

文章编号: 1001-0920(2009)08-1143-07

DS-CDMA 系统中结合串行干扰消除的资源分配

周朝荣^a, 张翼德^b, 冯 钢^b, 李乐民^a

(电子科技大学 a. 通信与信息工程学院, b. 通信抗干扰技术国家重点实验室, 成都 610054)

摘 要: 提出一种启发式算法, 用于求解资源分配问题. 算法分为两层: 内层检验方法调整译码顺序, 并快速检验速率模式的可行性; 外层更新机制通过遗传算法有效地更新速率模式. 从理论上证明了该算法能完全收敛于全局最优. 仿真结果表明, 在有限代的进化中, 修正遗传算法适值函数的外层更新并结合内层检验, 能获得良好的性能, 快速有效地分配资源.

关键词: 资源分配; 串行干扰消除; 译码顺序; 速率模式; 遗传算法

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A

Resource allocation with successive interference cancellation in DS-CDMA systems

ZHOU Zhao-rong^a, ZHANG Yi-de^b, FENG Gang^b, LI Le-min^a

(a. School of Communication and Information Engineering, b. National Key Laboratory of Communication Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China. Correspondent: ZHOU Zhao-rong, E-mail: cn@uestc.edu.cn)

Abstract: A heuristic algorithm is proposed to solve the problem of resource allocation, which can be decomposed into two layers: the inner layer examining method to adjust the decoding order and quickly examine the feasibility of rate modes, and the outer layer updating scheme to efficiently update rate modes by using the genetic algorithm. The heuristic algorithm can completely converge to the global optimum. Simulation experiments show that, in the evolutionary process with finite generations, the outer layer updating scheme, in which the fitness function of the genetic algorithm is modified, is combined with the inner layer examining method, which can achieve good system performance and allocate system resources quickly and efficiently.

Key words: Resource allocation; Successive interference cancellation; Decoding order; Rate mode; Genetic algorithm

1 引 言

直接序列-码分多址(DS-CDMA)系统是干扰受限系统. 为有效降低上行链路的多址干扰, 提高系统的性能, 基站接收机可采用多用户检测算法. 其中串行干扰消除(SIC)以其较低的实现复杂性和较高的系统性能而受到广泛关注^[1].

在采用 SIC 的 DS-CDMA 系统上行链路中, 基站接收机依次对各用户信号进行检测(译码). 一旦某个用户被检测, 接收机便估计和重建该用户的接收信号, 在后续用户检测前, 从接收到的复合信号中去掉先前已检测用户的重建信号. 基站重复此过程, 直至所有用户信号均被检测. 显然, 某一用户译码顺序越靠后, 该用户受到其他用户的干扰就越小. 由此

可见, 译码顺序的选取对于单个用户的接收信号质量以及整个系统的性能都有重要影响. 若系统存在 K 个用户, 则对应有 $K!$ 种可能的译码顺序. 在这类系统中, 资源分配不再局限于速率分配和功率分配两方面, 还需考虑译码顺序调整的问题.

无线通信系统中的资源分配需要兼顾多个约束条件, 并且约束条件间存在着复杂的关系, 如何公平有效地分配资源不是一项简单的任务. 求解这类问题可借鉴经济学中分配资源的方法, 采取效用函数表示占用某些资源后所带来的收益, 优化目标是最大化总收益, 这可通过最大化总的效用函数得以实现. 在实际应用中, 接收速率的大小是影响用户满意度的重要因素, 因此用户效用可定义为速率的函

收稿日期: 2008-08-25; 修回日期: 2008-11-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60772142); 国家 973 计划项目(2007CB310604).

作者简介: 周朝荣(1975—), 男, 四川安岳人, 博士生, 从事无线资源管理的研究; 李乐民(1932—), 男, 浙江吴兴人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事宽带通信网络技术的研究.

数^[2,3]. 文献[2,4]研究了DS-CDMA系统的资源分配问题,但这类研究是基于传统的单用户匹配滤波接收机,不涉及译码顺序调整的问题.

