

反向外环功率控制的模型及其优化算法¹

吕 玲 朱世华 汪勇刚

(西安交通大学信通系 西安 710049)

摘 要 该文针对 cdma2000 系统的反向链路,建立了反向外环的理论模型,展示了内环与外环间的紧密联系,提出了一种误帧率的简化估计方法,并对该方法的估计误差进行了分析。在此模型的基础上,从减小用户发射功率及误帧率波动的目标出发,提出了一种外环功率控制的算法。该算法可以保证用户在达到目标误帧率的同时,发射功率最小,从而使系统的性能达到最优。该算法允许系统通过调整权重系数以满足不同的业务性能要求,因而有很好的灵活性。仿真结果验证了所提出模型的正确性和优化算法的有效性。

关键词 外环功率控制, 宽带码分多址, 移动通信, 误帧率

中图分类号 TN914.4

1 引 言

在异步直接序列码分多址 (DS-CDMA) 中,制约容量的主要因素是多址干扰 (MAI),减少多址干扰的直接措施,是控制干扰源 (各基站和用户台) 的发射功率。功率控制的目的在于满足每一个用户通信质量的前提下,最小化每一个用户的发射功率,从而减小 MAI,最终增加系统容量。如果对发射功率进行仔细的规划和控制,就可得到最大化系统的容量和最优化系统的性能^[1-4]。

CDMA 反向闭环功率控制分为内环功控和外环功控。在现有的外环算法分析中,由于在外环和内环之间没有建立理论模型^[5,6],所以 E_b/I_0 目标设定值的调整、步长的确定、调整量的大小等都缺少定量的依据,只能采用黑箱子的方法: FER_{tar} 为目标误帧率,当 $FER > FER_{tar}$ 时,就增加 E_b/I_0 目标的设定值;当 $FER < FER_{tar}$ 时,就减小 E_b/I_0 目标的设定值。升高或降低是通过固定的步长来实现的^[5,6]。在 cdma2000 系统中,这种固定步长的控制方法,步长的取值存在着控制精度与响应速度的矛盾,如果步长小,则控制精度高,但响应速度则跟不上信号的变化,会造成连续误帧的出现,造成很大的掉话率。另一种是由于步长过大,响应速度快,但控制精度难以控制,会造成内环发射功率的浪费,很大程度上影响了容量。尤其对于速率较大而造成发射功率高的数据业务,会对整个系统造成很严重的后果。因此不合适的步长会极大程度地影响系统的稳定性和容量。在反向链路中,外环系统模型是一个长期存在的难题,本文建立了一个初始的外环理论模型,把外环与内环紧密的结合起来,并在此模型的基础上,提出一种变步长的反向外环功率控制算法,它采用了集中控制的原理,集中调整 $FER \neq FER_{tar}$ 的所有用户。这样就可以协调每一个用户的发射功率,使其 FER 都达到各自的 FER_{tar} ,同时平衡整个系统的通信质量,提高系统的性能,实现系统的整体优化。计算机仿真结果表明,该方法在保证 FER_{tar} 的同时,平均发射功率比传统的方法节省了 46.06%,在很大程度上增加了系统容量,因此可以有效地提高功率控制的精度和系统的整体性能。

2 系统模型

2.1 内环模型

设系统有 J 个用户 $(1, 2, \dots, J)$ 和 M 个基站 $(1, 2, \dots, M)$, 以其中的一个基站 m 作为目标基站。在基站 m , 接收到用户 i 的信息比特能量与干扰谱密度之比为

¹ 2001-08-14 收到, 2002-04-11 改回
国家自然科学基金资助项目 (60072040)

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{G_{mi} \cdot P_i / R_i}{\left(\sum_{j \neq i}^J G_{mj} \cdot P_j + \sum_{l=1, l \neq m}^M \sum_{j=1}^{J_l} G_{lj} p_{lj} + N_0 \cdot w \right) / w} \quad (1)$$

式中 p_i 为用户 i 的发射功率, G_{mj} 表示用户 j 和基站 m 之间的链路增益, R_i 是用户 i 发射的比特速率, w 是扩频带宽, N_0 是背景噪声, 可以看作是白色高斯噪声. $\sum_{j \neq i}^J G_{mj} \cdot P_j$ 是本小区内其它用户产生的干扰. $\sum_{l=1, l \neq m}^M \sum_{j=1}^{J_l} G_{lj} p_{lj}$ 为外小区其它用户产生的干扰.

