

非理想功率控制下 WCDMA 系统中的业务速率与系统容量¹

张彦 阎鸿森 朱世华

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘要 根据 WCDMA 系统单小区功率分配算法有解的充要条件, 通过将目标信干比抽象为对数正态随机变量的方法, 该文得出了非理想功率控制条件下系统容量的定量关系式, 为研究非理想功率控制下, VBR(Variable Bit Rate) 业务的速率与 CBR(Constant Bit Rate) 和 VBR 业务的用户容量间的关系提供了一条有效的途径. 分析和数值计算结果表明, 非理想功率控制对系统性能有着显著的影响, 业务速率和系统容量之间存在的互换关系, 可以根据不同业务的性能要求, 通过改变业务参数来提高系统的适应性, 从而提高系统的资源利用率和服务质量.

关键词 宽带码分多址, 非理想功率控制, 目标信干比, CBR 业务, VBR 业务
中图分类号 TN914.4

1 引言

WCDMA(宽带码分多址) 是第三代移动通信系统的空中接口标准之一. 它具有传输语音、数据、图像及多媒体等多种业务的功能. WCDMA 是一个自干扰系统, 通过对用户发射功率的控制, 可以使系统在满足 QoS(业务质量) 的条件下达到最大容量. 在实际中, 不同的业务有着不同的实时性要求, 我们可以通过调节实时性业务的传输速率来提高系统的容量, 从而使系统灵活地适应不同业务的需求.

国内外学者已对功率控制下的速率、服务质量和系统容量性能等进行了大量的研究. 文献 [1] 提出了一种速率调节方案, 可以在最小发射功率条件下, 提高系统的流量, 避免拥塞. 文献 [2] 提出了一种基于速率调节的功率控制方案, 能够在满足系统服务质量的前提下, 根据速率的变化实时地改变发射功率. 文献 [3] 讨论了蜂窝 CDMA 系统在各种条件下的容量. 上述文献从不同的方面讨论了功率控制条件下, 速率、服务质量和容量的性能, 但未对三者之间动态的变化关系进行定量的研究.

在实际通信系统中有两种典型的业务: CBR(恒定比特率) 业务、VBR(变比特率) 业务. 其中 CBR 业务的速率是恒定的, 但对实时性的要求很高. VBR 业务对实时性要求不高, 但其速率可在一定范围内变化. 文献 [4] 针对单小区 WCDMA 系统, 给出了在满足系统 QoS 要求的情况下, 存在最小功率分配解的充要条件. 但该文仅考虑了单纯 CBR 业务的系统. 文献 [5] 分析了非理想功率控制条件下综合业务 CDMA 系统的性能. 鉴于未来的第三代移动通信系统将支持多速率、多种类业务, 本文针对 CBR, VBR 的特点, 在文献 [4] 和文献 [5] 的基础上得出了非理想功率控制条件下系统的容量表达式, 进而利用数值计算分析了业务速率与用户容量在非理想功率控制条件下的互换性.

2 系统分析

同文献 [4], 我们仅考虑理想功率控制条件下单小区的情况. 设该小区共有 K 种业务, 每种业务的速率是 $R_i, i = 1, 2, \dots, K$, 到达基站的功率是 p_i , 信干比要求是 $(E_b/I_0)_i \geq \gamma_i$, 每种业务拥有 n_i 个用户, 每个用户每一时刻拥有一种业务.