目前,涉及译码顺序调整的资源分配研究可分为两类:一类是在给定用户速率模式的情况下确定最优译码顺序,在满足能干比(E_b/I)要求的前提下分配功率,使得总发射功率^[5,6]最小化或总接收功率^[7]最小化. 由于文献[6,7]不涉及单个用户的发射(接收)功率限制,给定速率模式可行与否不在考虑的范畴. 尽管文献[5]考虑了速率模式可行与否,但只涉及固定译码顺序下的情况. 此外,用户速率是给定的,不涉及速率分配的问题. 另一类资源分配研究^[8]涉及到速率分配、功率分配以及译码顺序调整三方面,其目标是最大化系统效用,约束条件为用户发射(接收)功率限制. 然而,这类研究存在以下局限: SIC假设为理想的,即在后续用户信号的检测过程中,之前已被检测的用户信号干扰是完全消除的; 用户速率能够连续取值,为信号干扰噪声比(SINR)的连续函数; 各用户的效用函数简单定义为其所分配的速率,系统效用为用户速率的线性和. 在实际情况下,信道估计误差及判决错误使得SIC不可能是理想的; 各用户速率仅在对应的离散集合中取值,各速率有对应的 E_b/I 要求.

本文考虑实际情况下DS-CDMA系统上行链路基于SIC的资源分配问题,目标是最大化系统效用. 在这种情况下,考虑SIC是非理想的; 移动台有限的发射功率导致用户接收功率受限; 用户速率仅在对应的离散集合中取值,各速率有对应的 E_b/I 要求; 用户效用为速率的增函数,系统效用为用户效用之和. 在这样的实际系统中,用户可能的速率模式以及译码顺序随着用户数目的增长而指数增长,最大化系统效用是NP问题,需要综合考虑速率分配、功率分配以及译码顺序调整三方面因素. 在实际通信中,系统资源可逐帧进行分配^[2,4],这要求快速求解此类优化问题.

本文提出一种启发式算法来求解该NP问题. 该算法分为内外两层: 内层检验方法给出如何调整译码顺序,并快速检验速率模式可行与否; 外层更新机制通过遗传算法有效地更新用户的速率模式. 从理论上证明了启发式算法能完全收敛到全局最优解. 仿真实验表明,在有限代的进化过程中,修正遗传算法的适值函数后,外层更新机制结合内层检验方法能获得较好的系统性能,从而实现了系统资源快速有效的分配.

2 系统模型

本文考虑由1个基站和 K 个用户构成的单小区

模型. 基站接收机处接收到的复合信号由 $X_i(t)$ ($X_i(t)$ 对应于用户 i 的接收信号, $i = 1, 2, \dots, K$), 外小区干扰信号 $I(t)$ 以及背景噪声 $N(t)$ 几部分构成. 假设外小区干扰信号和背景噪声的总功率为 I_0W . 其中: W 为系统带宽, I_0 为对应的功率谱密度. 基站依次对用户信号进行检测(译码),一旦用户 i 被检测,便估计和重建该用户的接收信号. 由于存在信道估计误差和判决错误,用户 i 的重建信号不可能准确等于 $X_i(t)$. 即对于在该用户之后检测的用户而言,来自用户 i 的干扰不可能完全消除. 用户 i 接收信号干扰消除后的残余功率为 $\theta_i P_i$ ^[5,7,9]. 其中: P_i 为用户 i 的接收功率, θ_i 为用户 i 的残余功率因子. 相应地,用户 i 的SINR为

$$\text{SINR}_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^{i-1} \theta P_j + \sum_{j=i+1}^K P_j + I_0 W}, \quad i = 1, 2, \dots, K. \quad (1)$$

此处假设所有 θ_i 相等,并记为 θ ,可看作 θ 取所有 θ_i 中最大值这一保守情形^[5,9]. 其中 $0 \leq \theta \leq 1$, $\theta = 1$ 对应于传统单用户匹配滤波接收机的情形, $\theta = 0$ 对应于前级干扰完全消除的理想情形.

考虑到用户功率的限制、用户速率离散取值、对应的 E_b/I 要求、效用为速率的函数^[2,3]、不同的译码顺序导致不同的系统性能等因素,最大化系统效用涉及速率分配、功率分配及译码顺序调整三方面的联合优化. 此优化问题的数学模型表示如下:

优化目标

$$\max_{P, R, D} \sum_{i=1}^K U_i(R_i), \quad i = 1, 2, \dots, K; \quad (2)$$

约束条件

$$(W/R_i) \text{SINR}_i = \gamma_i, \quad (3)$$

$$0 \leq P_i \leq P_i^{\max}, \quad (4)$$

$$R_i \in \mathbf{R}_{S_i}. \quad (5)$$

本文称式(2)~(5)所描述的优化问题为问题 M . 其中:式(2)为优化目标,即最大化系统效用. 式中: $U_i(R_i)$ 是用户 i 的速率取 R_i 时的效用,为速率的增函数; $\bar{P} = [P_1, P_2, \dots, P_K]$ 为 K 个用户的接收功率向量, P_i 为用户 i 的接收功率; $\bar{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$ 为 K 个用户的速率模式, R_i 为用户 i 的速率; \bar{D} 表示所有 $K!$ 种可能的译码顺序. 式(3)表示用户 i 在速率为 R_i 时的 E_b/I 要求. 式(4)为用户 i 的接收功率限制,这是由于实际系统中移动台的发射功率有限所致. 式(5)表示各用户速率在各自对应离散集合 \mathbf{R}_{S_i} 中取值,集合 \mathbf{R}_{S_i} 中的元素数目为 N_i .

