

多业务类分层结构 CDMA 系统下行链路的功率控制^{*}

方忠, 李 韩, 秦家银

(中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 对支持不同 QoS 要求的多业务类分层结构 CDMA 系统下行链路的功率控制进行了研究, 提出了该系统下行链路的一种功率控制算法。从系统基站发射功率资源受限以及信道受到路径损耗和阴影衰落的影响出发, 同时考虑系统中存在软切换的情况, 得到了一种系统移动台用户所需基站分配功率因子确定原则以及系统中中断概率的表达式。最后, 利用 Monte Carlo 方法对系统进行了仿真, 给出了系统负载、路径指数、阴影衰落标准差、用户密度比和基站最大发射功率比与系统中中断概率关系的仿真结果以及分析。

关键词: 码分多址; 功率控制; 分层蜂窝结构; 下行链路

中图分类号: TN929.533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 02-0034-05

随着近年来无线网络技术的不断发展, 码分多址 (CDMA) 系统一定要能对有不同服务质量 (QoS) 要求的多类无线业务提供支持^[1,2]。分层结构 CDMA 蜂窝系统是为了解决在蜂窝小区中大部分区域用户稀少, 而在某些区域用户密度较大的问题而提出来的。文献 [3] 研究了支持多种业务的单层结构 CDMA 蜂窝系统, 得到了该系统一种上行链路载干比 (CIR) 的简单分析方法以及简单的容量分析, 文献 [4] 研究了只支持单业务类分层结构 CDMA 系统的功率控制算法。文献 [5] 研究了支持多业务的分层结构 CDMA 蜂窝系统的功率控制, 得到了该系统一种上行链路载干比 (CIR) 的简单分析方法以及简单的容量分析。文献 [6] 提出了多业务 CDMA 蜂窝移动通信系统的一种下行链路功率控制策略, 但它没有考虑软切换的情况。文献 [7] 研究了 CDMA 蜂窝移动系统部分宏分集下行链路系统容量, 但它只考虑了单业务情形。

本文针对不同 QoS 要求的多业务类分层结构 CDMA 系统下行链路功率控制进行了研究, 提出了多业务类分层结构 CDMA 系统下行链路的一种功率控制算法, 并对系统进行了仿真以及对仿真结果进行了分析。

1 系统模型

本文采用文献 [4] 中如图 1 所示的系统模型, 它是由一个宏蜂窝 (macrocell) 小区内嵌一个微

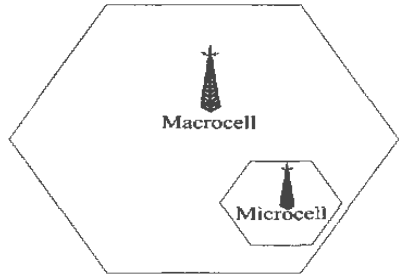


图 1 单小区系统模型
Fig. 1 System model

蜂窝 (microcell) 小区组成, 并且支持 K 种业务的分层结构 CDMA 系统。考虑系统 K 种业务的优先级不同, 假设每种业务信干比大小表示业务优先级的大小, 则有:

$$SIR_{\text{target}}(1) < SIR_{\text{target}}(2) < \dots < SIR_{\text{target}}(K) \quad (1)$$

其中 $SIR_{\text{target}}(k)$ 表示第 k 种业务信干比的目标值, $k=1, 2, \dots, K$ 。

系统中移动台用户分别在宏蜂窝和微蜂窝中均匀分布, 但相对地微蜂窝中用户密度较高。系统采用一种相对门限的软切换模型, 在软切换过程中下行链路采用最大比合并技术。

在实际环境中由于存在多径衰落的影响, 移动台接收到的基站信号不完全正交^[8,9], 定义 α 和 β 分别为系统宏蜂窝和微蜂窝下行链路正交化因子。

系统中基站发送功率除了分配给业务信道外,

^{*} 收稿日期: 2004-06-11

基金项目: 教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 广东省“千百十”人才工程基金资助项目 (Q02012)

作者简介: 方忠 (1968 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 秦家银; E-mail: issqiy@zsu.edu.cn