¹ 2001-10-18 收到, 2002-08-22 改回
国家自然科学基金 (60072040) 资助

设服务质量 QoS 是由平均每比特能量与干扰密度之比 (E_b/I_0) 来表示的, 即

$$\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_i = \frac{p_i/R_i}{\left(\sum_{j=1}^K n_j p_j - p_i\right)/W + I} \geq \gamma_i \quad (1)$$

其中 W 是扩频带宽, I 是背景噪声谱密度, 则每个业务最小功率解存在的充要条件为

$$\sum_{i=1}^K \frac{n_i \alpha_i}{1 + \alpha_i} \leq 1 \quad (2)$$

为便于比较且不失一般性, 假设系统中只存在 CBR 业务和 VBR 业务, CBR 业务和 VBR 业务的用户数分别为 n_1 和 n_2 , CBR 业务的速率恒定为 R_1 , VBR 业务的速率是可变化的, 设为 R_2 , CBR 业务和 VBR 业务的最低信干比要求分别为 γ_1 和 γ_2 。

以上为理想功率控制条件下系统容量的分析, 然而在实际当中, 由于空间信号存在着衰落呈现出随机性, 所以功率控制有一定的滞后和偏差, 并不能完全补偿衰落造成的信号损失, 因此功率控制是非理想的。在高斯白信道中, 移动台是根据目标信干比 $\gamma = (E_b/I_0)$ 来调整发射功率的。文献 [6] 中指出功率控制包含开环功率控制和闭环功率控制, 开环功率控制是为了弥补慢衰落, 闭环功率控制是为了弥补快衰落。闭环功率控制又包含两个相互影响的内环功率控制和外环功率控制。内环功率控制是为了保持移动用户的接收信干比满足目标信干比要求。外环功率控制是通过实测当前的误帧率 (FER) 来设定合适的目标信干比。误帧率是直接反映当前业务服务性能好坏的指标, 信干比间接的反映了用户服务质量的变化, 信干比和误帧率之间并不是一个简单的函数关系, 总的趋势是误帧率上升, 则抬高门限信干比以降低误帧率; 误帧率下降, 则降低门限信干比, 以减少用户的发射功率。理想功率控制条件下, 用户的服务质量是不变的, 误帧率是一定的, 因而信干比门限值恒定的; 非理想功率控制条件下, 由于信道衰落时变的影响, 外环功率控制并不能完全补偿信道衰落, 造成用户服务质量的变化, 导致误帧率变化, 使得信干比门限值发生变化。因此信干比门限值的变化程度反映了闭环功率控制非理想化的程度, 所以可以通过信干比门限值的变化来研究闭环非理想功率控制对系统性能的影响。文献 [7] 中说明基站接收信干比经过非理想内环功率控制后近似为对数正态分布, 对数均值为目标信干比, 对数方差在 1~1.5dB 之间。在非理想功率控制下经过外环控制, 目标信干比的对数均值和对数方差是外环调整步长和接收信干比对数方差的函数。因此目标信干比可以近似抽象为对数正态随机 (log-normal random) 变量, 其中的对数方差反映了闭环功率控制非理想化的程度, 为定量的分析非理想化功率控制对系统性能的影响提供了一条有效的途径。

CBR 业务用户目标信干比 $\gamma_1 = e^{Z_1}$, 其中 $Z_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$; VBR 业务用户目标信干比 $\gamma_2 = e^{Z_2}$, 其中 $Z_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 。既然目标信干比现在是一个随机变量, 系统容量表达式 (2) 式根据文献 [1] 可以重新写成下面的形式:

$$P(V < 1) = 1 - \eta \quad (3)$$

其中

$$V = \frac{n_1}{W/(R_1\gamma_1) + 1} + \frac{n_2}{W/(R_2\gamma_2) + 1} \quad (4)$$

根据文献 [8], V 近似服从对数正态分布, 即 $V = e^Y$, 其中 $Y \sim N(\mu_Y, \sigma_Y^2)$, $\mu_1 = \ln[E(\gamma_1)] - 0.5\sigma_1^2$, $\mu_2 = \ln[E(\gamma_2)] - 0.5\sigma_2^2$ 。为了简单起见, 令 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$, 则可以得出 V 的均值和方