在给定用户速率模式 $\bar{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$ 的情况下,令 $Y_i = W/(R_i \gamma_i)$. 根据式(1)和(3),可推

得各用户的接收功率要求

$$P_i = \frac{\theta + Y_{i-1}}{1 + Y_i} P_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, K, \quad (6)$$

$$P_1 = \frac{I_0 W}{Y_1 - \sum_{i=2}^K \prod_{j=i}^K [(\theta + Y_{j-1}) / (1 + Y_j)]}, \quad (7)$$

$$P_K = \frac{I_0 W}{Y_K - \sum_{i=2}^K \theta \prod_{j=i}^K [(1 + Y_j) / (\theta + Y_{j-1})]}. \quad (8)$$

定义 1 就某一速率模式而言, 在所有 $K!$ 种可能的译码顺序下, 若按式(6)~(8)方式分配用户功率均不能使约束条件(3)和(4)得到满足, 则该速率模式不可行; 否则, 存在某一译码顺序, 在该译码顺序下, 按式(6)~(8)方式分配用户功率能使约束条件(3)和(4)得到满足, 则该速率模式可行。

显然, 可能的速率模式以及译码顺序随着用户数的增长而指数增长。由于用户接收功率限制和 E_b/I 要求, 对于给定的速率模式, 在所有可能的译码顺序下不一定使约束条件都得到满足, 因此问题 M 是 NP 问题。在实际通信中, 系统资源可逐帧进行分配^[2,4], 这要求快速求解此类优化问题。通过穷举法求解 NP 问题是不可行的, 需要考虑性能有效的启发式算法。

3 启发式算法

3.1 内层检验方法

定理 1 某一速率模式可行的充要条件是: 在由 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 降序排列所确定的译码顺序下, 约束条件(3)和(4)能够满足, 其中 Z_i 定义为

$$Z_i = P_i^{\max} (1 + Y_i) = P_i^{\max} [1 + W / (R_i \gamma_i)], \quad i = 1, 2, \dots, K. \quad (9)$$

该定理的证明可参阅文献[9]中定理 2 的证明, 此略。

本文将由 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 降序排列所确定的译码顺序记作 ZD。从式(9)看出, 译码顺序 ZD 是综合考虑用户最大接收功率、速率以及对应 E_b/I 要求三方面因素得到的。相应地, 称检验某一速率模式可行与否的方法为 ZD 检验。该方法的步骤如下:

1) 计算 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$, 并根据 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 的降序排列调整译码顺序为 ZD。

2) 根据式(6)~(8)计算各个用户在译码顺序 ZD 下的接收功率要求。

3) 判断约束条件(3)和(4)在译码顺序 ZD 下是否得到满足。根据定理 1, 如果约束条件在译码顺序 ZD 下不能满足, 则该速率模式不可行; 否则, 该速率模式可行。

在 ZD 检验中, 检验某一速率模式可行与否仅

仅涉及一种译码顺序 ZD, 而不必像穷举法那样需逐次检验各个译码顺序。在最坏情况下, 穷举法需检验所有 $K!$ 种可能的译码顺序, 才能确定某一速率模式可行与否以及可行情况下的译码顺序。

3.2 外层更新机制

遗传算法是一类模拟自然进化过程的随机搜索算法, 具有并行搜索和群体寻优的能力, 可用于求解各类 NP 问题。这类算法由以下五要素构成:

1) 解的编码表示。问题 M 的目标是最大化系统效用, 而系统效用为用户速率的函数, 因此直接将 K 个用户的速率模式编码为一条染色体。一条染色体表示为 $\bar{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$, 其中染色体各基因位上的值对应于各用户的速率。

2) 初始种群的产生。可通过随机的方法产生初始种群。考虑问题 M 的最优解可能存在的极端情况, 即最优解对应的速率模式中各速率都接近于最大值。为了加速收敛, 可将各速率均取最大值的速率模式置入初始种群。

