

文章编号: 1001-0920(2009)08-1266-03

基于粒子群的 CDMA 功率和速率联合控制算法

唐美芹¹, 关新平²

(1. 鲁东大学 数学与信息学院, 山东 烟台 264025; 2. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 提出了基于效用函数的 CDMA 网络下行链路的功率和速率联合控制最优化算法. 在这类算法中, 效用函数为非凸函数, 经典的最优化理论很难解决这类问题. 将粒子群优化方法应用于算法的非凸性设计, 并通过仿真算例证明了该算法能有效解决非凸优化问题, 且可保证系统的公平性.

关键词: 码分多址; 功率和速率控制; 效用函数; 非凸优化; 粒子群优化

中图分类号: TN915.02

文献标识码: A

Joint power and rate control algorithm in wireless CDMA networks based on particle swarm optimization

TANG Mei-qin¹, GUAN Xin-ping²

(1. School of Mathematics and Information, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: TANG Mei-qin, E-mail: meiqintang@yahoo.com.cn)

Abstract: This paper presents an optimization algorithm of a joint power and rate control in the downlink wireless code-division multiple access (CDMA) networks based on the network utility maximization framework. In the wireless context, the utility functions are non-concave, which makes the problem difficult to be solved by using the classical optimization theory. Particle swarm optimization(PSO) is applied to nonconvex design of the algorithm. Simulations show that the proposed algorithm can solve the nonconvex optimization problems efficiently and guarantee the fairness of the system.

Key words: Code division multiple access; Power and rate control; Utility function; Nonconvex optimization; Particle swarm optimization

1 引言

作为第二代无线通信系统, 码分多址(CDMA)得到迅速的发展. 在 CDMA 移动通信系统的设计和规划中, 无线资源(功率、速率、码字等)对系统的整体性能将产生重要影响, 并且居于管理和控制的中心地位. 因此, 多业务条件下的无线资源管理和控制便显得尤为重要.

目前, 经济模型广泛应用于有线网络^[1,2]和无线网络^[3-6]资源管理的研究. 在这些研究中, 效用函数假设为凹函数, 对应的问题为凸性规划问题. KKT 条件和对偶原理都能较好地解决凸性优化问题. 实际上, 无线网络和有线网络中实时流对应模型的目标函数或约束往往是非凹的, 使得最优化问题

变得难以解决. 作为无线 CDMA 系统中源控制的重要元素, 功率控制和速率分配制度已成为研究的热点^[3-6].

文献[3,4]研究了 CDMA 下行系统中的资源分配和基站联合分配问题, 基于动态价格机制提出一种联合算法, 但不能求出最优解. [5]基于效用函数提出一种动态的功率和速率联合控制算法. [6]考虑了 CDMA 中上行单元的功率和增益联合控制算法, 对每个移动单元分别执行一种最优化分配算法, 但没有考虑最大速率的约束.

本文基于效用最大化模型, 提出一种 CDMA 网络下行链路的功率和速率联合控制算法. 该算法考虑了非凸性, 是一种基于粒子群优化的有效算法.

收稿日期: 2008-09-15; **修回日期:** 2009-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60404022, 60604012); 国家杰出青年基金项目(60525303); 河北省自然科学基金项目(F2005000390, F2006000270).

作者简介: 唐美芹(1978—), 女, 山东烟台人, 讲师, 博士, 从事智能优化、网络非凸优化的研究; 关新平(1963—), 男(满族), 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 从事非线性时滞系统、网络智能优化等研究.

2 系统描述

考虑 CDMA 网络的下行链路. 假设有 N 个移动台处于活动状态, 第 i 移动台的传输功率、速率和信噪比分别为 P_i, R_i 和 γ_i , 功率向量表示为 $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$, 以 σ_i 表示移动台带宽范围内的背景噪声, 可看作高斯白噪声. 则移动台 i 的信噪比为

$$\gamma_i(P) = \frac{W}{R_i} \frac{G_{ii} P_i}{\theta \sum_{j \neq i} G_{ij} P_j + \sigma_i}. \quad (1)$$

其中: G_{ij} 是移动台 j 到移动台 i 所属基站的链路增益, θ 是下行链路中的正交因子.

假设 P_{\max} 是给定的功率约束, R_{\max} 是移动台可接收数据的最大速率. 每个移动台 i 都有其对应的效用函数 U_i , 它表示移动台 i 的满意程度, 定义为

$$U_i(R_i, P) = R_i f_i(\gamma_i(P)). \quad (2)$$

其中 f_i 是移动台 i 成功传输数据包的概率函数, 是关于 γ_i 的函数.

算法目标是求得每个移动台的最优功率和速率分配, 最大化系统的总效用. 其模型为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_i U_i(R_i, P); \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^N P_i \leq P_{\max}, P_i \geq 0, \\ & R_i \leq R_{\max}, R_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (3)$$

其中权值 $\tilde{\omega}_i$ 满足 $\tilde{\omega}_i > 0$, 用于保证网络吞吐量与公平性之间相平衡.