2.2 外环模型

本文在内环模型的基础上, 建立了外环的模型. 每一个用户的误帧率的大小都与该用户的功率大小有关. 调整外环的 E_b/I_0 目标设定值也就是调整了内环的发射功率. 在 cdma2000 中, 内环控制频率为外环控制频率的 16 倍 (最小值), 所以当我们调整外环时, 可以认为内环的 E_b/I_0 已经达到其目标设定值. 根据协议, 系统中的信道编码采用卷积码, 并用交织技术. 外环所需调整的 E_b/I_0 目标的设定值由帧内 16 个功率控制周期^[5,6]的 E_b/I_0 平均后得到.

设系统采用 QPSK 调制, 则未经编码的传输 BER 为^[7]

$$\text{BER} = 2Q(\sqrt{E_b/I_0})[1 - (1/4)Q(\sqrt{E_b/I_0})] \quad (2)$$

而经过编解码后, 考虑编码增益^[8], 误码率变为

$$\text{BER} = 2Q(\sqrt{(E_b/I_0) \cdot 10^{0.1A}})[1 - (1/4)Q(\sqrt{(E_b/I_0) \cdot 10^{0.1A}})] \quad (3)$$

其中 A 为编码增益.

设帧长为 $T(\text{ms})$, 信息率为 $R(\text{bps})$, 每一帧中的信息位个数为 TR , 则 FER' 为

$$\text{FER}' = 1 - (1 - \text{BER})^{\text{TR}} \quad (4)$$

(4) 式的物理意义是, 当一帧中有一个信息位出错时, 则整个帧出错. 令 $B = 10^{0.1A}$, 则 FER' 与 E_b/I_0 之间的换算关系为

$$\text{FER}' = 1 - \{1 - 2Q(\sqrt{(E_b/I_0) \cdot B})[1 - (1/4)Q(\sqrt{(E_b/I_0) \cdot B})]\}^{\text{TR}} \quad (5)$$

每来一个数据帧统计一次 FER , 统计范围的长度为 N . 即就是当接收到一个数据帧后, 我们考虑当前及以前的 $N-1$ 个数据帧的接收情况, 并统计出当前时刻的 FER ; 如此滚动统计, 得到每一个接收周期的 FER . 由于各帧在时间上的先后性, 统计范围内每一个帧对 FER 的影响各不相同: 当前数据帧对 FER 的影响最大, 而越早的帧对 FER 的影响越小. 所以应该为统计范围内的每一个数据帧赋予不同的权值, 统计时综合考虑它们对 FER 的影响, 才能得到意义明确、符合实际的 FER .

在我们的模型中, 将各帧的加权因子设计成等比数列, 按照时间从晚到早的顺序分别为 $1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{N-1}$, 其中 $0 < \alpha < 1$. 于是, 可用下面的式子估计当前时刻的误帧率:

$$\hat{\text{FER}} = \text{FER}_0 \cdot \alpha + (1/S)[1 - 0.5 \cdot (\text{sgn}(L - \text{FER}') + 1) - \alpha^N/2] \quad (6)$$

其中 FER' 是根据 (5) 式计算出最新数据帧的误帧率; $S = 1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{(N-1)}$, $1/S$ 的引入是为了归一化, 即将 $\hat{\text{FER}}$ 的值限制在 $[0, 1]$ 之间; FER_0 为上一时刻统计的误帧率; L 为 $(0, 1)$ 区间的随机数, 但在一次控制过程中作为不变的数. 当一个数据帧到来时, 用蒙特卡罗判断函数和 FER' 确定该帧是好帧 (0) 还是坏帧 (1). 判决式为 $1 - 0.5 \cdot (\text{sgn}(L - \text{FER}') + 1)$. 按

照 (6) 式估计 FER, 不需要存储统计范围内每个帧的接收情况, 也不需要新的数据到来时修改统计范围内各数据帧的加权因子, 而只需对当前数据帧的接收情况进行判断, 然后用 (6) 式更新 FER 即可。

对于 (6) 式, 我们有如下结论。

(1) 按照 (6) 式计算得到的误帧率, 其误差不超过 $\alpha^N/(2 \cdot S)$;