3) 遗传操作的设计。遗传操作通常包括选择、交叉和变异 3 种, 这些基本操作构成了遗传算法强大搜索能力的核心。

选择: 选择操作是在当前种群中选择适值函数较优的个体形成中间种群的过程。本文采用轮盘赌的方式^[10]。将当前种群中最大效用的个体与上一代种群中的超个体进行比较, 较优者作为当前种群的超个体, 并复制到额外的存储空间保留下来, 即精英保留策略^[10]。超个体只起记录的功能, 而不参与任何遗传操作。初始种群的超个体由该种群中效用最优的个体直接复制。

交叉: 从中间种群选定双亲染色体, 交叉操作根据交叉概率, 在双亲染色体上随机选择交叉点进行交换, 得到新一代染色体。其目的是将双亲染色体的优良基因遗传到新一代染色体中。本文采用单点交叉的方式。

变异: 变异操作根据给定的变异概率, 对染色体各基因位上的数值进行随机变动。变异操作可使遗传算法保持种群的多样性, 防止未成熟收敛; 当种群规模较大时, 适度的变异还能提高局部搜索效率, 加速向最优解收敛。染色体某一基因位(即某一用户速率)一旦被选中进行变异, 便以均匀概率在可能选取的所有其他速率中任取其一。

4) 控制参数的选取。遗传算法的主要控制参数包括交叉概率 P_c , 变异概率 P_m , 种群规模 S_{pop} , 最大遗传代数 Q 等。在实际应用中, 应根据具体问题的特点对控制参数进行选取和折衷。

5) 适值函数的定义。适值函数的定义对于遗传

算法的性能有很大的影响,它决定了如何从当前种群中产生用于后续交叉操作的中间种群. 问题 M 的目标是最大化系统效用,因此最简单的适值函数可直接定义为个体对应的系统效用. 即有如下定义:

定义 2 如果速率模式 $\bar{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$ 可行,则其对应的适值函数为

$$\text{Fit}_1(\bar{R}) = \sum_{i=1}^K U_i(R_i); \quad (10)$$

否则

$$\text{Fit}_1(\bar{R}) = 0. \quad (11)$$

上述定义中不可行速率模式的适值为 0,使得不可行速率模式很难选入中间种群. 因此,该类速率模式在遗传过程中很少发挥作用,这不利于保持种群的多样性. 为此,修正上述适值函数的定义如下:

定义 3 如果速率模式 $\bar{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$ 可行,则其对应的适值函数为

$$\text{Fit}_2(\bar{R}) = \sum_{i=1}^K U_i(R_i) + \frac{1}{1 + \max_i \{P_{F_i}\}}; \quad (12)$$

否则

$$\text{Fit}_2(\bar{R}) = 1/(1 + \max_i \{P_{F_i}\}). \quad (13)$$

其中

$$P_{F_i} |_{i=1,2,\dots,K} = \begin{cases} P_i/P_i^{\max}, & P_i \geq 0; \\ (P_i^{\max} - P_i)/P_i^{\max}, & P_i < 0. \end{cases} \quad (14)$$

其中 P_i 为该速率模式在相应的译码顺序下,按式 (6) ~ (8) 计算得到的用户 i 的接收功率要求. 这样定义有以下优点:不可行速率模式具有非 0 适值,这类速率模式在遗传过程中能发挥作用,有利于保持种群的多样性;可行速率模式适值高于不可行速率模式适值,可使前者在遗传过程中发挥更大的作用,就约束条件而言,前者一般具有更加优良的基因;高效地产生种群,同时避免选取合适的惩罚函数的问题.

本文称适值函数由 Fit_1 定义的遗传算法为简单适值遗传算法(SFGA),称适值函数由 Fit_2 定义的遗传算法为修正适值遗传算法(MFGA).

3.3 结合内层检验与外层更新的启发式算法

结合内层检验方法与外层更新机制的启发式算法步骤如下:

1) 随机产生初始种群,并将各用户速率均取最大值的速率模式置入初始种群.

2) 当前种群中个体的可行性由 ZD 检验快速确定,并将当前种群中效用最大的个体与上一代种群中的超个体进行比较,较优者作为当前种群的超个体,并复制到额外的存储空间保留下来. 根据适值函数 Fit_1 或 Fit_2 计算当前种群中个体的适值,采用轮

盘赌的方式产生中间种群.

3) 对中间种群进行交叉和变异后,产生新一代种群.

4) 返回执行 2),直至算法结束条件得到满足(常见的结束条件有最大遗传代数限制等). 此时,当前种群中的超个体即为启发式算法求解问题 M 的解.