还有一部分分配给公共信息信道如导频信道等。为方便起见，假设基站的发射功率全部分配给系统中的所有用户。

设 $MS(k, i)$ 表示系统中第 k 种业务第 i 个移动台， $\Phi_{macro}(k, i)$ 和 $\Phi_{micro}(k, i)$ 分别表示宏蜂窝基站和微蜂窝基站分配给 $MS(k, i)$ 的功率分配因子， $L_{macro}(k, i)$ 和 $L_{micro}(k, i)$ 分别表示宏蜂窝基站和微蜂窝基站到 $MS(k, i)$ 的链路损耗； P_{macro} 和 P_{micro} 分别表示宏蜂窝基站和微蜂窝基站的 最大发送功率，系统中第 k 种业务的移动台总数为 $N(k)$ 。

那么系统中所有用户的功率分配因子必须满足以下约束条件：

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N(k)} \Phi_{micro}(k, i) \leq 1, \quad \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N(k)} \Phi_{macro}(k, i) \leq 1 \tag{2}$$

2 功率控制算法

定义 $l(k, i)$ 表示宏蜂窝基站和微蜂窝基站到 $MS(k, i)$ 链路损耗的比值， p 表示宏蜂窝基站和微蜂窝基站最大发射功率的比值，即有：

$$l(k, i) = \frac{L_{macro}(k, i)}{L_{micro}(k, i)}, p = \frac{P_{macro}}{P_{micro}} \tag{3}$$

针对移动台 $MS(k, i)$ 所处的状态，下面分三种情况进行讨论。

2.1 移动台处于软切换状态

当 2 个基站到 $MS(k, i)$ 的路径损耗满足 $-T < L_{macro}(k, i) - L_{micro}(k, i) < T$ (T 为软切换门限值) 条件时，移动台 $MS(k, i)$ 就处于软切换状态。

此时 $MS(k, i)$ 接收到的有用信号为：

$$S(k, i) = \frac{P_{macro} \Phi_{macro}(k, i)}{L_{macro}(k, i)} + \frac{P_{micro} \Phi_{micro}(k, i)}{L_{micro}(k, i)} \tag{4}$$

$MS(k, i)$ 受到的干扰为：

$$I(k, i) = \frac{(1 - \alpha) P_{macro} (1 - \Phi_{macro}(k, i))}{L_{macro}(k, i)} + \frac{(1 - \beta) P_{micro} (1 - \Phi_{micro}(k, i))}{L_{micro}(k, i)} + N_0 W \tag{5}$$

为了表述简单起见，令： $\alpha' = 1 - \alpha$ ， $\beta' = 1 - \beta$ 。

假设 $SIR(k, i)$ 表示 $MS(k, i)$ 下行链路信干比，那么有：

$$SIR(k, i) = [P \Phi_{macro}(k, i) + \Phi_{micro}(k, i) l(k, i)] \cdot [p \alpha' (1 - \Phi_{macro}(k, i)) + \beta' (1 - \Phi_{micro}(k, i)) l(k, i) + N_0 W L_{macro}(k, i) / P_{micro}]^{-1} \tag{6}$$

通常背景噪声与移动台从所有基站接收到的总信号功率相比是可以忽略的，则有：

$$SIR(k, i) = [p \Phi_{macro}(k, i) + \Phi_{micro}(k, i) l(k, i)] \cdot$$

$$[p \alpha' (1 - \Phi_{macro}(k, i)) + \beta' (1 - \Phi_{micro}(k, i)) l(k, i)]^{-1} \tag{7}$$

定义 $\lambda(k, i)$ 表示宏蜂窝基站和微蜂窝基站分配给 $MS(k, i)$ 的功率分配因子之比，即有：

$$\lambda(k, i) = \frac{\Phi_{macro}(k, i)}{\Phi_{micro}(k, i)} \tag{8}$$

为了保证 $MS(k, i)$ 的通信质量，有：

$$SIR(k, i) \geq SIR_{target}(k) \tag{9}$$

由式 (3)、(7)、(8) 和 (9) 有：

$$\Phi_{micro}(k, i) \geq [p \alpha' + \beta' l(k, i)] SIR_{target}(k) \cdot [p \lambda(k, i) + l(k, i) + (p \alpha' \lambda(k, i) + \beta' l(k, i)) SIR_{target}(k)]^{-1} \tag{10}$$

