

文章编号: 1001-0920(2012)07-1096-05

一种基于混沌粒子群优化的OFDM系统资源分配算法

唐美芹¹, 马 锴², 魏新江¹, 樊保强¹, 翟金刚¹

(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: 针对无线多用户正交频分复用(OFDM)系统中功率分配问题, 提出一种基于效用函数最大化框架的资源分配算法. 在实际网络环境中, 此类最优化算法为非凸的, 利用经典最优化方法很难解决. 为此, 将智能优化中的粒子群方法应用到非凸优化算法设计中, 并针对粒子群优化容易陷入局部极值点的问题, 将Logistic混沌搜索嵌入PSO算法中, 提出混沌粒子群算法. 与同类算法相比, 所提出算法不仅有效解决了非凸性问题, 而且可以使系统具有更好的性能.

关键词: 正交频分复用; 资源分配; 效用函数; 粒子群; 混沌

中图分类号: TP273

文献标识码: A

OFDM resource allocation algorithm based on chaos particle swarm optimization

TANG Mei-qin¹, MA Kai², WEI Xin-jiang¹, FAN Bao-qiang¹, ZHAI Jin-gang¹

(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 a efficient resource allocation algorithm for the multiuser orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) system based on the network utility maximization framework. In the wireless context, the optimization problem is nonconvex, which makes the problem difficult to be solved by using the classical optimization theory. Particle swarm optimization(PSO) algorithm is applied to the design of the optimization problem. To improve the performance of standard PSO algorithm and avoid trapping to local excellent result, a chaos PSO(CPSO) algorithm is presented, which embeds logistic chaos into the PSO algorithm. The proposed algorithm can solve the nonconvex optimization problem efficiently and outforms other algorithms.

Key words: OFDM; resource allocation; utility function; particle swarm optimization; chaos

1 引言

正交频分复用(OFDM)是无线通信系统中一项关键的多载波传输技术, 已在许多领域得到了广泛应用^[1]. 信道时变的无线网络环境中, 动态资源分配算法是很重要的元素, 目前“基于梯度”算法的资源分配算法已经成为研究热点^[2-3], 其目标是最大化系统的效用函数. 在OFDM系统中, 按照不同的优化目标, 自适应OFDM算法主要分为速率自适应(RA)算法^[4-6]和增益自适应(MA)算法^[6-12]. 文献[4]在每个用户的给定比特率约束下最小化总的传输功率, 提出了非线性的优化算法, 具有较大的复杂度. [5]是基于

拉格朗日内插搜索法最小化系统的功率, 所需存储量较大. [6-12]提出了加权速率最大化问题. [6]提出了一种子优化算法, 算法中每个信道的功率为固定的, 仿真实验证明了算法能保证系统的性能损失较小. [7]提出了一种基于对偶原理的资源分配算法在, 仿真表明随着信道数的增加, 最优化问题的对偶沟可以快速变为零, 而在实际应用环境中, 对偶沟很难为零. [8]提出了一种多用户功率分配算法, 保证了系统的公平性. [9-10]考虑了多种实际约束的OFDM资源分配算法, 利用对偶原理提出了次优化算法. [11]讨论了单用户、多用户及多小区OFDM系统中的资源分

收稿日期: 2010-12-02; 修回日期: 2011-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61004063, 60904048); 山东省高等学校科技计划项目(J10LG14, J09LG27); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2010DX007); 鲁东大学引进人才基金项目(LY2010017).

作者简介: 唐美芹(1978—), 女, 博士, 从事智能优化、网络非凸优化控制的研究; 马锴(1983—), 男, 讲师, 博士, 从事网络控制的研究.

配问题. [12]考虑了多用户 OFDM 资源分配算法,提出了实用的自适应资源分配方法.

在基于网络效用函数最大化框架下的 OFDM 系统源控制研究中,其对应的问题为非凸优化控制问题,用标准的基于对偶的分布式算法或对偶分解方法来求解网络最优速率会导致算法的次优化,甚至会产生不可行解或导致系统不稳定.以往基于 OFDM 系统的资源分配算法的研究中^[4-12],对效用函数都作了严格假设,如连续性和可微性,将系统简化为凸优化问题,不能更好地应用到实际中.

本文去掉了对效用函数的严格假设,直接利用粒子群优化算法(PSO)^[13]来解决非凸性功率控制算法的设计.粒子群算法因其概念简单、容易实现和对优化函数要求不严等特点已经得到广泛应用,但由于缺乏种群多样性,粒子群算法容易出现“早熟”现象.混沌是非线性系统中的普遍现象,它具有一些特异性,如混沌运动能在一定范围内按其自身不重复地遍历所有状态,初始值条件极其微弱的变化会引起系统行为巨大的变化.基于上述两点,将混沌和粒子群优化相结合^[14-15],所提出的算法可以避免粒子群算法陷入局部解,仿真结果表明本文算法具有更好的性能.

