

文章编号:1001-9081(2006)11-2547-03

CDMA 中一种改进的分布式功率控制算法

叶嘉鲁,李福德,肖伟

(西安理工大学自动化与信息工程学院,陕西 西安 710048)

(yejialu@126.com)

摘要:在 CDMA 系统传统分布式功率控制算法的基础上,引入博弈论,设计合适的代价函数,基于此推导出一种改进的分布式功率控制算法,并证明了新算法有唯一的收敛点。仿真结果表明,该算法比传统算法收敛速度提高了大约一倍。在信干比轻微降低时,用户的发射功率大大降低。

关键词:CDMA;功率控制;非合作博弈;代价函数

中图分类号:TN914.53; TN915.07 **文献标识码:**A

A new distributed power control algorithm in CDMA communication system

YE Jia-lu, LI Fu-de, XIAO Wei

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on traditional CDMA power control balancing algorithm, a non-cooperative game was introduced. An appropriate cost function was chosen and a new algorithm for distributed power control was proposed. Practical applications prove that the proposed algorithm converges at a unique fixed point. Simulation results demonstrate that the speed of the new algorithm is about two times that of the traditional one. What's more, the substantial power declines greatly while slightly reducing the achieved SIR.

Key words: CDMA; power control; noncooperative games; cost function

CDMA 系统是干扰受限系统,干扰的大小直接影响系统容量和通信质量。功率控制技术是 CDMA 系统克服“多址干扰”、“远近效应”、维护用户所需的服务质量从而走向实用化的关键技术^[1]。

功率控制可分为集中式功率控制和分布式功率控制。集中式功率控制算法有着集中式算法的种种固有缺点,不适合实际应用,因此人们提出了分布式功率控制算法^[2]。

本文在前人提出的分布式功率控制算法的基础上引入博弈论,改进了传统分布式功率控制算法,明显减小了用户发射功率,加快了算法的收敛速度。

1 传统分布式功率控制算法

CDMA 移动通信系统的分布式功率控制算法主要是指分布式信干比(Signal to Interference Ratio, SIR)平衡算法或称为功率平衡算法。此类算法通过若干次迭代运算,使系统内所有移动台的信干比收敛到一个共同的水准,也就是系统平衡信干比水准^[2]。

考虑一个典型的 CDMA 无线通信系统。假设 CDMA 移动通信系统有一个基站和 N 个移动用户,不考虑小区间干扰。 G 表示 CDMA 扩频系统的扩频增益, h_i 表示用户 i 的链路增益($h_i = \frac{const}{d_i^4}$, $const$ 为一正常数, d_i 表示用户 i 到基站的距离)。假定信道为高斯信道, σ^2 为接收端的信道噪声功率,用户 i 的发射功率表示为 p_i ,其信干比表示为^[3,4]:

$$\gamma_i = \frac{Gh_i p_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2} \quad (1)$$

分布式功率控制算法的功率调整策略可表示为:

$$p_i^{(n+1)} = \max(0, \min(\Phi(p_i^{(n)}, \gamma_i^{(n)}), p_{\max})) \quad (2)$$

式(2)中 $p_i^{(n+1)}$ 为第 i 个用户第 $n+1$ 次迭代的发射功率, $p_i^{(n)}$ 为第 n 个用户第 n 次迭代的发射功率, $\gamma_i^{(n)}$ 为第 i 个用户第 n 次迭代时的信干比, p_{\max} 为第 i 个移动用户最大允许发射功率^[2]。

一个可行的分布式功率控制算法就是要通过用户当前信干比和当前传输功率 $p_i^{(n)}$ 指导用户下一次发射的功率 $p_i^{(n+1)}$, 且 $p_i^{(n+1)}$ 不能超过用户最大允许发射功率 p_{\max} , 但也不可为负值。并且算法必须使各个用户的信干比达到系统要求的最小信干比,同时还必须拥有较快的收敛速度。