差:

$$E(V) = e^{\sigma^2/2} \left(\frac{n_1 R_1}{W} e^{\mu_1} + \frac{n_2 R_2}{W} e^{\mu_2} \right) \quad (5)$$

$$\text{Var}(V) = e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \left[\left(\frac{n_1 R_1}{W} \right)^2 e^{2\mu_1} + \left(\frac{n_2 R_2}{W} \right)^2 e^{2\mu_2} \right] \quad (6)$$

从 (5) 和 (6) 式可以得到 Y 的方差和均值:

$$\sigma_Y^2 = \ln \left[\frac{\text{Var}(V)}{E^2(V)} + 1 \right] \quad (7)$$

$$\mu_Y = \ln[E(V)] - 0.5\sigma_Y^2 \quad (8)$$

根据 (3)–(8) 式可以得到非理想功率控制条件下系统容量的表达式:

$$u_{1-\eta}\sigma_Y + \mu_Y = 0 \quad (9)$$

其中 $u_{1-\eta}$ 表示 $N(0, 1)$ 的 $1-\eta$ 分位数, 通常情况下取 $\eta = 0.01$ 。根据 (9) 式通过数值计算可以获得系统速率和容量之间的互换关系。

3 数值计算结果

数值计算中的系统参数为: 系统扩频带宽 $W = 4.096\text{MHz}$, $\eta = 0.01$ 。CBR 业务的最低信干比要求期望值为 $\gamma_1 = 7\text{dB}$, VBR 业务的最低信干比要求期望值为 $\gamma_2 = 8.5\text{dB}$ 。

图 1 给出了在不同方差 σ 条件下的 VBR 业务用户数和 CBR 业务用户数的制约关系图。初始条件为: $R_1 = 9.6\text{kb/s}$, $R_2 = 28.8\text{kb/s}$ 。图 1 中曲线 1, 2, 3 分别代表 $\sigma = 0\text{dB}$, $\sigma = 1\text{dB}$ 和 $\sigma = 2\text{dB}$ 的情况。对比曲线 1, 2, 3 可以看出随着方差 σ 的增大, 系统的容量逐渐下降, 即非理想功率控制导致系统的容量下降。

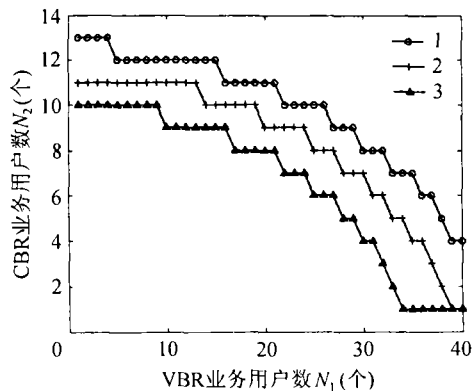


图 1 不同信干比方差 (σ) 条件下系统容量图

图 2(a)–图 2(c) 给出了在不同条件下 VBR 业务速率变化对 CBR 业务容量变化和 VBR 业务容量变化的影响。从图中可以看出 VBR 业务速率的减少可以换取 CBR 业务容量和 VBR 业务容量的增加, 但是在不同的情况中增加的效果不同。3 幅图中, 图 2(a) 中的曲线 1, 2, 3 和图 2(b), 图 2(c) 中曲线 1, 2 为 VBR 业务用户数不变, CBR 业务用户数随 VBR 业务速率减少时的变化情况; 图 2(a) 中的曲线 4, 5, 6 和图 2(b), 图 2(c) 中曲线 3, 4 为 CBR 业务用户数不变, VBR 业务用户数随 VBR 业务速率减少时的变化情况。

图 2(a) 反映了不同方差 σ 情况下 VBR 业务速率变化对系统容量变化的影响。初始条件: $R_1 = 9.6\text{kb/s}$, $R_2 = 28.8\text{kb/s}$, $N_1 = 15$ 。曲线 1, 4 为 $\sigma = 0\text{dB}$ 情况, 曲线 2, 5 为 $\sigma = 1\text{dB}$