根据文献[10],有如下定义:

定义 4 对于定义在概率空间 (Ω, A, P) 上的非负随机变量序列 $\{X_n, n = 0, 1, \dots\}$:

1) 对于 $\forall \epsilon > 0$,若有 $\sum_{n=0}^{\infty} P\{X_n > \epsilon\}$ 收敛,则称 $\{X_n\}$ 完全收敛到 0;

2) 若 $P\{\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = 0\} = 1$ 成立,则称 $\{X_n\}$ 以概率 1 收敛到 0;

3) 对于 $\forall \epsilon > 0$,若有 $\lim_{n \rightarrow \infty} P\{X_n > \epsilon\} = 0$ 成立,则称 $\{X_n\}$ 依概率收敛到 0.

上述 3 种收敛中,完全收敛最强,依概率 1 收敛其次,依概率收敛最弱. 依次由前者可推出后者.

定义 5 假设优化问题的目标是在可行域内最大化目标函数. 称采用精英保留策略的遗传算法求解该优化问题完全(或以概率 1,或依概率)收敛到全局最优解,如果非负随机序列 $\{D_t, t = 0, 1, \dots\}$ 完全(或以概率 1,或依概率)收敛于 0. 其中: $D_t = f^* - F_t$, f^* 为目标函数在可行域内的最大值, F_t 为第 t 代超个体所对应的目标函数值, t 表示遗传算法进化代数.

定理 2 在上述启发式算法中,外层更新算法无论采用 SFGA 还是 MFGA,结合内层 ZD 检验均能完全收敛到问题 M 的全局最优解,且与初始种群的选择无关.

证明 分为两步进行,具体证明如下:

1) 内层 ZD 检验能准确检验某一速率模式可行与否,这可由定理 1 保证;相应地,在译码顺序 ZD 下,该速率模式对应的系统效用以及适值也能准确计算. 于是,问题 M 的最佳速率模式(即全局最优解)的可行性得以准确检验;相应地,对应的系统效用以及适值函数也得以准确计算. 在其他译码顺序下,有可能因约束条件(3)和(4)得不到满足,而将最佳速率模式误判为不可行的速率模式,错误计算对应的系统效用以及适值函数,致使全局最优解被错误丢弃.

2) 遗传算法变异操作保证了能以非 0 概率变异到最佳速率模式,并且启发式算法能完全收敛到最优解. 这是由于在每一代种群中,任意速率模式(个体)通过变异操作后,变异成任意其他速率模式

的概率为

$$P\{S_i \rightarrow S_j\} \geq p^K. \quad (15)$$

其中

$$p = \min_i \left\{ 1 - p_m, \frac{p_m}{N_1 - 1}, \dots, \frac{p_m}{N_K - 1} \right\} > 0, \quad (16)$$

S_i 和 S_j 为任意可能的两种速率模式. 这说明在每一代种群中, 任意个体通过变异操作后, 不能变异成最佳速率模式的概率始终小于 $(1 - p^K)$. 由于采用了精英保留策略, 一旦某一个体变异成最佳速率模式, 后续遗传操作均不会导致最佳速率模式被丢弃. 因此直到第 t 代, 最佳速率模式还未被获取的概率为

$$P\{D_t > 0\} \leq \prod_{i=0}^t (1 - p^K) = (1 - p^K)^{t+1}. \quad (17)$$

对于 $\forall \epsilon > 0$, 均有

$$P\{D_t > \epsilon\} \leq P\{D_t > 0\} \leq \prod_{i=0}^t (1 - p^K) = (1 - p^K)^{t+1}. \quad (18)$$

相应地, $\sum_{i=0}^{\infty} P\{D_i > \epsilon\} \leq \sum_{i=0}^{\infty} (1 - p^K)^{i+1}$ 收敛. 结合前述 1) 的证明, 可断定外层更新算法无论采用 SFGA 还是 MFGA, 结合内层 ZD 检验都能完全收敛到问题 M 的全局最优解.

此外, 上述证明过程并不涉及初始种群的选取, 因此可断定算法收敛性能与初始种群的选择无关. \square

3.4 启发式算法的计算量及应用

从启发式算法的设计可以看出: 问题 M 的一个可能解是指一种速率模式, 对应的译码顺序为 ZD. 对于这样的可能解, 所涉及的计算量包括确定对应的译码顺序 ZD, 确定该可能解可行与否和在外层更新算法 MFGA 中确定 P_{F_i} 及其最大值. 其中: 确定译码顺序 ZD (即根据式 (9) 计算 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 并排序) 的计算复杂度为 $O(K^2)$; 根据式 (6) ~ (8) 和 (4) 确定此可能解可行与否的计算复杂性为 $O(K)$; 在算法 MFGA 中, 确定 P_{F_i} 及其最大值的计算复杂度为 $O(K)$. 就某一可能解而言, 启发式算法所涉及的计算复杂度为 $O(K^2)$. 由于种群规模为 S_{pop} , 最大遗传代数数为 Q , 则整个启发式算法的计算复杂度为 $O(S_{\text{pop}} \times Q \times K^2)$.