在系统中有大量移动台用户时，可以假设两个基站分配给 $MS(k, i)$ 功率分配因子之比近似地等于 2 个基站与 $MS(k, i)$ 之间的链路损耗比值的倒数，即有：

$$\lambda(k, i) \approx 1 / l(k, i) \tag{11}$$

由式 (10) 和 (11) 有：

$$\Phi_{micro}(k, i) \geq \frac{[p \alpha' + \beta' l(k, i)] l(k, i) SIR_{target}(k)}{p + l^2(k, i) + (p \alpha' + \beta' l^2(k, i)) SIR_{target}(k)} \tag{12}$$

由式 (8) 和 (12) 有：

$$\Phi_{macro}(k, i) \geq \frac{[p \alpha' + \beta' l(k, i)] SIR_{target}(k)}{p + l^2(k, i) + (p \alpha' + \beta' l^2(k, i)) SIR_{target}(k)} \tag{13}$$

2.2 移动台属于宏蜂窝基站控制

当 $MS(k, i)$ 与宏蜂窝基站和微蜂窝基站之间链路损耗满足条件 $L_{macro}(k, i) \leq L_{micro}(k, i) - T$ 时， $MS(k, i)$ 就由宏蜂窝基站控制，此时有 $\Phi_{micro}(k, i) = 0$ 。

$MS(k, i)$ 的下行链路信干比为：

$$SIR(k, i) = \frac{P_{macro} \Phi_{macro}(k, i) / L_{macro}(k, i)}{\left[\frac{\alpha' P_{macro} [1 - \Phi_{macro}(k, i)]}{L_{macro}(k, i)} \right] + \frac{P_{micro}}{L_{micro}(k, i)}} = \frac{p \Phi_{macro}(k, i)}{p \alpha' [1 - \Phi_{macro}(k, i)] + l(k, i)} \tag{14}$$

由式 (9) 和 (14) 有：

$$\Phi_{macro}(k, i) \geq \frac{[p \alpha' + l(k, i)] SIR_{target}(k)}{p [\alpha' SIR_{target}(k) + 1]} \tag{15}$$

2.3 移动台处于微蜂窝基站控制

当 $MS(k, i)$ 与宏蜂窝基站和微蜂窝基站之间链路损耗满足条件 $L_{micro}(k, i) \leq L_{macro}(k, i) - T$ 时， $MS(k, i)$ 就由微蜂窝基站控制，此时有 $\Phi_{macro}(k, i) = 0$ 。

移动台 $MS(k, i)$ 下行链路信干比为:

$$SIR(k, i) = \frac{P_{macro} \Phi_{macro}(k, i) L_{macro}(k, i)}{\left[\frac{P_{macro}}{L_{macro}(k, i)} \right] + \left[\frac{\beta P_{micro} [1 - \Phi_{micro}(k, i)]}{L_{micro}(k, i)} \right]} = \frac{\Phi_{micro}(k, i) l(k, i)}{p + \beta [1 - \Phi_{micro}(k, i)] \circ l(k, i)} \quad (16)$$

由式 (9) 和 (16) 有:

$$\Phi_{micro}(k, i) \geq \frac{[p + \beta l(k, i)] SIR_{target}(k)}{l(k, i) [\beta SIR_{target}(k) + 1]} \quad (17)$$

所以, 为了保证每个用户业务质量的前提下使系统容量最大化, 需要根据以下“系统移动台功率分配因子确定原则”来确定系统中用户的功率分配因子。

系统移动台功率分配因子确定原则:

(1) 当 $-T < L_{macro}(k, i) - L_{micro}(k, i) < T$ 时有:

$$\Phi_{micro}(k, i) = \frac{[p\alpha' + \beta' l(k, i)] l(k, i) SIR_{target}(k)}{p + l^2(k, i) + (p\alpha' + \beta' l^2(k, i)) SIR_{target}(k)},$$
$$\Phi_{macro}(k, i) = \frac{[p\alpha' + \beta' l(k, i)] SIR_{target}(k)}{p + l^2(k, i) + (p\alpha' + \beta' l^2(k, i)) SIR_{target}(k)}$$