一个较为优秀的传统分布式功率控制算法的功率更新迭代公式如下^[2]:

$$p_i^{(n+1)} = \left(\frac{\gamma_i^{tar}}{\gamma_i^{(n)}} \right) p_i^{(n)} \quad (3)$$

将该算法作为参照,以说明本文所提出算法的优越性。

2 基于博弈论的分布式功率控制算法

基于信干比平衡的分布式功率控制可以看作一个非合作博弈^[3,4]。记第 i 个用户的代价函数为 $J_i(p_i, \gamma_i(P))$, 功率向量为 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_N]^T$ 。达到纳什均衡时的功率向量应满足: $J_i(p_i^*, \gamma_i(P^*)) \leq J_i(p_i, \gamma_i(p_1^*, p_2^*, \dots, p_{i-1}^*, p_i^*, p_{i+1}^*, \dots, p_N^*))$, $\forall p_i, i = 1, 2, \dots, N$ 。就是说单个用户 i 不能通过偏离功率 p_i^* 来降低自身的代价^[5,6]。对单个用户来说,信干比越高,服务质量越好。但信干比的提高是以增加电池的消耗,增大对其他用户的干扰为代价。我们基于用户发射功率和信干比来定义用户的代价函数,并且考虑到代价函数

收稿日期:2006-05-16;修订日期:2006-06-27

作者简介:叶嘉鲁(1982-),女,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向:通信信号处理、CDMA 功率控制;李福德(1948-),男,河南许昌人,教授,主要研究方向:通信信号处理、大规模集成电路;肖伟(1981-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:CDMA 扩频通信。

必须是非负的凸函数,存在一个正的最小值,定义如下函数作为用户 i 的代价函数:

$$J_i(p_i, \gamma_i) = \lambda_i p_i + (\gamma^{tar} - \gamma_i)^2 \quad (4)$$

式(4)中 λ_i 正比于用户的链路增益 h_i , $\lambda_i = k \cdot h_i$, k 为一正常数, γ^{tar} 为目标信干比.由于纳什均衡点是使代价函数取得极小值的点,所以在纳什均衡点式(4)应满足^[5,6]:

$$\lambda_i - 2(\gamma^{tar} - \gamma_i) \frac{Gh_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2} = 0 \quad (5)$$

定义:

$$I_i(P_{-i}) = \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j + \sigma^2 \quad (6)$$

式(6)代入式(5)得:

$$\gamma_i = \gamma^{tar} - \frac{\lambda_i I_i(P_{-i})}{2Gh_i} \quad (7)$$

式(1)代入式(7)得:

$$p_i = \frac{\gamma^{tar} I_i(P_{-i}) - \lambda_i I_i^2(P_{-i})}{Gh_i} \quad (8)$$

所以用户发射功率的迭代公式可表示为:

$$p_i^{(n+1)} = \begin{cases} p_{max}, & p_i > p_{max} \\ \frac{\gamma^{tar} I_i(P_{-i}) - \lambda_i I_i^2(P_{-i})}{Gh_i}, & 0 \leq p_i \leq p_{max} \\ 0, & p_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

由式(1)和式(6)得:

$$I_i(P_{-i}) = \frac{Gh_i p_i}{\gamma_i} \quad (10)$$

代入式(8)可得:

$$p_i = \gamma^{tar} \frac{p_i}{\gamma_i} - \frac{\lambda_i}{2} \left(\frac{p_i}{\gamma_i} \right)^2 \quad (11)$$

所以用户发射功率的迭代公式也可表示为:

$$f_i(p_i^{(k)}) = p_i^{(n+1)} = \begin{cases} p_{max}, & p_i > p_{max} \\ \gamma^{tar} \frac{p_i^{(n)}}{\gamma_i^{(n)}} - \frac{\lambda_i}{2} \left(\frac{p_i^{(n)}}{\gamma_i^{(n)}} \right)^2, & 0 \leq p_i \leq p_{max} \\ 0, & p_i < 0 \end{cases} \quad (12)$$