利用穷举法求解问题 M , 一个可能解对应于一种速率模式与任意一种译码顺序的组合. 对于任意给定的速率模式, 这种可能的组合有 $K!$ 种. 相应地, 确定一种速率模式可行与否的计算复杂度平均为 $O(K \times K!/2)$. 所有可能的速率模式有 $\prod_{i=1}^K N_i$ 种, 因

此穷举法求解问题 M 的计算复杂度平均为 $O\left(\left(\prod_{i=1}^K N_i\right) \times K \times K!/2\right)$. 即使是中等用户规模的系统, 启发式算法的计算量也明显低于穷举法.

在实际系统中, 该启发式算法可结合接纳控制、调度算法等机制发挥作用. 例如当有新用户或切换到到达时, 通过内层检验方法可快速确定新用户或切换能否被接纳, 若能被接纳, 则进一步结合外层更新机制, 可得出较优的速率模式以及对应的译码顺序. 对于调度而言, 该算法可快速确定能被调度的可行用户集合、较优的速率模式和对应的译码顺序.

4 仿真结果与性能分析

4.1 仿真环境

信道增益由路径损耗和阴影效应构成, 即

$$h = \frac{1}{P_L(d)} e^{\beta \xi}. \quad (19)$$

其中: $\beta = \ln 10/10$; ξ 是零均值标准差为 σ 的高斯随机变量; $e^{\beta \xi}$ 代表阴影效应, 即阴影效应服从对数正态分布^[11]; $P_L(d)$ 为路径损耗, 其计算公式^[11]为

$$P_L(d) [\text{dB}] = 129.4 + 35.2 \lg(d). \quad (20)$$

其中 d 为基站与用户间的距离, 单位为 km.

在每次仿真样本中, 各用户的路径损耗产生如下: 首先给出基于所有用户平均 (接收信号) 的最大信噪比, 据此平均值确定对应的平均路径损耗; 然后在以平均路径损耗为中心值的 $(-15, 15)$ [dB] 范围内, 随机均匀地产生各用户的路径损耗. 路径损耗对应于移动终端到基站的距离, 路径损耗结合阴影效应即为信道增益, 它决定了信噪比, 即用户 (接收) 信号质量.

在用户信号质量已确定的基础上, 各用户根据信号质量以及约束条件, 在各自对应的离散速率集合中选取其业务速率, 目标为最大化系统效用. 相应地, 无线网络的负载即为此时系统中所有用户速率之和.

根据文献^[11]选取系统参数: 移动台最大发射功率为 0.25 W, 3.84 MHz 的系统带宽; 接收机噪声功率为 -103.2 dBm, 3 dB 的外小区干扰储备; 阴影效应标准差 $\sigma = 6$ dB. 小区中的用户数设为 40, 各用户的速率集合为 $\{0, 2^1, \dots, 2^8\}$ Kbps, 所有非 0 速率的 E_b/I 要求为 4 dB.

仿真实验中, 遗传算法的交叉概率 $P_c = 0.9$, 变异概率 $P_m = 0.1$, 种群规模 $S_{\text{pop}} = 80$, 最大遗传代数 $Q = 200$.

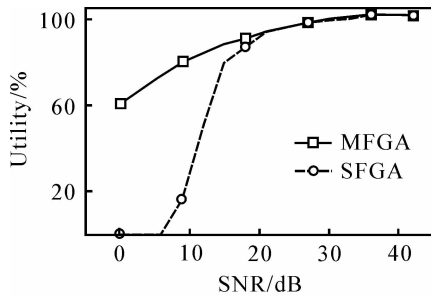
此外, 效用函数定义^[3]为

$$U_i(R_i) = \begin{cases} a_i + b_i \ln(R_i - c_i), & R_i > c_i; \\ 0, & R_i \leq c_i. \end{cases} \quad (21)$$

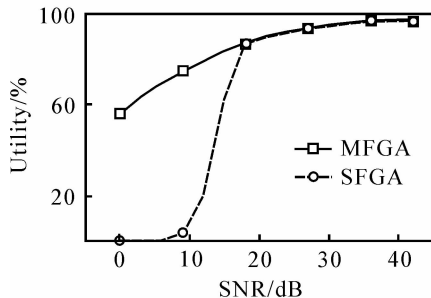
其中:用户速率 R_i 的单位为 Kbps;参数 a_i, b_i 和 c_i 假设在 $(0, 1)$ 区间内服从均匀分布,仿真中随机产生.