(2) 当 $L_{macro}(k, i) \leq L_{micro}(k, i) - T$ 时有:

$$\Phi_{micro}(k, i) = 0,$$
$$\Phi_{macro}(k, i) = \frac{[p\alpha' + l(k, i)] SIR_{target}(k)}{p [\alpha' SIR_{target}(k) + 1]}$$

(3) 当 $L_{micro}(k, i) \leq L_{macro}(k, i) - T$ 时有:

$$\Phi_{micro}(k, i) = \frac{[p + \beta' l(k, i)] SIR_{target}(k)}{l(k, i) [\beta' SIR_{target}(k) + 1]},$$
$$\Phi_{macro}(k, i) = 0$$

但是, 系统中所有用户的功率分配因子必须满足 (2) 式的限制条件。如果在某时刻系统不满足 (2) 式的限制条件, 系统会产生系统中断。

系统下行链路系统中断概率为:

$$P_{out} = Pr \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N(k)} \Phi_{macro}(k, i) > 1 \mid \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N(k)} \Phi_{micro}(k, i) > 1 \right\} \quad (18)$$

当系统发生中断时, 为了保证系统大多数用户的正常通信, 本文采取文献 [6] 中去除系统中用户的策略: 首先去除优先级最低的用户, 若仍不满足要求, 再依次去除优先级较高的用户。对于优先级级别相同的用户, 首先去除信道条件最为恶劣的用户。

本系统采用以下的功率控制算法:

- (1) 根据 $MS(k, i)$ 在系统中所处的位置, 计算 $L_{macro}(k, i)$ 和 $L_{micro}(k, i)$ 以及 $l(k, i)$;
- (2) 判断移动台是否处于软切换状态还是由其中一个基站控制;
- (3) 根据“系统移动台功率分配因子确定原则”得到 $\Phi_{micro}(k, i)$ 和 $\Phi_{macro}(k, i)$;
- (4) 判断系统中所有用户的功率分配因子是否满足 (2) 式。若满足, 则此时已经得到 2 个基站分配给系统所有用户的最佳功率。否则, 按照用户去除策略依次去除优先级较低的用户, 直到满足 (2) 式为止。

3 仿真及结果讨论

3.1 仿真参数

仿真系统由一个宏蜂窝小区内嵌一个微蜂窝小区组成, 宏蜂窝小区半径 R 为 1 500 m, 微蜂窝小区半径 r 为 200 m。假设宏蜂窝基站位于宏蜂窝小区的 中心, 其位置坐标为 $(0, 0)$; 微蜂窝基站位于宏蜂窝蜂小区内 的一个固定点, 其位置坐标为 $(\sqrt{3}R/4, -R/2)$ 。基站和移动台天线是全向的, 移动台均匀分布于系统中, 但微蜂窝小区中用户密度较高。系统支持 3 种类型业务, 某一时刻移动台随机地支持 1 种业务。基站到移动台的链路损耗是由服从 m 次方的路径损耗和均值为 0 dB, 标准差为 σ dB 的对数正态分布的阴影衰落两部分组成。系统中 3 种业务 SIR 目标值分别为 $-17, -14$ 和 -11 dB。系统下行链路正交因子 $\alpha=0.4, \beta=0.06$ 。