比较式(3)和式(12)可以发现,传统分布式功率控制算法是线性算子,而引入博弈论后,在此基础上增加了功率的二次项,算子变成了非线性算子.与非线性算子相比,非线性算子通常有更快的收敛速度.分析式(8)和式(11)可以看出它们的相同之处是每一步只需要测量一个量,对用户来说这是可行的.不同之处是式(11)的迭代初始值不能为零,而式(8)的迭代初始值没这个要求,这是因为在用户发射功率为零时,由于 $I_i(P_{-i})$ 中包含信道噪声功率,是一非零量,而 γ_i 却为零.

3 新算法的收敛性和收敛点的唯一性

定理 1 若线性方程组 $AX = b$ 的系数矩阵 A 按行严格

对角占优,迭代法对任意给定初值均收敛.即满足: $\sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}| < |a_{ii}|, i = 1, 2, \dots, n$.迭代法收敛^[7].

传统分布式功率控制算法的代数方程为:

$$-p_i + \frac{\gamma_i^{tar}}{Gh_i} I_i(P_{-i}) = 0 \quad (13)$$

用矩阵表示为 $AP = b$,

$$A = \begin{bmatrix} -1 & \frac{\gamma^{tar}}{Gh_1} H_2 & \dots & \frac{\gamma^{tar}}{Gh_1} h_N \\ \frac{\gamma^{tar}}{Gh_2} h_1 & -1 & \dots & \frac{\gamma^{tar}}{Gh_2} h_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\gamma^{tar}}{Gh_N} h_1 & \dots & \frac{\gamma^{tar}}{Gh_N} h_{N-1} & -1 \end{bmatrix}$$

$$b = \left(\frac{-\gamma^{tar} \sigma^2}{Gh_1} \dots \frac{\gamma^{tar} \sigma^2}{Gh_N} \right)^T$$

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_N)^T$$

在实际的扩频通信中, G 是相当大的值, $\sum_{j=1, j \neq i}^N$

$\left| \frac{\gamma^{tar}}{Gh_i} h_j \right| < | -1 |, i = 1, 2, \dots, N$ 在绝大多数情况是满足的,所以传统分布式功率控制方法收敛.

本文提出的基于博弈论的分布式功率控制迭代算法的代数方程为:

$$-p_i + \frac{\gamma_i^{tar}}{Gh_i} I_i(P_{-i}) - \frac{\lambda_i I_i^2(P_{-i})}{2G^2 h_i^2} = 0 \quad (14)$$

比传统的迭代方法多了项 $\frac{\lambda_i I_i^2(P_{-i})}{2G^2 h_i^2}$, 所以其系数矩阵与

传统方法相比多了正比于 $h_j^2, h_i \sigma^2$ 和 σ^4 的项.由于链路增益 h_i 是相当小的值(10^{-3}),信道中的高斯噪声也是相当小的量(10^{-10}),对系数矩阵影响不大.新算法的系数矩阵仍然为严格的对角占优矩阵,所以本文所提出的基于博弈论的分布式功率控制迭代算法也是收敛的.

定理 2 当函数是标准函数时,若其收敛,则必有唯一收敛点^[7-9].

标准函数的定义如下:

- 1) 非负性, $f(x) \geq 0$;
- 2) 单调性, $\forall x_1 \geq x_2$, 有 $f(x_1) \geq f(x_2)$;
- 3) 伸缩性,对常数 $\alpha > 1$, 有 $\alpha f(x) \geq f(\alpha x)$

证明 由式(12)的定义可知函数 $f_i(p_i^{(k)})$ 满足式(1).