4.2 适值函数对算法性能的影响

在不同的残余功率因子 θ 下,不同的适值函数对算法性能的影响分别如图 1 和图 2 所示.

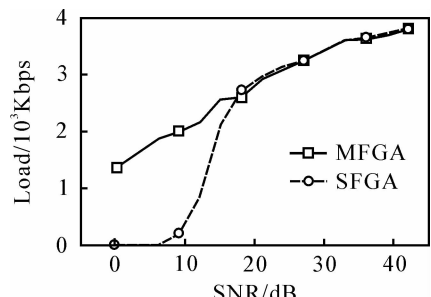


(a) $\theta = 0.1$

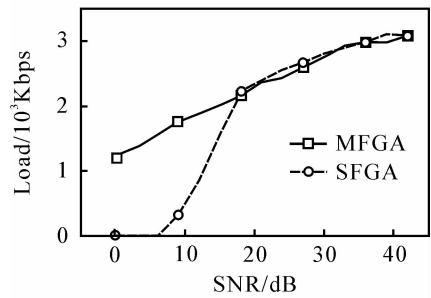


(b) $\theta = 0.2$

图 1 适值函数对系统效用的影响



(a) $\theta = 0.1$



(b) $\theta = 0.2$

图 2 适值函数对网络负载的影响

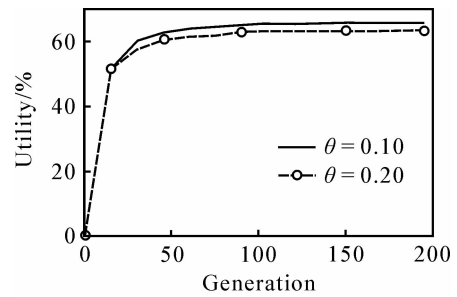
从图中可以看出,在信噪比较低的情况下,算法 MFGA 取得的效用和负载明显高于 SFGA. 这是由于当信噪比较低时,可行的速率模式较少,而在算法 SFGA 中,不可行的速率模式在遗传过程中较少起作用,导致种群缺乏多样性,算法过早收敛. 当信噪比较高时,可行的速率模式较多,种群多样性在算法

SFGA 中能较好保持. 此时,算法 MFGA 与 SFGA 有类似的结果.

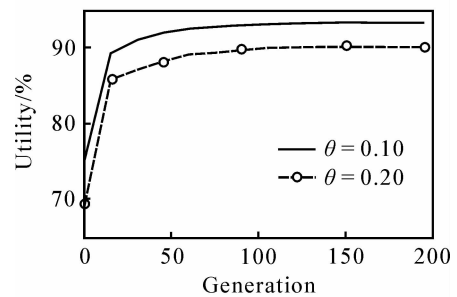
随着信噪比的提高,系统效用和网络负载随之增长. 这是由于随着信噪比的提高,用户可在满足约束的前提下选用更高的速率,效用为速率的增函数,网络负载为系统中所有用户速率之和. 另一方面,信噪比由信道增益所决定,而路径损耗结合阴影效应即为信道增益. 考虑到阴影效应的随机性,从平均意义上看,路径损耗越小即距离越短,对应的信噪比即(接收)信号质量越高. 随着移动终端到基站距离的减小,用户可在其对应的速率集合中选用更高的速率. 相应地,系统效用和网络负载随着移动终端到基站距离的减小而增大.

4.3 算法的收敛性能

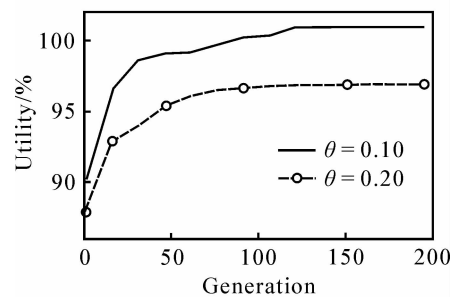
在 3 种不同信噪比的情况下,外层更新采用算法 MFGA 时的收敛性能如图 3 所示. 从图中可以看出,在 3 种不同信噪比的情况下,算法 MFGA 在遗传代数低于 150 代时已经收敛,这说明该算法具有较好的收敛性能.



(a) SNR=3dB



(b) SNR=21dB



(c) SNR=39dB

图 3 算法 MFGA 的收敛性能

4.4 译码顺序对算法性能的影响

在不同的残余功率因子 θ 下,不同译码顺序对算法性能的影响分别如图 4 和图 5 所示. 其中 RN 对应于随机选择译码顺序的情形.