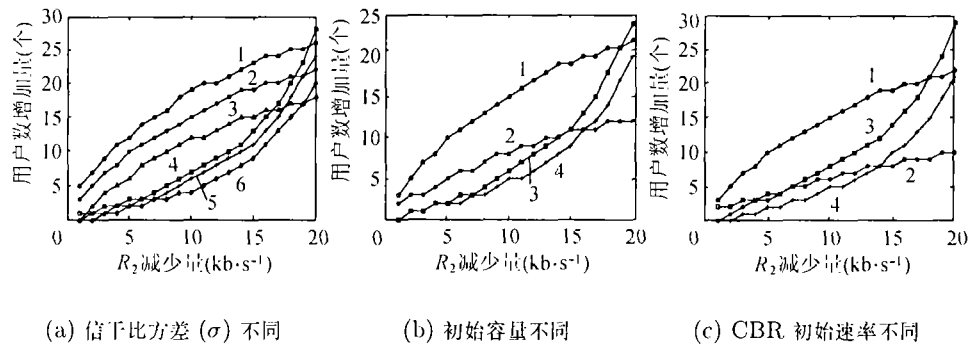


图2 非理想功率控制条件下速率变化与系统容量变化关系

情况, 曲线 3, 6 为 $\sigma = 2\text{dB}$ 情况。从图中可以看出随着方差 σ 的增大, VBR 业务速率的减少对系统用户数的增加程度影响减弱, 所以非理想功率控制造成了系统速率换取容量性能的下降。

图 2(b) 反映了不同初始容量条件下, VBR 业务速率变化对系统容量变化的影响。初始条件: $\sigma = 1\text{dB}$, $R_1 = 9.6\text{kb/s}$, $R_2 = 28.8\text{kb/s}$ 。其中曲线 1, 3 为 $N_1 = 15$, $N_2 = 10$ 时的情况, 曲线 2, 4 为 $N_1 = 25$, $N_2 = 8$ 情况。从图中可以看出在两种情况下, 随着 CBR 业务初始用户数的增加, VBR 业务速率变化对 CBR 业务和 VBR 业务用户数的影响均逐渐减少。这是由于随着 CBR 业务初始用户数的增加, VBR 业务初始用户数将必然减少, 这样来自 VBR 业务速率降低而节省出来的系统资源也会随之减少, 所以 VBR 业务速率减少造成的用户数增加量也随之减少。

图 2(c) 反映了不同 CBR 初始速率条件下 VBR 业务速率变化对系统容量变化的影响。初始条件: $\sigma = 1\text{dB}$, $N_1 = 15$, $R_2 = 28.8\text{kb/s}$ 。其中曲线 1, 3 为 $R_1 = 9.6\text{kb/s}$ 情况, 曲线 2, 4 为 $R_1 = 14.4\text{kb/s}$ 情况。从图中可以看出在两种情况中, 随着 CBR 业务初始速率的增加, VBR 业务速率对 CBR 业务和 VBR 业务用户数的影响均逐渐减少。这是由于随着 CBR 业务初始速率的增加, 占用的资源也相应地增加, 这样 VBR 业务初始用户数必然减少, 来自 VBR 业务速率降低而节省出来的系统资源也会随之减少, 所以 VBR 业务速率减少所引起的用户数的增加量也随之减少。