3 粒子群优化算法简述

粒子群优化算法^[7]是一种群智能优化算法, 它源于对鸟群捕食行为的模拟. 粒子群算法将每个个体看作寻优空间中的一个没有质量和体积的粒子, 通过对环境的学习和适应, 根据个体和群体飞行经验的综合分析结果来动态调整飞行速度. 在整个寻优过程中, 每个粒子的适应值取决于所选择的优化函数值. 每个粒子都有以下几类信息: 粒子当前所处的位置; 到目前为止粒子发现的最优位置 P_{best} , 可视为粒子的自身飞行经验; 到目前为止整个群体发现的最优位置 G_{best} (G_{best} 是 P_{best} 中的最优值), 可视为粒子群共享的飞行经验.

设粒子群体规模为 N , 每个粒子在 d 维空间中的坐标位置可表示为 $X_a = (x_{a1}, x_{a2}, \dots, x_{ad})$, 粒子 a ($a = 1, 2, \dots, N$) 的速度定义为每次迭代中粒子移动的距离, 表示为 $V_a = (v_{a1}, v_{a2}, \dots, v_{ad})$. 于是粒子 a 的飞行速度和位置可根据下式调整:

$$V_a^{k+1} = \omega V_a^k + c_1 \mathcal{R}_1 (P_{\text{best}_a^k} - X_a^k) + c_2 \mathcal{R}_2 (G_{\text{best}^k} - X_a^k), \quad (4)$$

$$X_a^{k+1} = X_a^k + V_a^{k+1}. \quad (5)$$

其中: ω 为惯性权重, \mathcal{R}_1 和 \mathcal{R}_2 为加速常数, $P_{\text{best}_a^k}$ 是当前粒子 a 的历史最优位置记录, G_{best^k} 是整个粒子群的历史最优位置记录.

粒子的运动由上述方程共同作用. 这种运动模式可用于各类寻优问题的求解.

4 功率和速率最大化算法

本文在算法设计中去除了连续性和可微性的假设, 提出一种基于粒子群功率和速率的联合控制算法. 该算法以集中式方式执行, 移动台通过与基站联系获得信息.

4.1 算法变量对应关系

粒子的位置对应于 CDMA 问题中的一组解, 粒子群算法求得的最优值就是最优功率和速率. 以 x_{ab} ($b = 1, 2, \dots, d$) 表示 CDMA 系统中每个移动台的功率, 粒子的维数 b ($b = 1, 2, \dots, d$) 对应于 CDMA 系统中的第 i 个移动台. 因此粒子 a 的 x_{ab} ($b = 1, 2, \dots, d$) 对应于移动台 i 的功率 $P_i(n)$, $i = 1, 2, \dots, M$. 粒子群中的速度 V_a 是求解最优化问题中的中间变量.

4.2 适应度函数设计

求解问题的目标是在功率和速率约束条件下最大化总效用. 根据式(5), 算法的适应度函数是功率和速率联合分配算法中的适应度函数, 定义如下:

$$F_f = \begin{cases} U, & \sum_{i=1}^N P_i \leq P_{\max}, R_i \leq R_{\max}; \\ U + V, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$U = \sum_{i=1}^N \tilde{\omega}_i U_i(R_i, P),$$

$$V = \mu_i (P_{\max} - \sum_{i=1}^N P_i) + \lambda_i (R_{\max} - R_i).$$

式中惩罚值 μ_i ($\mu_i > 0, \forall i$) 可解释为代价, 即当功率或速率的约束溢出时, 通过价格 μ_i 给予一定比例的惩罚.

4.3 最优化算法

基于粒子群的功率和速率联合控制算法步骤如下:

第 1 步: 初始化变量和参数. 设置迭代次数 k 初始值为零, 最大迭代次数为 K . 初始化粒子 X_a 的位置, 即初始化一组移动台的功率; 初始化速度 V_a 和粒子群中的基本参数 (ω, c_1, c_2).

第 2 步: 计算适应度函数值. 根据式(6), F_f 是粒子群算法中的适应度函数, 在 CDMA 系统中, 目标函数可通过从基站传输给移动台 i 的信息 $C_i(n)$ 计算得到. $C_i(n)$ 定义为

$$C_i(n) = \sum_{j \neq i} G_{ij} P_j. \quad (7)$$

第 3 步:更新查找点. 对于每个粒子, 将其适应值与其经历过的最好位置 $P_{best_a}^k$ 进行比较, 如果当前值劣于 $P_{best_a}^k$, 则将 $P_{best_a}^k$ 记为当前最好位置; 将其适应值与群体所经历过的最好位置 G_{best}^k 进行比较, 如果其适应值劣于 G_{best}^k , 则将 G_{best}^k 设置为群体最优位置. 根据式(4) 和(5) 更新当前粒子的位置和速度.