2 系统描述

考虑多用户 OFDM 系统,接收端通过信道估计获得的信道信息状态对子载波进行功率分配,系统资源分配反馈给发射端,只要系统采集到信道信息即更新资源分配机制.假设接发双方都知道信道状态信息(CSI),并且子载波和功率分配信息能够通过单独的控制信道传送给每个用户.

多用户 OFDM 自适应分配算法的目的是找到最佳的功率,使得在给定的功率约束下系统的速率最大.系统模型描述为

$$\max \sum_{k,n} \omega_{k,n} R_{k,n}, \quad k = 1, 2, \dots, K, n = 1, 2, \dots, N; \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k,n} P_{k,n} \leq P_{\text{total}}, \quad (2)$$

$$P_{k,n} \geq 0. \quad (3)$$

其中: K 为用户总数, N 为系统总的子载波数目, $\omega_{k,n}$ 为用户 k 在子信道 n 的加权因子,作为公平参数来保证网络的吞吐量和公平性之间的平衡.模型中 P_{total} 表示总的可利用带宽,约束(3)表示功率的非负性.

R_k 是用户 k 的信道容量,定义为

$$R_k = \sum_n U_k \left(1 + \frac{p_{k,n} h_{k,n}^2}{\sigma_{k,n}^2} \right). \quad (4)$$

其中: $p_{k,n}$ 为用户 k 在子载波 n 上分配到的功率, $h_{k,n}$ 为用户 k 在子载波 n 上的信道增益, σ 为噪声功率,

U 为关于 p 的函数.以往基于效用函数的研究中,一般都对效用函数作了严格假设,假设其为严格连续可微的,如假设 U_k 为对数形式,保证效用函数的凸性.文献[9-10]扩展了对效用函数的定义,包括对数和指数形式的函数,但其算法设计中也只是对目标函数进行了假设,把非凸优化问题转换为凸优化问题,利用经典优化来求得最优解.在实际网络中,如果去掉对效用函数的假设,则效用函数可分为3类:凹函数、“S”型函数(非凸非凹函数)和凸函数.本文去掉对效用函数可微的严格假设,考虑了对数形式,“S”型 $U_k(R_k(p)) = \frac{1}{1 + e^{-a(R_k(p)-b)}}$ (a, b 都是正的常值)和凸函数型 $U_k(R_k(p)) = q * (R_k(p))^2$ (q 是正值)两种情况.两种关于 R 的函数对于 p 都是非凹的.

3 系统资源分配算法

3.1 粒子群方法

粒子群优化方法是一种群智能优化算法,它是通过模拟在二维空间中鸟群的飞行习性发展而来的.在求解优化问题时,问题的解对应于搜索空间中的一只鸟的位置,称这些鸟为“粒子”.每个粒子都具有以下几类信息:1)粒子当前所处位置;2)到目前为止由自己发现的最优位置(Pbest),将信息视为粒子的自身飞行经验;3)到目前为止整个群体中所有粒子发现的最优位置(Gbest)(Gbest是Pbest中的最优值),这可视作粒子群的同伴共享飞行经验.

设粒子群体规模为 N ,其中每个粒子在 d 维空间中的坐标位置可以表示为 $X_a = (x_{a1}, \dots, x_{ad})$,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,用 $V_a = (v_{a1}, \dots, v_{ad})$ 表示,于是粒子 a 的飞行速度和位置可根据下式进行调整:

$$V_a^{k+1} = \omega V_a^{k+1} + c_1 * \mathfrak{R}_1 * (Pbest_a^k - X_a^k) + c_2 * \mathfrak{R}_2 * (Gbest^k - X_a^k). \quad (5)$$

式中: ω 为惯性权重, \mathfrak{R}_1 和 \mathfrak{R}_2 为加速常数, $Pbest_a^k$ 为当前粒子 a 的历史最优位置记录, $Gbest^K$ 为整个粒子群的历史最优位置记录.

粒子通过下面的方程调整自身的位置:

$$X_a^{k+1} = X_a^k + V_a^{k+1}. \quad (6)$$

粒子的运动由上述方程共同作用,粒子的运动速度增量与其历史飞行经验和群体飞行经验相关,并受最大飞行速度的限制.