运用 Monte Carlo 方法, 对多业务类分层结构 CDMA 系统进行动态仿真, 仿真时统计样本数均为 10 000 个。

3.2 仿真结果与分析

从图 2 可以看出, 随着系统负载 N 的增加系统中断概率增加; 与普通蜂窝系统 (S) 相比分层结构蜂窝系统 (H) 提高了系统容量。

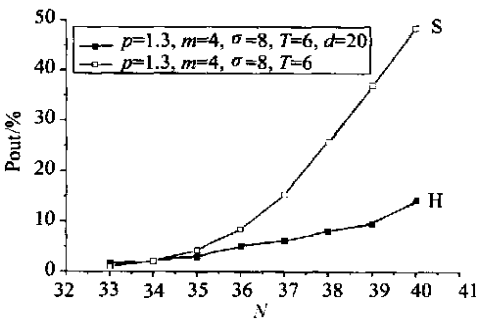


图 2 系统负载与系统中断概率的关系

Fig. 2 System outage percentage versus system load

图 3 表示了路径指数 m 对系统中断概率的影响。随着路径指数 m 的增加，系统的中断概率减少了，这意味着系统容量的增加。这是由于随着路径指数的增加，两个蜂窝基站间的干扰减小了，这样就明显地增加了系统容量。

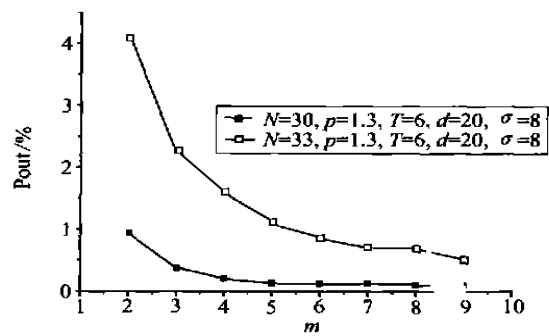


图 3 路径指数与系统中断概率的关系
Fig 3 System outage percentage versus path loss exponent

从图 4 可以看出：随着阴影衰落标准差 σ 增大，系统中断概率随之增大，这表明系统容量在减小；当 σ 增加到一定值以后，系统中断概率会减小，系统容量随之增加。

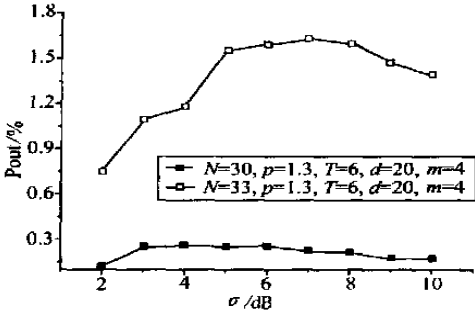


图 4 阴影对系统中断概率的影响
Fig 4 System outage percentage versus shadowing standard deviation

图 5 表示用户密度比 d 与系统中断概率之间的关系。从仿真结果可以观察到：随着用户密度比 d 增大，系统中断概率会相应地降低，这表示系统容量增加；但 d 增加到一定程度（如 8）以后系统中断概率不但不减小反而增加了。这是因为用户密度比 d 的增加使微蜂窝基站处理能力得到发挥，这正是分层蜂窝结构所要解决的问题。但用户密度超过一定值以后，超过了微蜂窝基站的处理能力，必然会造成系统中断概率的增加。

图 6 表示宏蜂窝和微蜂窝基站最大发射功率的比值 p 与系统中断概率的关系。在仿真条件下，当 $p \leq 1.5$ 随着 p 增大系统中断概率减小，当 $p > 1.5$ ，随着 p 的增加系统中断概率明显地增加。

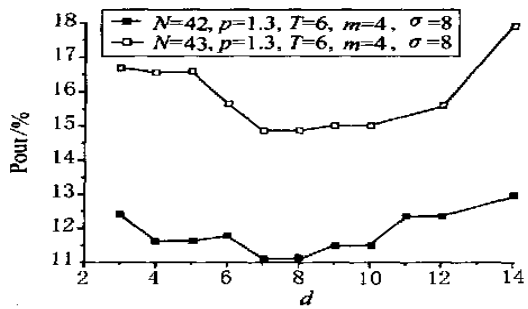


图 5 用户密度比与系统中断概率的关系
Fig 5 System outage percentage versus user density ratio

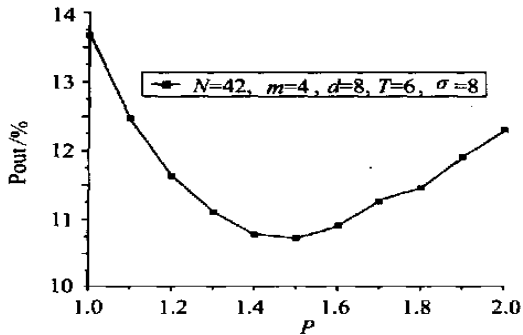


图 6 基站最大发射功率比与系统中断概率关系
Fig 6 System outage percentage versus ratio of the maximum transmit power of two BS