从图 2 中还可以发现, 当 VBR 业务的速率减少量控制在一定门限值范围内时, 在相同初始条件情况下, VBR 业务速率对 CBR 业务的容量的影响比对 VBR 业务容量的影响要大, 当超过这个门限值时, VBR 业务速率对 CBR 业务的容量的影响比对 VBR 业务容量的影响小。这是由于从总体上来看用户的容量增加是以速率的减少为代价的, 当 VBR 业务用户数恒定时, VBR 业务速率的减少换取了 CBR 业务用户数的增加, 这种增加量必然与 CBR 业务速率相关, CBR 业务速率越小, 增加量就越大。当 CBR 业务用户数恒定时, VBR 业务速率的减少换取了 VBR 业务的用户数的增加, 这种增加量必然与 VBR 业务的速率相关, VBR 业务速率越小, 增加量就越大。实际中由于 VBR 业务的速率要大于 CBR 业务速率, 所以当 VBR 业务速率减少到一定程度时, VBR 业务速率对 CBR 业务的容量的影响比对 VBR 业务容量的影响要大, 当 VBR 业务速率减少到小于与 CBR 业务速率相关的某一门限值时情况将相反, 此门限值还与信干比等其他因素有关。

4 结束语

本文利用单小区功率分配有解的充要条件, 得出了非理想功率控制条件下系统容量的关系式, 研究了非理想功率控制条件下 CBR 业务容量与 VBR 业务速率间的互换关系。并且对比了

在不同系统初始条件下, 上述各参量的相互关系和影响。数值计算清楚地说明了速率换取容量的现实性和大致数值, 为实际中灵活调整系统参数, 提高系统的适应性等提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] S. RamaKrishna, J. M. Holtzman, A scheme for throughput maximization in a dual-class CDMA system[J], IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(6), 830-844.
- [2] K. Dongwoo, Rate-regulated power control for supporting flexible transmission in future CDMA mobile networks[J], IEEE J. on Selected Areas in Communications, 1999, 17(5), 968-977.
- [3] K. Gilhousen, I. Jacobs, R. Padovani, *et al.*, On the capacity of a cellular CDMA system[J], IEEE Trans. on VTC, 1991, 40(2), 303-312.
- [4] A. Sampath, P. Kumarm, J. Holtzman, Power control and resource management for a multimedia CDMA wireless system[A], PIMRC95[C], IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Toronto, Canada, 1995, 21-25.
- [5] 关皓, 李承恕, 非理想功率控制下综合业务 CDMA 系统性能分析 [J], 铁道学报, 2000, 22(6), 76-79.
- [6] A. J. Viterbi 著, 李世鹤, 译, CDMA 扩频通信原理, 北京, 人民邮电出版社, 1997.1, 173-180.
- [7] A. Sampath, P. Kumarm, J. Holtzman, On setting reverse link target SIR in a CDMA system[A], in Proc. VTC97[C], Phoenix, Arizona, May 1997, 929-933.
- [8] S. Schwartz, Y. yeh, On the distribution function and moments of power sums with lognormal components[J], Bell Syst. Tech. J., 1982, 61(2), 1441-1462.

INFORMATION RATE AND SYSTEM CAPACITY OF WCDMA SYSTEMS UNDER NON-IDEAL POWER CONTROL

Zhang Yan Yan Hongsen Zhu Shihua

(School of Electron. and Info. Eng., Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Starting from the sufficient and necessary condition of existence of solution for power assignment in a single cell WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) system, this paper obtains the system capacity under non-ideal power control through modeling the target SIR(Signal to Interference Ratio) with a log-normal random variable. This provides a criterion for determining the trade-off between the information rate of VBR(Variable Bit Rate) traffic and the capacities of CBR(Constant Bit Rate) and VBR traffics in mobile communications, Analysis and numerical results show that the system performance is notably declined by non-idea power control, and that the information rate and system capacity are exchangeable. As a result, the system can be adapted to diverse performance requirements for various services by varying the control parameters, then the resource utilization and quality of services of the system can be improved.

Key words WCDMA, Non-ideal power control, Target SIR, CBR traffic, VBR traffic

张彦: 男, 1976年生, 硕士生, 研究领域为第三代移动通信系统的容量和功率控制等。
 阎鸿森: 男, 1945年生, 教授, 从事通信系统, ATM交换等领域的研究。
 朱世华: 男, 1949年生, 教授, 博士生导师, 长期从事交换和移动通信等领域的研究。