3.2 混沌优化

混沌行为的起源在于非线性系统对初值的敏感依赖性:初始近邻的轨道在一个有限的相空间中迅速分离,分离的程度将随时间按指数规律增长,较为成熟的混沌模型之一为生长模型.1976年美国普林斯顿

大学生物系的 May 指出,生态系统中一些简单的模型中潜藏着复杂的令人吃惊的动力学性态,既有倍周期分岔又有混沌的存在. Logistic 方程为: 设 u_0 为一数列, $u_0 \in [0, 1]$ 为初始值, 满足递推关系

$$u_{n+1} = vu_n(1 - u_n), n = 0, 1, \dots \quad (7)$$

由任意的初始值 u_0 开始, 反复迭代产生 $x_0, x_1, \dots, x_n, \dots$, 轨道的形态强烈依赖于参数 v_0 , 随着 v 的不断改变, 轨道将出现一系列变化, 直到产生混沌.

3.3 基于混沌粒子群的 OFDM 系统资源分配算法

针对粒子群优化算法容易陷入局部极值点的问题, 本文提出了混沌粒子群优化算法, 利用混沌运动的遍历性, 产生大量初始群体, 从中选择出初始群体; 对当前粒子个体产生混沌扰动, 以使解跳出局部极值区间. OFDM 系统资源分配算法是根据适应度函数(目标函数)通过中间变量(速度)找到优化问题的最优解(用户的最优分配功率).

3.3.1 变量初始化

无线 OFDM 网络最优化算法设计中, 粒子的位置对应于资源分配问题中的一组最优解. 粒子群算法求得的最优值即为最优功率, 粒子群中的速度是求解最优化问题中的中间变量. 设置迭代次数“ t ”从零开始, 最大迭代次数为 T . 在网络中功率的执行范围内初始化粒子的位置 X_i , 粒子的速度 V_i 以及粒子群中的基本参数 ω, c_1 和 c_2 .

3.3.2 设置适应度函数

本文求解问题的目标是在总约束条件下, 最大化总效用, 采用惩罚函数方法来避免出现不可行解. 资源分配算法中的适应度函数定义如下:

$$F_f = \begin{cases} \sum_{k,n} \omega_{k,n} R_{k,n}, & \sum_{k,n} P_{k,n} \leq P_{\text{total}}, P_{k,n} \geq 0; \\ \sum_{k,n} \omega_{k,n} R_{k,n} + \mu(P_{\text{total}} - P_{k,n}), & \text{否则.} \end{cases} \quad (8)$$

惩罚值 $\mu (\mu > 0)$ 可以解释为代价, 当约束溢出时, 通过价格 μ 给予一定比例的惩罚.

3.3.3 资源分配算法基本步骤

基于混沌 PSO 的 OFDM 系统资源分配算法具体步骤如下:

1) 初始化种群. 给定粒子规模维数, 初始化最大迭代次数和系统资源分配算法的基本参数.

2) 混沌初始化. 随机产生 $[0,1]$ 上的 n 维向量, n 为粒子维数, 混沌初始化粒子的位置.

3) 计算目标函数, 从初始群体中选择性能较好的解作为初始解, 随机产生初始速度.

4) 搜寻粒子个体最优位置和群体最优位置.

5) 根据式 (5) 和 (6) 计算粒子群的速度和位置, 并根据式 (8) 计算其对应的适应值.

6) 利用式 (7) Logistic 映射对粒子位置混沌赋值, 将混沌区间 $[0,1]$ 映射到对应量的取值区间.

7) 对每个粒子, 将其适应值与群体所经历过的最好位置进行比较, 如果优于当前位置, 则将其作为群体最优位置.

8) 达到最大迭代次数时, 中止搜索, 否则返回 2). 最后的 $Gbest_i$ 即是所求解对应的适应值, 其对应的最优解 $p_{k,n}^*$ 是网络中所求最优功率.

4 数值仿真

考虑多用户下行链路, 采用多径频率选择的瑞利信道, 幅度按照指数衰减. 设 OFDM 系统的子载波数为 32, 用户数为 8, 系统参数如表 1 所示. 粒子群中的基本参数定义为: $\omega = 1, c_1 = c_2 = 2$.