证明 每个数据帧接收后都通过蒙特卡罗函数进行判决是好帧 (0) 或坏帧 (1)。设统计范围内的判断结果分别为 $k_1, k_2, \dots, k_N$, $k_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, 其加权因子分别为 $1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{N-1}$ 。根据定义, 当前时刻 (0 时刻) 的 FER 为

$$\text{FER}(0) = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N k_i \cdot \alpha^{i-1} = \frac{1}{S} (k_1 + k_2 \cdot \alpha + \dots + k_N \cdot \alpha^{N-1})$$

假设在 1 时刻接收到一个新的数据帧, 通过 (6) 式对该数据帧接收情况的判断结果为 k_0 , 新的统计结果变为 $k_0, k_1, k_2, \dots, k_{N-1}$ 。则 1 时刻的 FER 为

$$\text{FER}(1) = \frac{1}{S} (k_0 + k_1 \cdot \alpha + \dots + k_{N-1} \cdot \alpha^{N-1}) = \frac{1}{S} k_0 + \alpha \cdot \text{FER}(0) - \frac{1}{S} \cdot k_N \cdot \alpha^N$$

又因为 k_N 的取值为 0 或者 1, 将上式与 (6) 式相比较, 可以求得误差 e 为

$$e = |\hat{\text{FER}} - \text{FER}(1)| = \begin{cases} \left| -\frac{\alpha^N}{2 \cdot S} \right| = \frac{\alpha^N}{2 \cdot S}, & k_N = 0 \\ \left| \frac{\alpha^N}{2 \cdot S} \right| = \frac{\alpha^N}{2 \cdot S}, & k_N = 1 \end{cases}$$

证毕

(2) 按照 (6) 式估计误帧率, 可通过适当选取 N 和 α , 使估计误差任意小。

证明 设 ε 是一个任意小的正数, 并设统计长度 N 不变, 令 $\alpha = \sqrt[N]{S \cdot \varepsilon}$ 。由结论 (1), 估计误差 $e = \alpha^N/(2 \cdot S)$ 。代入 α 有 $e = S \cdot \varepsilon/(2 \cdot S) = \varepsilon/2 < \varepsilon$; 同样假设加权因子 α 不变, 令统计长度 $N = \text{int}(\log_\alpha(\varepsilon \cdot S)) + 1$, 并且 $0 < \alpha < 1$, α^x 为减函数, 则统计误差 $e = \alpha^N/(2 \cdot S) < \alpha^{\log_\alpha(S \cdot \varepsilon)}/(2 \cdot S) = S \cdot \varepsilon/(2 \cdot S) = \varepsilon/2 < \varepsilon$ 。故可以通过选择合适的 N 和 α 任意缩小估计误差。

证毕

3 外环功率控制算法

根据内环模型以及本文所建立的外环模型, 提出了一种新的外环功率控制算法, 外环的调整采用综合优化来完成。此优化算法以 E_b/I_0 为控制变量, 从发射功率和误帧率两方面综合考虑, 让所有用户以最小的功率发射, 并使得误帧率逼近其目标值。该优化过程可描述为如下的数学形式。

目标函数:

$$\text{Min } P^T K_1 P + (\hat{\text{FER}} - \text{FER}_{\text{tar}})^T K_2 (\hat{\text{FER}} - \text{FER}_{\text{tar}}) \quad (7)$$

限制条件:

$$\left. \begin{aligned} G \cdot P &= E_b/I_0 \\ \mathbf{FER}' &= 1 - \{1 - 2Q(\sqrt{E_b/I_0 \cdot B})[1 - (1/4)Q(\sqrt{E_b/I_0 \cdot B})]\}^{TR} \\ \hat{\mathbf{FER}} &= \mathbf{FER}_0 \cdot \alpha + \frac{1}{S} \left[1 - 0.5 \cdot (\text{sgn}(L - \mathbf{FER}') + 1) - \frac{\alpha^{N-1}}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 $\hat{\mathbf{FER}}$ 、 $\mathbf{FER}_{\text{tar}}$ 、 $\mathbf{FER}'$ 、 E_b/I_0 、 P 和 P_{max} 均为向量: $\hat{\mathbf{FER}} = (\hat{\mathbf{FER}}_1, \hat{\mathbf{FER}}_2, \dots, \hat{\mathbf{FER}}_J)^T$, $\mathbf{FER}' = (\mathbf{FER}'_1, \mathbf{FER}'_2, \dots, \mathbf{FER}'_J)^T$ 和 $\mathbf{FER}_{\text{tar}} = (\mathbf{FER}_{1\text{tar}}, \mathbf{FER}_{2\text{tar}}, \dots, \mathbf{FER}_{J\text{tar}})^T$ 分别为 J 个用户的 FER, $\mathbf{FER}'$ 和 $\mathbf{FER}_{\text{tar}}$ 所组成的向量, $E_b/I_0 = ((E_b/I_0)_1, (E_b/I_0)_2, \dots, (E_b/I_0)_J)^T$ 为各用户 E_b/I_0 组成的向量, $P = (P_1, P_2, \dots, P_J)^T$ 和 $P_{\text{max}} = (P_{\text{max}1}, P_{\text{max}2}, \dots, P_{\text{max}J})^T$ 分别为发射功率及最大可发射功率向量, $B = (B_1, B_2, \dots, B_J)$ 为编码增益向量.

定义对角阵 G :

$$G = \begin{bmatrix} \frac{G_{m1}/R_1}{(G_1+N_0 \cdot w)/w} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{G_{m2}/R_2}{(G_2+N_0 \cdot w)/w} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{G_{mJ}/R_J}{(G_J+N_0 \cdot w)/w} \end{bmatrix}$$

$$G_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^J G_{kj} P_j + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq m}}^M \sum_{j=1}^{J_l} G_{lj} P_{lj}, \quad i = 1, 2, \dots, J$$

目标函数中的第一项保证了用户的发射功率最优, 而第二项保证了所有用户的 FER 与 $\mathbf{FER}_{\text{tar}}$ 的差值最小. K_1, K_2 为表示权系数的正对角阵, 它们的大小反映了系统对功耗和 FER 的相对重视程度. 在优化的过程中, 系统需要存储上一时刻 FER 的大小. 这个优化问题目前存在成熟的解算方法和数值解算软件, 因此这一优化控制过程易于实现.

4 仿真验证

为了验证上述算法的性能, 我们进行了计算机仿真. 系统用户数取为 10, 然后给出其中一个用户的性能仿真结果. 内环功控采用固定步长 (1dB)^[5,6]. 我们在信道模型中不仅需要考虑到阴影和路径损失所引起的长期衰落, 而且要考虑由多径传播引起的短期衰落^[5,6], 长期衰落为: $L = r^{-\alpha} \cdot 10^{\zeta/10}$ 其中 r 为基站与用户之间的距离, α 为路径损失因子, ζ 是一种符合高斯分布的随机变量, 均值为 0, 方差为 σ , σ 取值一般为 4~10dB^[5], 这里取 8dB. 路径指数取 4. 短期衰落可由路径强度的 Nakagami- n ^[9] 分布推导出来: 基站接收机使用了 n 分支的天线分级接收, 每一个分支的衰落是独立的 Rayleigh 分布: 短期衰落分级数 $n = 2$, fT_p 在 $[0.01 \sim 0.05]$ 上均匀分布^[9], 图中取 $fT_p = 0.05$, f 表示多谱勒速率, T_p 表示迭代周期. 扩频带宽 $w = 1.2288\text{MHz}$, N_0 为 10^{-14}mW/Hz . 以语音业务为例, 目标 FER 取为 0.01, 开始设定的目标 $E_b/I_0 = 7\text{dB}$, 初始发射功率为 20dBm, 手机允许的最大发射功率限制为 25dBm. 语音业务的速率为 14.4kbps, 用户移动的速率为 50~120km/h. FER 的统计长度 $N = 20$, 加权因子 $\alpha = 0.75$, 加权因子 $K_1 = 0.45$, $K_2 = 0.55$.