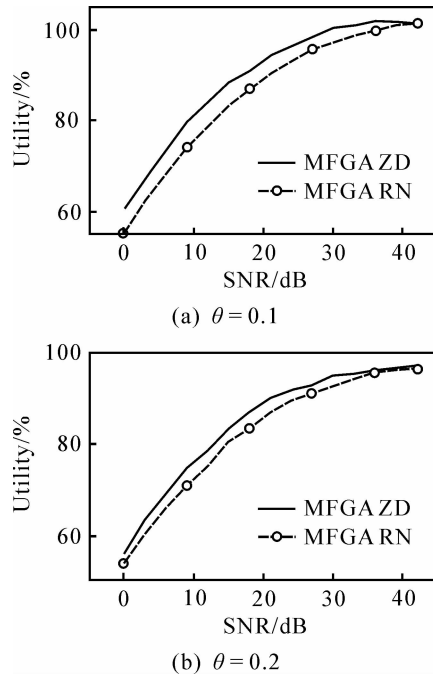


图 4 译码顺序对系统效用的影响

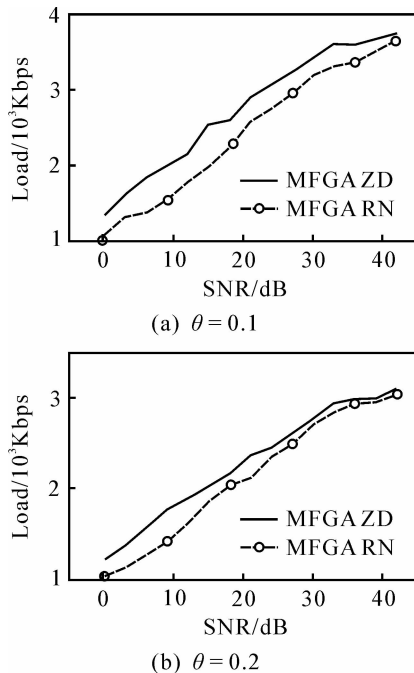


图 5 译码顺序对网络负载的影响

从图中可以看出,算法 MFGA 在译码顺序 ZD 下,比随机选择译码顺序能取得更高的效用和负载. 这是由于对于任意可能的速率模式,译码顺序 ZD 是所有译码顺序中最有可能使约束条件(3)和(4)

得到满足,因此在该译码顺序下能取得更高的效用和负载. 在不同的译码顺序下,残余功率因子 θ 越低,效用差异和负载差异越明显. 这是由于残余功率因子 θ 越小,对应于更高效用或更高负载的速率模式越可行. 根据定理 1,在译码顺序 ZD 下,约束条件(3)和(4)最有可能被满足(即使在其他译码顺序下不能被满足). 因此,效用差异和负载差异随着残余功率因子 θ 的降低而更加明显.

5 结 论

本文考虑非理想串行干扰消除下 DS-CDMA 系统上行链路的资源分配问题,提出一种启发式算法来实现系统资源的快速有效分配. 相应的算法由内层检验方法和外层更新机制两层所构成. 其中:内层检验方法完成调整译码顺序,并快速检验速率模式可行与否;外层更新机制通过遗传算法实现用户速率模式的有效更新. 从理论上证明了该启发式算法能完全收敛到全局最优解. 仿真实验表明,在实际有限代的遗传进化过程中,外层更新机制修正遗传算法适值函数后,结合内层检验方法能获得较好的系统性能.

参考文献(References)

- [1] Shyy D J, Donyak J. Capacity enhancement of CDMA networks using interference cancellation techniques[J]. IEEE Communication Magazine, 2006, 44(7): 86-92.
- [2] Chatterjee M, Lin Hai-tao, Das S K. Rate allocation and admission control for differentiated services in CDMA data networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2007, 6(2): 179-191.
- [3] Song Guo-cong, Li Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks — Part II: Algorithm development [J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2005, 4(2): 625-634.
- [4] Zhang Dan-lu, Oh Seong-Jun, Bhushan Naga. Optimal resource allocation for data service in CDMA reverse link [J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2007, 6(10): 3648-3656.
- [5] Berggren F, Slimane S B. Power allocation for a simple successive interference cancellation scheme in a multi-rate DS-CDMA system [C]. IEEE ICC 2002. New York: 2002, 1: 351-355.
- [6] Jalali S, Khalaj B K. Power control for multi-rate DS-CDMA systems with imperfect successive interference cancellation[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(1): 600-603.

(下转第 1155 页)