3] M. G. Jansen, R. Prasad, Capacity, throughput, and delay analysis of a cellular DS-CDMA system with imperfect power control and imperfect sectorization, *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, 1995, VT-44(1), 67-75.
- [4] V. K. Paulrajan, J. A. Roberts, Capacity of a CDMA cellular system with variable user data rates, *Proc. of Globecom'96*, London, Nov. 1996, 1458-1462.
- [5] S. J. Lee, D. K. Sung, Capacity evaluation for DS-CDMA systems with multi-class on/off traffic, *IEEE Communication Letters*, 1998, 2(6), 153-155.
- [6] Qiu L, Zhou S. L, Mei G, Zhu J. K, Channel design and performance analysis for W-CDMA wireless multimedia communication system, *Proc. IEEE ISSSTA'98*, Sun City, South Africa, Sept, 1998, 304-308.
- [7] Wen J. H, Yeh L. C, Chiou J. R, Performance of short-term fading prediction-based power control method for DS-CDMA cellular mobile radio networks, *IEICE Trans. Commun.*, 1998, E81-B(6), 1231-1238.

- [8] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, E. Zehav, Other-cell interference in cellular power-controlled CDMA, *IEEE Trans. on Communications*, 1994, COM-42(2/3/4), 1501-1504.

THE INFLUENCE OF POWER CONTROL ON THE PERFORMANCE OF W-CDMA SYSTEM IN FADING ENVIRONMENT

Qiu Ling Zhu Jinkang Gong Ming

(Dept. of Electron. Eng. and Info. Sci., USTC, Hefei 230027, China)

Abstract Power control is an effective approach to overcome “near-far” problem, reduce intercell interference and increase system capacity in code division multiple access (CDMA) mobile communication systems. At the same time, power control can provide different quality of service for different services on W-CDMA communication systems. However, perfect power control is very difficult to realize in fading environment. In this paper, the effect of step size of power control on the received power under shadowing and fading is simulated. The effect of power control on the capacity of W-CDMA communication system is analyzed and the numerical results are given. The results are valuable for the design of W-CDMA communication systems.

Key words W-CDMA, Performance analysis, Power control

邱 玲: 女, 1963 年生, 博士, 副教授, 研究方向为: 移动通信, 扩频通信 (主要包括功率控制、多用户检测, 系统设计和性能分析).

朱近康: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 中国科学技术大学信息科学技术学院常务副院长, 国家“863”计划通信主题专家组成员、个人通信专业专家组组长, 研究方向为: 移动通信与个人通信, 扩频通信, 通信中的信号处理.

龚 明: 男, 1976 年出生, 硕士研究生, 研究方向为: 移动通信, 扩频通信.