我们进行了 160000 帧的仿真. 为了使图示清晰, 我们仅截取了初始的 200 帧. 图 1 给出了 E_b/I_0 随帧数的变化曲线. 其中点划线描述的是按照本文提出的优化算法算出的 E_b/I_0 门

限值, 而实线则是内环实际 E_b/I_0 在每一帧内的平均值。根据图中虚线, 统计得出外环的均值为 6.8973dB, 比较接近设定的目标值。这个结果是合理的。而内环在一帧中的 E_b/I_0 平均值对 E_b/I_0 门限值能很好地跟踪, 跟踪误差最大为 0.2068dB。

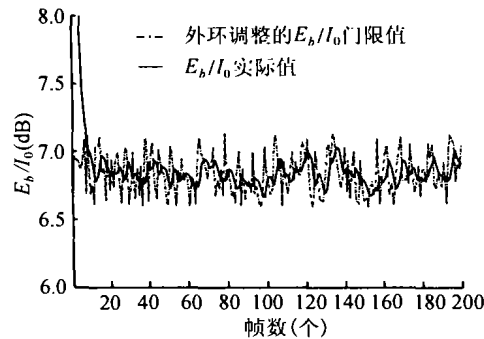


图 1 E_b/I_0 随帧数的变化曲线

图 2 给出了 FER 随帧数的变化曲线, 其中点划线为目标误帧率 FER_{tar} , 实线为 FER 的实际值。从仿真统计得出, FER 的长期平均值为 0.0096, 方差为 0.0029, 对目标 FER 的跟踪误差为 4%。图 3 给出了传统的外环算法统计出的 FER 随着帧的变化曲线, 仿真统计出 FER 的长期平均值为 0.0083, 方差为 0.1746, 对目标 FER 的跟踪误差为 17%, 与本文提出的模型化算法相比, 本文算法具有较小的跟踪误差, 因此具有更好的跟踪性能。

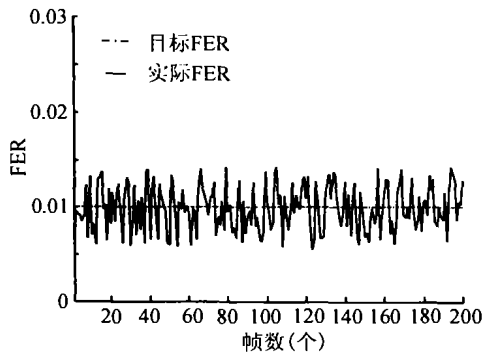


图 2 误帧率随着帧数的变化曲线

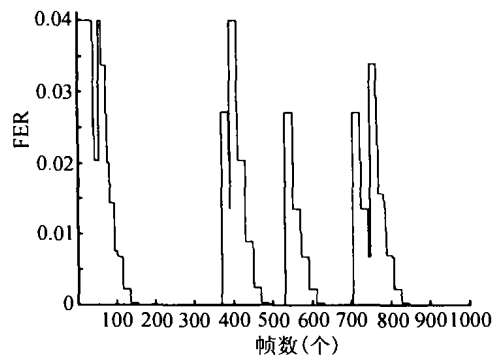


图 3 误帧率随着帧数的变化曲线

图 4 给出了系统在各帧期间的发射功率曲线, 其中点划线为求解优化式 (11)、(12) 式得出的发射功率, 它是系统在下一帧的理想发射功率 (即如果在下一帧所有的客观条件保持不变, 使目标函数 (11) 式最优所需的发射功率)。它是系统对于发射功率的估计和期望。发射功率优化值的均值为 9.4513 dBm, 图中实线为每一帧发射功率的平均值。从曲线上可以看出, 实线对点划线的跟踪情况良好。这说明在优化中, 使用发射功率优化值来评价发射功率, 是准确和有效的。图 5 给出了传统的外环算法系统在各帧期间的发射功率曲线, 仿真统计得出发射功率的均值为 17.5217dBm。因此本文的算法具有较小平均发射功率, 平均发射功率节省了 46.06%, 在很大程度上增加了系统容量。