表 1 系统参数

径数	6
可用总功率/W	2
噪声功率/Dbw/Hz	-80
子载波数目	512
最大时延扩展/ μs	10
信道更新时间间隔/ms	0.5

4.1 收敛性

收敛性是衡量系统性能的重要指标. 图 1~图 3 分别给出了不同效用函数对应的系统效用收敛图像, 对应的效用函数分别为对数形式、“S”型函数和指数函数. 图中将本文提出的混沌粒子群算法 (CPSO) 与标准 PSO 算法、遗传算法 (GA)^[16] 和模拟退火 (SA) 算法^[17] 进行对比. PSO 和 CPSO 的种群数设为 20, GA 的种群数设为 100, 交叉和变异概率分别设为 0.8 和 0.2. CPSO 通过混沌变易对最优粒子周围进行搜索, 这样不仅能够保证算法的全局性能, 而且提高了算法的收敛速度和精度. 可以看出, 本文提出的算法可以很好地解决非凸性, 无论函数是凸性、非凸, 还是非凸非凹, 系统的吞吐量都可以很快地达到收敛. 由于结合了混沌机制, 采用逻辑自映射函数产生的混沌序列更具均匀性和更好的遍历性, CPSO 算法比 PSO 算法收敛速度更快, 并且能快速收敛到全局最优解.

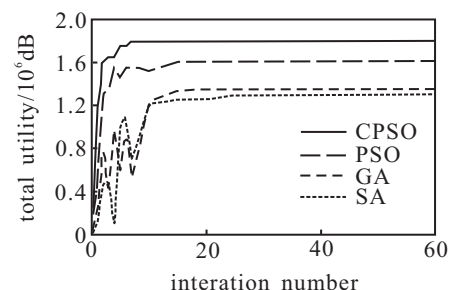


图 1 效用函数为对数时的系统总效用

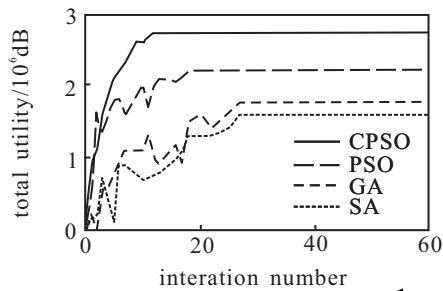


图2 效用函数为 $U_k(R_k(p)) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(R_k(p)-b)}}$ 时的系统总效用

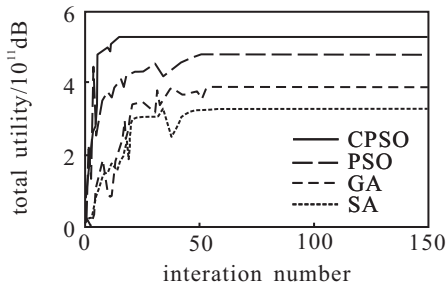


图3 效用函数为 $U_k(R_k(p)) = q * (R_k(p))^2$ 时的系统总效用

4.2 成功率的比较

为了进一步验证 CPSO 算法的有效性, 将各算法进行运行成功率的比较. 各算法运行 50 次, 如果每次运行的最终结果在全局最优值的 3.5% 范围之内, 则为“成功运行”, 定义成功率

$$SR = \frac{N_s}{50} * 100\%$$

其中 N_s 代表 50 次运行中成功运行的次数.

表 2 列出了 4 种算法的 SR. 函数 1~函数 3 分别对应的效用函数分别为对数形式、“S”型函数和指数函数. 从表 2 中可以看出, CPSO 的成功率最高, 因此 CPSO 算法对于 OFDM 系统资源分配算法是非常有效的.

表 2 SR 算法性能比较

算法	CPSO	PSO	GA	SA
函数 1	100	98	92	94
函数 2	100	93	89	90
函数 3	99	91	88	82
平均值	99	94	89	88

4.3 性能比较

表 3 给出了本文算法与文献 [9] 中算法的性能比较, 从表 3 中可以看出, 本文算法和文献 [9] 的算法都有较小的复杂度. 本文算法不需对效用函数进行严格假设, 考虑了更加适合实际网络情形的 3 种类型的效用函数, 直接解决非凸优化问题; 而文献 [9] 的算法是对效用函数进行严格假设, 将非凸优化问题转化为凸优化问题. 由于粒子群方法执行简单, 本文算法即使对于凸函数只需不到 50 次即可达到收敛; 而文献 [9] 需要 5 000 次左右的迭代才能得到次优解, 并且计算时间长.

表 3 DSM 算法性能比较

算法	本文算法	文献 [9] 算法
复杂度	$O(KN)$	$O(KN)$
效用函数	非凸, 非凹, 非凸非凹	凹函数
仿真次数	10~50	1000~5 000
计算时间	2~3 s	11~23 h
优化性	全局最优化	次优化

5 结 论

本文针对多用户 OFDM 系统, 提出了资源分配算法. 基于混沌思想的混合粒子群优化算法, 结合了粒子群优化算法快速寻优的能力和混沌运动的遍历性、随机性. 算法设计中, 允许效用函数是非凹的, 如“S”型函数和凸性函数, 非常符合实际网络. 通过给用户以优先级保证了系统和用户的公平性. 仿真结果表明, 本文提出的算法可以有效避免算法的早熟收敛, 提高了算法的全局收敛性和计算效率.