$$\text{设 } p \geq p', q_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j, q'_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p'_j,$$

$$\begin{aligned} f_i(p) - f_i(p') &= \frac{\gamma^{tar}}{Gh_i} (q_i - q'_i) - \frac{\lambda_i}{2G^2 h_i^2} (q_i^2 - (q'_i)^2 + 2\sigma^2 (q_i - q'_i)) \\ &= \left(\frac{\gamma^{tar}}{Gh_i} - \frac{\lambda_i \sigma^2}{G^2 h_i^2} \right) (q_i - q'_i) - \frac{\lambda_i}{2G^2 h_i^2} (q_i + q'_i) (q_i - q'_i) \end{aligned} \quad (15)$$

若上式值非负,则有:

$$\frac{\gamma^{tar} Gh_i}{\lambda_i} \geq \sigma^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1, j \neq i}^N h_j (p_j + p'_j) \quad (16)$$

若定义 $I_i(p) = \max(q_i, q'_i) + \sigma^2$, 式(16)成立的充分条件是:

$$I_i(p) \leq \frac{\gamma^{tar} G}{k}, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (17)$$

该充分条件相当于规定了干扰的上限.在实际的 CDMA 扩频系统中 $\gamma^{tar} G$ 是一个相当大的值,该充分条件很好满足,所以功率函数是单调递增的.

$$\begin{aligned} \alpha f_i(p) - f_i(\alpha p) &= \frac{\gamma^{tar}}{Gh_i} (\alpha - 1) \sigma^2 - \frac{\lambda_i}{2G^2 h_i^2} [(\alpha - \alpha^2) q^2 + (\alpha - 1) \sigma^4] \end{aligned}$$

$$= \frac{(\alpha - 1)\lambda_i}{Gh_i} \left[\frac{\gamma^{tar} \sigma^2}{\lambda_i} - \frac{\sigma^4}{2Gh_i} + \frac{\alpha}{2Gh_i} q_i^2 \right] \quad (18)$$

因为, $\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \right)^2 = I_i^2(p) - 2\sigma^2 \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \right) - (\sigma^2)^2$ (19)

式(18)可以写为:

$$\alpha f_i(p) - f_i(\alpha p) = \frac{(\alpha - 1)\lambda_i}{Gh_i} \left[\frac{\gamma^{tar} \sigma^2}{\lambda_i} - \frac{\sigma^4}{2Gh_i} + \frac{\alpha}{2Gh_i} (I_i^2(p) - 2\sigma^2 q_i - (\sigma^2)^2) \right] \quad (20)$$

式(20)对所有的 $\alpha > 1$ 都为非负值的充分条件是:

$$I_i^2(p) + \frac{2Gh_i \gamma^{tar} \sigma^2}{\lambda_i} \geq 2\sigma^2 \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j p_j \right) + 2(\sigma^2)^2 = 2\sigma^2 I_i(p) \quad (21)$$

式(21)等价于:

$$(I_i(p) - \sigma^2)^2 + \frac{2Gh_i \gamma^{tar} \sigma^2}{\lambda_i} - (\sigma^2)^2 > 0 \quad (22)$$

由于 $\sigma^2 > 0$, 所以上式成立的充分条件是:

$$\sigma^2 < \frac{2G\gamma^{tar}}{k}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (23)$$

该充分条件规定了噪声功率的上界。因为 $I_i(p) > \sigma^2$, 只要满足: $I_i(p) \leq \frac{G\gamma^{tar}}{k}, \sigma^2 < \frac{G\gamma^{tar}}{k}, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 自然成立。基于相同的原因, 函数 $f_i(p_i^{(k)})$ 是标准函数。

由以上证明可以得出, 本文所提出的新的分布式功率控制算法存在唯一的收敛点。

4 仿真分析

假定系统为单小区 CDMA 系统, 小区半径为 1000m, 20 个用户在小区中随机分布, 目标信干比 $\gamma^{tar} = 5$, 信道噪声 $\sigma^2 = 5e^{-15} W$, 用户初始发射功率 $p_{min} = 1 \times 10^{-15} W$, $\lambda_i = k \cdot h_i, k$ 为一正常数, 迭代次数为 $M = 60$ 。