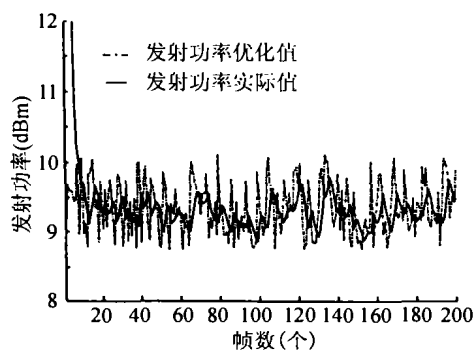


图 4 发射功率随着帧数的变化曲线

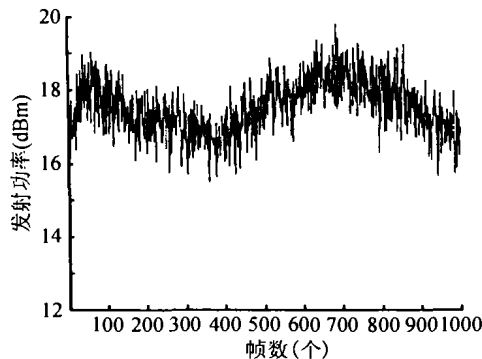


图 5 发射功率随着帧数的变化曲线

从以上各图可以看到,传统的算法在没有系统模型的基础上,发射功率与 FER 相分离的优化算法,为了达到目标 FER 的同时,很大程度上浪费了内环的发射功率。本文模型化的优化算法综合考虑了发射功率和 FER 两方面的因素。在优化时可以通过调整相应的权系数,完成发射功率和 FER 之间的平衡,在满足 FER 要求的前提下,最大限度地节省移动台的发射功率,增加系统容量。此方法可以满足不同的系统性能需求,因而具有较大的灵活性。

5 结 论

本文针对 cdma2000 系统,提出了反向外环的模型,并首次将内环和外环结合起来,对系统 FER 的计算提出了一种简洁而又节省存储空间的估计方法,然后对该方法的特性和误差进行了分析证明。在外环控制的优化过程中,综合考虑了发射功率和 FER 这两方面的因素,完成发射功率和 FER 之间的平衡。因此,该方法能满足不同的业务性能需求,有较大的灵活性。仿真结果证明了该方法的准确性和有效性。

参 考 文 献

- [1] J. Zander, Performance of optimum transmission power control in cellular radio systems, IEEE J. on SAC, 1992, 14(1), 57-62.
- [2] R. D. Yates, A framework for uplink power control in cellular radio system, IEEE J. on SAC, 1995, 13(7), 1341-1347.
- [3] T. H. Hu, M. Max, K. Liu, Power control for wireless multimedia CDMA systems, Electron. Lett., 1997, 33(2), 660-662.
- [4] A. J. Viterbi, 著, 李世鹤, 等译, CDMA 扩频通信原理, 北京, 人民邮电出版社, 1997, 第六章.
- [5] TIA/EIA/IS-2000-2a(Revision of TIA/EIA/IS-2000.2), Mar. 2000.
- [6] TIA/EIA/IS-2000-1XEV(Revision 4.0), Aug. 9, 2000.
- [7] 曹志刚, 钱亚生, 现代通信原理, 北京, 清华大学出版社, 1998, 第十章.
- [8] 祁玉声, 邵世祥, 编著, 现代移动通信系统, 北京, 人民邮电出版社, 1999, 第六章.
- [9] P. R. Chang, B. C. Wang, Adaptive fuzzy power control for CDMA mobile radio systems, IEEE Trans. on Veh. Technol., 1996, 45(2), 225-236.

THE MODEL OF REVERSE OUTER-LOOP POWER CONTROL AND ITS OPTIMIZATION

Lü Ling Zhu Shihua Wang Yonggang

(Dept. of Info. and Comm. Eng., Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract An out-loop power control model for the cdma2000 reverse link is established, and the relationship between the inner-loop and the out-loop is revealed. As a result, a simple estimation method for Frame Error Rate (FER) is proposed and its performance is analyzed. Based on the model, an optimization algorithm for the out-loop power control is proposed which aims to jointly reduce the transmit power and FER variation. It can guarantee target FER while keeps transmit power at the minimum level, resulting an optimal system performance. The algorithm allows the weighting factors to be adjusted to satisfy different Quality of Service (QoS) requirements, hence provides great flexibility. Finally, computer simulation is performed to show that the model is appropriate and the optimization algorithm is effective and correct.

Key words Out-loop power control, cdma2000, Mobile communications, Frame error rate

吕 玲: 女, 1975 年生, 博士生, 研究领域为第三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.

汪勇刚: 男, 1975 年生, 博士生, 研究领域为第三代移动通信系统的无线资源管理以及信道管理方面的研究.