4 结 论

本文对多业务分层结构 CDMA 蜂窝系统的功率控制进行了研究，得到该系统下行链路的一种功率控制算法。本文还指出了在系统资源受限的情况下，如何保证较高业务优先级的用户得到服务以及尽量满足较低业务优先级用户服务的策略。通过运用 Monte Carlo 方法对系统进行了仿真，得出了相应的仿真结果。

参考文献:

- [1] CORREIA L, PRASAD R. An overview of wireless broadband communications[J] . IEEE Commun Mag, 1997, 35(1): 28—33.
- [2] ZANDER J. Radio resource management in future wireless network: requirements and limitations [J] . IEEE Communication Mag, 1997, 35(8): 30—36.
- [3] KIM J Y, GORDON L S, IAN F A. A simple performance/capacity analysis of multiclass macrodiversity CDMA cellular systems[J] . IEEE Transaction on commun, 2002, 50(2): 304—308.
- [4] KIM J Y, GORDON L S, IAN F A. Macrodiversity power control in hierarchical CDMA cellular systems[J] . IEEE J Selected Areas in Commun, 2001, 19(2): 266—276.

[5] 丁方忠, 李韩, 秦家银. 多业务类分层结构 CDMA 蜂窝系统功率控制研究[J]. 通信学报, 2004, 25(9): 42—48.

[6] 朱立东, 吴诗其. 多业务 CDMA 蜂窝移动通信系统的功率控制[J]. 通信学报, 2003, 24(6): 81—89.

[7] LIN D, ZHOU S D, YAO Y. A comparative study of the effects of microdiversity and macrodiversity on CDMA forward-link capacity[C]. ICC, 2002, 3: 1893—1897.

[8] 彭林, 朱小敏, 朱凌霄. WCDMA 无线通信技术及其演化[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

[9] 杨光, 杨大成, 马亚宁. CDMA 系统下行链路容量研究[J]. 电子学报, 2002, 30(1): 5—9.

Forward Link Power Control of Multi-class Hierarchical CDMA Cellular System

DING Fang zhong, LI Han, QIN Jia yin

(Department of Elctronics & Communication Engineering, Sun Yat Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Hierarchical CDMA systems, supporting multi-class services with various qualities of service (QoS) requirements, are studied. A power control scheme of forward link of this kind of hierarchical CDMA system is proposed. From the transmit power limit of a base station, taking account of path loss, shadow shading and soft handover, a certain decided rule of the distribution power factor and an expression of system outage probability are got. At the end, the multi-class hierarchical CDMA cellular system is simulated with using the Monte Carlo method.

Key words: CDMA; power control; hierarchical cellular architectures; forward link

·简 讯·

本刊获第三届全国国家期刊奖百种重点期刊奖项

第三届全国国家期刊奖颁奖表彰大会最近在北京举行。中山大学学报自然科学版在第二届得奖后，再接再厉，在第三届全国国家期刊奖评选活动中再次获百种重点期刊奖。

国家期刊奖每两年评选一次，是目前我国期刊界惟一的政府奖，也是期刊界的最高奖。国家新闻出版总署、科技部、中宣部出版局的领导出席颁奖会并为获奖期刊颁奖。

近年来中山大学学报自然科学版坚持办刊宗旨，坚持立足本校，坚持办刊特色，发挥自身优势，学术水平和办刊质量不断提高。2004 年在教育部组织的全国高校优秀科技期刊评选活动中获一等奖。最近，自然版学报又被美国《工程索引》列为收录的核心源期刊。

学报自然科学版将继续努力，珍惜已经获得的荣誉，更新办刊理念，与时俱进，团结进取，为创办精品期刊目标而努力。

(张 讯)