第 4 步:设置终止标准. 当系统达到最大迭代次数时, 便终止迭代. 此时, G_{best}^k 为最优解, $G_{best} = (x_1^{G_{best}}, \dots, x_d^{G_{best}})$. 于是 $(x_b^{G_{best}})^k$ 就是 CDMA 系统中所求的最优功率 $P_i^*(n)$. 由此可得到对应的最优速率 R_i^* .

5 仿真研究

在仿真研究中, 链路增益 G_{ij} 定义为 $G_{ij} = A_{ij}/d_{ij}^\alpha$. 其中: d_{ij} 是移动台 i 与移动台 j 之间的距离; A_{ij} 是对数形式的分布式随机变量, 其范围是 $[0, 8]$ dB. 粒子群中的基本参数为

$$\omega = 1, c_1 = c_2 = 2, V_{max} = 4;$$

无线系统中的参数为

$$P_{max} = 10 \text{ W}, R_{max} = 12000,$$

$$\theta = 0.5, \sigma_i = -70 \text{ dB}.$$

仿真 1 S 型函数

考虑效用函数为 S 型函数的形式, 即

$$U_i(\gamma_i(P)) = R_i \frac{1}{1 + e^{-a(\gamma_i(P)-b)}}.$$

分别设 $a = 1, b = 1$ 和 $a = 10, b = 10$. 算法的最大迭代次数设为 50. 图 1 给出了 S 型函数的收敛性情况. 从图中可以看出, 虽然目标函数不是凹函数, 但算法能很快达到收敛值, 需要的迭代次数不超过 20, 整个仿真过程所需时间只有几秒钟.

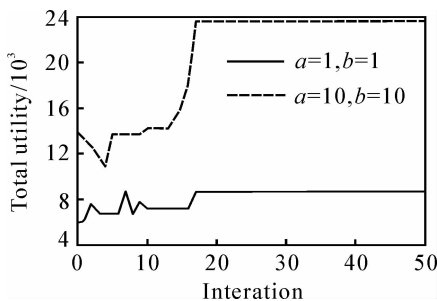


图 1 目标函数为 S 型函数时算法的收敛性

仿真 2 凸型函数

对于凸型函数

$$U_i(\gamma_i(P)) = R_i q (\gamma_i(P))^2,$$

考虑 q 分别为 1 和 10 的情况. 算法的最大迭代次数设为 300. 图 2 给出了凸型函数的收敛性情况. 从图中可以看出, 即使对于凸型函数, 算法也仅需 50 ~ 60 次迭代便达到收敛值.

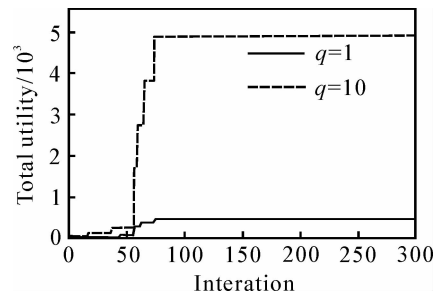


图 2 目标函数为凸型函数时算法的收敛性

仿真 3 公平性研究

考虑效用函数为凸型函数 $(\gamma_i(P))^2$ 的形式. 将 10 个具有凸型函数的移动台分为高优先级和低优先级, 两组所有移动台的吞吐量如图 3 所示. 可以看出, 高优先级的移动台可得到高的吞吐量, 低优先级的移动台可得到低的吞吐量. 因此可得出结论: 选择适当的权值, 可以平衡整个系统的吞吐量.

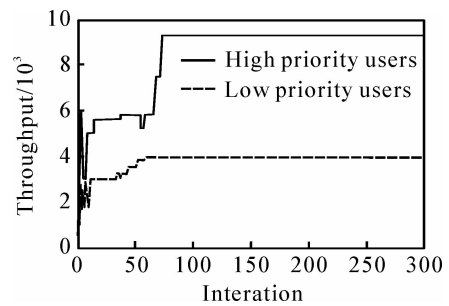


图 3 不同优先级对应的移动台的吞吐量

6 结 论

本文对无线 CDMA 中功率和速率控制的非凸优化问题进行研究, 提出了基于粒子群的 CDMA 功率和速率联合控制算法. 该算法允许效用函数是非凹函数, 如 S 型函数和凸型函数, 符合实际网络的情况. 通过给移动台分配优先级, 保证了系统的公平性. 仿真结果表明该算法是有效的, 且有较快的收敛速度和计算速度.

参考文献 (References)

[1] Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability[J]. J of the Operational Research Society, 1998, 49(3): 237-252.
 [2] Low S, Lapsley D E. Optimization flow control — I: Basic algorithm and convergence[J]. IEEE/ACM Trans on Networks, 1999, 7(6): 861-874.
 [3] Lee J W, Mazumdar R, Shroff N B. Joint power and data rate allocation for the downlink in multi-class CDMA wireless networks[C]. Proc of 40th Annual Allerton Conf on Communications Control and Computing, Monticello, 2002.