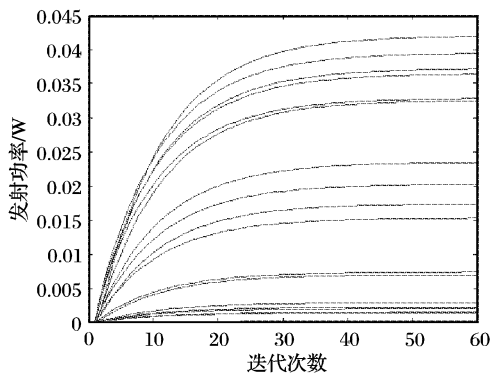


图1 传统算法用户的发射功率

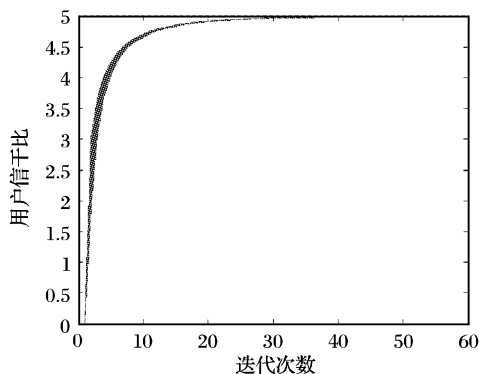


图2 传统算法用户的信干比

从仿真可以计算出, 达到平衡时, 传统算法用户的平均发射功率 $\bar{p} = 0.016 W$, 平均信干比 $\bar{sir} = 4.9988$, 新算法用户的平均发射功率 $\bar{p} = 0.0078 W$, 平均信干比 $\bar{sir} = 4.7457$ 。可以得出信干比的轻微降低(降低 5.09%), 能够换来用户发射功率的极大降低(降低 51.5%), 并且所有用户不论距基站远近均达到相同的信干比, 功率控制结果公平(如图 4 所示)。