参考文献(References)

- [1] Bingham J A. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come[J]. IEEE Communications Magazine, 1990, 28(5): 5-14.
- [2] Kelly F P, Maullo 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.
- [3] Low S, Lapsley D E. Optimization flow control—I: Basic algorithm and convergence[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1999, 7(6): 861-874.
- [4] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation[J]. IEEE J of Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [5] Krongold B S, Ramchandran K, Jones D L. Computationally efficient optimal power allocation algorithms for multicarrier communication systems[J]. IEEE Trans on Communications, 2000, 50(1): 23-27.
- [6] Hoo B, Halder J, Tellado, et al. Multiuser transmit optimization for multicarrier broadcast channels: Asymptotic FDMA capacity region and algorithms[J]. IEEE Trans on Communications, 2004, 52(6): 922-930.
- [7] Seong K, Mohseni M, Cioffi J M. Optimal resource allocation for OFDMA downlink systems[C]. Proc of IEEE ISIT. Seattle, 2006: 1394-1398.
- [8] Shez Z K, Andrews J G, Evans B L. Optimal power allocation in multiuser OFDM systems[C]. Proc of GLOBECOM. San Francisco, 2003: 337-341.
- [9] Huang J W, Agrawal R, Berry R. Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(1): 1-9.

- [10] Cheng M H, Huang J W. Optimal resource allocation for OFDM uplink communication: A primal-dual approach, information sciences and systems[C]. The 42nd Annual Conf on CISS 2008. Princeton, 2008: 926-931.
- [11] 卫国, 唐志华. OFDM 系统动态资源分配研究[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 83-87.
(Wei G, Tang Z H. Survey on dynamic resource allocation in OFDM systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 83-87.)
- [12] 杨睿哲, 袁超伟, 滕颖蕾, 等. 多用户MIMO-OFDM 系统中的资源分配[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1229-1232.
(Yang R Z, Yuan C W, Teng Y L, et al. The resource allocation in multiuser MIMO OFDM system[J]. J of Electronics & Information Technology, 2009, 31(5): 1229-1232.)
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]. IEEE Int Conf on Neural Networks. Piscataway, 1995: 1942-1948.
- [14] 孟红记, 郑鹏, 梅国晖, 等. 基于混沌序列的粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 263-266.
(Meng H J, Zheng P, Mei G H, et al. Particle swarm optimization algorithm based on chaotic series[J]. Control and Decision, 2006, 21(3): 263-266.)
- [15] Tao X, Xiao F L, Kwok-wo W. An improved particle swarm optimization algorithm combined with piecewise linear chaotic map[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 190(2): 1637-1645.
- [16] Ge J K, Qiu Y H, Wu C M, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 2911-2916.
- [17] Romeijn H E, Smith R L. Simulated annealing for constrained global optimization[J]. J of Global Optimization, 1994, 5(2): 101-124.

(上接第1095页)

- [3] Armando A N, Douglas G M, Mario F M. On the generation of trajectories for multiple UAVs in environments with obstacles[J]. J of Intelligent and Robotic Systems Archive, 2010, 57(4): 123-141.
- [4] 丁明跃, 郑昌文, 周成平. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
(Ding M Y, Zheng C W, Zhou C P. Route planning for unmanned vehicles[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2009.)
- [5] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
(Wu S T, Fei Y H. Flight control system[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.)
- [6] 方振平. 飞机飞行动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
(Fang Z P. Aircraft flight dynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.)
- [7] 刘艳华, 孙颖, 孙智孝. 活塞发动机与无人机性能匹配分析[J]. 飞机设计, 2007, 27(4): 11-14.
(Liu Y H, Sun Y, Sun Z X. Performance matching of piston engine to unmanned aerial vehicle[J]. Aircraft Design, 2007, 27(4): 11-14.)
- [8] Fahlstrom P G, Gleason T J. Introduction of UAV System[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2003.
- [9] Pettersson P O, Doherty P. Probabilistic roadmap based path planning for an autonomous unmanned helicopter[J]. J of Intelligent and Fuzzy Systems, 2006, 17(4): 395-405.
- [10] Kurniawati H. Overview of motion planning problem & probabilistic roadmap planner[M]. NY: Media Tech Discussion Group, 2004.