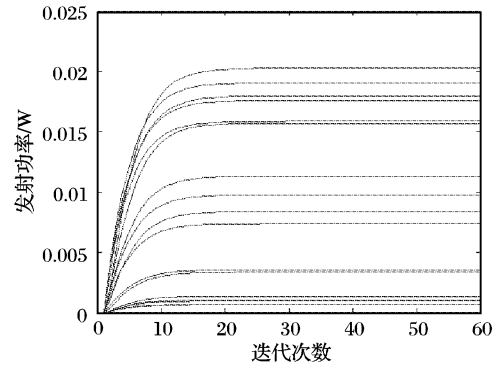


图3 新算法用户的发射功率

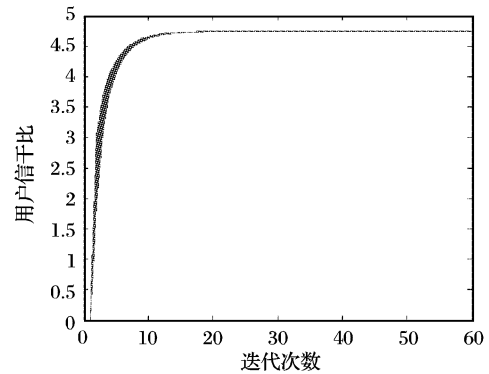


图4 新算法用户的信干比

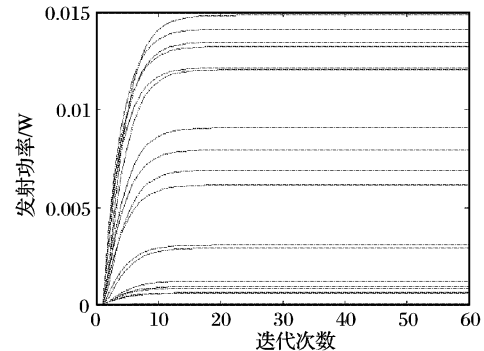


图5 λ_i 取固定值时用户的发射功率

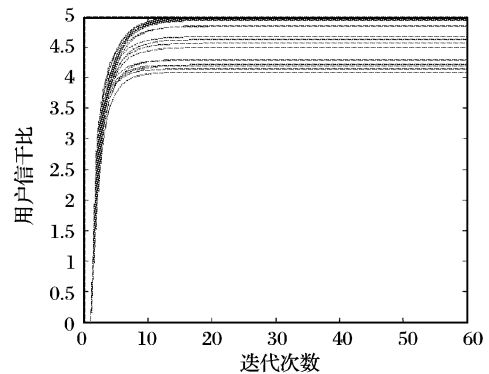


图6 λ_i 取固定值时用户的信干比

若选 λ_i 为一固定值, 则用户的信干比轻微降低(降低 6.92%) 时, 发射功率同样有大幅下降(降低 62.33%) (如图 5

(下转第 2553 页)

表达,图 5 中主节点路由表中的在线环内节点数组中的元素

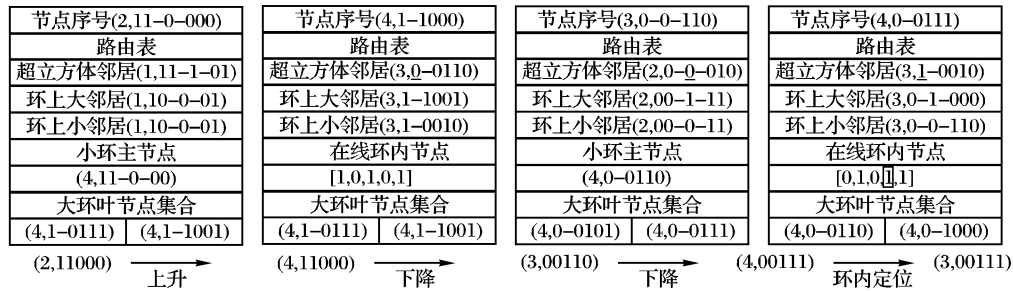


图 5 BSNCCC 路由算法示例

2.6 模拟实验

本模拟实验程序运用 Java 语言编写,在带环超立方体维数为 $d = 3 \sim 8$ (节点个数为 $24 \sim 2024$) 中,模拟了 BSNCCC 和 Cycloid 两种路由算法,使每个在线节点处理 $n/4$ 个查询请求的任务,模拟实验结果如图 6 所示,图中分别显示了 BSNCCC 和 Cycloid 算法的平均查找步长。

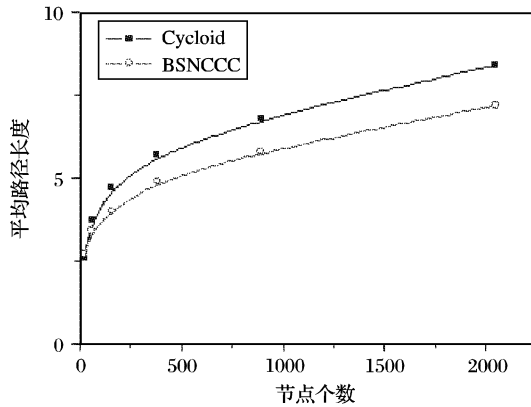


图 6 两种路由算法模拟实验结果

在相同的网络规模下,路由算法查询的步长越短,查询的效率就越高。从图 6 中可知,当网络节点规模较小时,两种算法的步长没有明显差别,如带环立方体的维数 $d = 3$ 时,Cycloid 的路由平均步长为 2.6,BSNCCC 的路由平均步长为 2.7;当 $d = 4$ 时,Cycloid 的路由平均步长为 3.7,BSNCCC 的路由平均步长为 3.4;当 $d = 6$ 时,Cycloid 的路由平均步长为 5.7,BSNCCC 的路由平均步长为 4.9;当 $d = 8$ 时,Cycloid 的路由平均步长为 8.4,BSNCCC 的路由平均步长为 7.2。这表明随着网络规模的增大,BSNCCC 比 Cycloid 路由算法查询效率更优。

在节点的负载均衡问题上,两种算法都是将资源信息映

射到 ID 值与自己相等或最接近的节点上,但是 BSNCCC 的节点在环内序号是上线时由主节点根据节点分布情况动态分配的,主节点可以根据节点负载情况实时分配上线节点的环内序号,Cycloid 中节点的环内序号是通过 DHT 生成的 ID 值确定,负载均衡由上线节点序号的分布情况决定,不能根据实际情况调整。显然,BSNCCC 节点负载比 Cycloid 更均衡。

参考文献:

- [1] <http://www.Gnutella.com>[EB/OL], 2006.
- [2] SHEN H, XU C, CHEN G. Cycloid: A constant degree and lookup-efficient p2p overlay network[A]. International parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS2004) [C]. Santa Fe, New Mexico, 2004.
- [3] 陈贵海, 须成忠, 沈海英, 等. 一种新的常数度数的 P2P 覆盖网络[J]. 计算机学报, 2005, 28(7): 1084 - 1095.
- [4] STOICA I, MORRIS R, KARGER D, et al. Chord: A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet Applications[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM[C]. San Diego, CA, USA, 2001.
- [5] ROWSTRON A, DRUSCHEL P. Pastry: Scalable, Distributed Object Location and Routing for Large scale Peer-to-Peer Systems[EB/OL]. <http://research.microsoft.com/ant/PAST/pastry.pdf>, 2001.
- [6] RATNASAMY S, FRANCIS P, HANDLEY M, et al. A scalable content-addressable network[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM [C], 2001. 329 - 350.
- [7] MALKHI D, NAOR M, RATAJZAK D. Viceroy: A scalable and dynamic emulation of the butterfly[A]. 21st ACM Symposium on Principles of Distributed Computing[C]. Monterey, California, USA, 2002.
- [8] KLEIS M, KLEIS, LUA EK, ZHOU X. Hierarchical Peer-to-Peer Networks using Lightweight SuperPeer Topologies[A]. ISCC2005[C], 2005.
- [9] CHEN G. P2P Overlay Networks of Constant Degree[A]. GCC2003, LNCS 3032[C], 2004. 412 - 419.

(上接第 2549 页)

所示)。但用户的信干比随着它与基站距离的增加而减小(如图 6 所示)是不公平的。所以 λ_i 取固定值时功率控制效果明显不如 $\lambda_i = k \cdot h_i$ 时的效果。同时从图 1, 图 3, 图 5 可以看出,传统分布式功率控制算法的收敛速度(30 次迭代达到收敛)明显比本文所提出的算法(15 次迭代达到收敛)慢。

参考文献:

- [1] 吴伟陵. 移动通信中的关键技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000.
- [2] FOSCHINI GJ, MILJANIC J. A Simple Distributed Autonomous Power Control Algorithm and its Convergence[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1993, 42(4): 641 - 646.
- [3] GOODMAN DJ, MANDAYAM NB. Power control for wireless data[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(4): 48 - 54.
- [4] SHAH V, MANDAYAM N, GOODMAN D. Power Control for Wire-

- less Data based on Utility and Pricing[A]. Proceedings of Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC'98)[C]. 1998, 3. 1427 - 1432.
- [5] FUDENBERG D, TIROLE J. Game theory [M]. Cambridge: MIT Press, 1991.
- [6] NASH J. Equilibrium Points in n-Person Games[A]. Proceedings of the National Academy of Sciences[C], 1950. 48 - 49.
- [7] (美) MATHEWS JH, FINK KD. 数值方法(Matlab 版)[M]. 第 3 版. 陈渝, 周璐, 钱方, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [8] YATES R. A framework for uplink power control in cellular radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(7): 1341 - 1347.
- [9] LEUNG KK, SUNG CW, WONG WS, et al. Convergence theory for a general class of power control algorithms[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications[C], 2001, 3. 811 - 815.