

采用串行干扰消除的 DS-CDMA 系统中 速率分配与译码顺序调整的联合优化

周朝荣^① 李乐民^① 张翼德^② 冯 钢^②

^①(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

^②(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘 要: 在采用串行干扰消除的 DS-CDMA 系统中, 可能的速率模式与译码顺序随着用户数的增长而指数增长。如何分配速率使得系统效用最大化是一个 NP 问题, 这涉及到速率分配与译码顺序调整的联合优化。该文针对此问题提出两种次优贪婪算法。算法的主要思想是逐步贪婪地更新速率模式, 再针对每步更新后的速率模式调整译码顺序, 根据调整后的译码顺序快速检验对应速率模式的可行性。提出的算法具有较低的计算复杂度, 可用于速率的快速有效分配。仿真实验证实了分析结果并展示了算法的有效性。

关键词: 无线通信; 串行干扰消除; 译码顺序; 速率分配; 贪婪算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1400-05

Joint Optimization of Rate Allocation and Decoding Order Adjustment in DS-CDMA Systems with Successive Interference Cancellation

Zhou Zhao-rong^① Li Le-min^① Zhang Yi-de^② Feng Gang^②

^①(School of Communication and Information Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

^②(National Laboratory of Communications, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 610054, China)

Abstract: In DS-CDMA systems with Successive Interference Cancellation (SIC), the numbers of possible rate modes and decoding orders grow exponentially with the number of users. How to allocate rates in order to maximize the system utility is an NP problem, which involves the joint optimization of rate allocation and decoding order adjustment. This paper proposes two suboptimal greedy algorithms for addressing this NP problem. The main idea of the algorithms is that the rate mode is greedily updated step by step, then the decoding order is adjusted for the updated rate mode in every step and the feasibility of the corresponding rate mode is quickly examined according to the adjusted decoding order. The proposed algorithms have very low computational complexity and can be used to implement the quick and efficient allocation of rates. Simulation experiments validate this analysis and demonstrate the effectiveness of the algorithms.

Key words: Wireless communication; Successive Interference Cancellation (SIC); Decoding order; Rate allocation; Greedy algorithm

1 引言

直接序列-码分多址(DS-CDMA)系统需要支持多媒体类型业务, 这类业务具有弹性, 即业务速率可根据当前系统负荷与物理链路性能进行调整, 如何利用业务的这一特性公平且有效地分配速率成为研究人员及运营商关注的重要问题。在无线通信领域, 速率分配之类的资源分配问题可以借鉴经济学中的效用函数理论^[1-3]。就多媒体类型业务而言,

业务速率大小是影响用户满意度的重要因素, 因此, 用户效用可定义为其速率的函数^[2,3]。

多址干扰严重影响着 DS-CDMA 系统的性能, 基站可采用串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)这类多用户检测算法降低多址干扰、提高系统性能^[4]。在采用 SIC 的 DS-CDMA 系统上行链路中, 基站接收机依次从接收到的复合信号中检测(译码)各个用户信号。某用户信号一旦被检测, 接收机就通过信道估计重建该用户的接收信号, 并在后续用户的检测前从复合信号中去除该重建信号, 重复此过程直至所有用户信号被检测。显然, 用户的译码顺序越靠后, 来自其他用户的干扰就越小, 而 K 个用户对应着 $K!$ 种可能的译码顺序, 因此, 译码顺序的选取将影响单个用

2008-08-27 收到, 2009-01-05 改回

国家自然科学基金(60772142)和国家 973 规划项目(2007CB310604)
资助课题

用户的接收信号质量以及整个系统性能,不同的译码顺序导致不同的系统性能。相应地,最大化系统效用需要考虑速率分配与译码顺序调整的联合优化。

截至目前,涉及译码顺序调整的研究工作可以分为两类。一类研究是在满足能量干扰比 (bit-energy-to-interference ratio, E_b/I) 要求的前提下确定最优译码顺序以最小化总发射功率^[5,6]或者总接收功率^[7]。由于不涉及单个用户发射(接收)功率的限制,速率模式可行与否则不需考虑;速率模式是给定的,就不考虑速率分配的问题。另一类研究^[8]涉及速率分配与译码顺序调整的联合优化,目标是最大化基于速率的系统效用,约束条件为用户功率限制。但存在局限如下:理想 SIC 的假设,即在后续用户信号的检测中,之前已被检测用户的信号干扰是完全消除了;用户速率能够连续取值,为信干噪声比 (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR) 的连续函数;各用户效用简单定义为其速率,系统效用为用户速率的线性之和。而在实际情况中,信道估计误差与判决错误使得 SIC 不可能是理想的;用户速率仅在离散集合中取值,各速率有其对应的 E_b/I 要求;需要考虑更加一般化的用户效用函数。

本文考虑实际情况下的 DS-CDMA 系统上行链路效用最大化问题。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的接收功率受限;用户速率仅在离散集合中取值,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。在这样的系统中,可能的速率模式与译码顺序随着用户数的增长而指数增长,最大化系统效用是 NP 问题,需要考虑速率分配与译码顺序调整的联合优化,而通过穷举法直接求解是不可行的。因此,本文提出两种次优贪婪算法求解此 NP 问题。在这两种算法中,逐步贪婪地更新速率模式,再针对每步更新后的速率模式调整译码顺序,根据调整后的译码顺序快速检验对应速率模式的可行性。相应地,算法具有较低的计算复杂度和较好的性能。

2 系统模型

本文考虑由1个基站与 K 个用户所构成的单小区模型。 $X_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, K$) ($X_i(t)$ 为用户 i 的接收信号), 外小区干扰信号 $I(t)$ 以及背景噪声 $N(t)$ 共同构成基站处接收到的复合信号。其中, 外小区干扰信号与背景噪声的总功率假设为 I_0W , W 为系统带宽, I_0 为对应的功率谱密度。基站接收机从复合信号中依次检测(译码)各个用户信号。某用户一旦被检测, 通过信道估计重建该用户的接收信号, 并在后续用户的检测前从复合信号中去除该重建信号, 重复此过程直至所有用户均被检测。由于存在信道估计误差与判决错误, 用户 i 的重建信号无法准确等于 $X_i(t)$, 即对于在用户 i 之后检测的用户而言, 用户 i 的干扰无法完全消除。对用户 i 接收信号干扰消除后的残余功率为 θP_i ^[7,9], 其中 P_i 为用户 i 的接收功

率, $0 \leq \theta \leq 1$ 为残余功率因子。相应地, 用户 i 的SINR为

$$\text{SINR}_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^{i-1} \theta P_j + \sum_{j=i+1}^K P_j + I_0W}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

就多媒体类型业务而言, 接收到的速率大小是影响用户满意度的重要因素, 因此, 用户效用定义为其速率的函数^[2,3]。相应地, 系统效用为用户效用之和, 速率分配的目标就是在满足约束的前提下最大化系统效用。考虑到用户功率的限制, 速率离散取值, E_b/I 要求以及不同的译码顺序导致不同的系统性能, 最大化系统效用涉及速率分配与译码顺序调整的联合优化, 此问题的数学模型表示如下:

优化目标:

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

约束条件:

$$(W/R_i) \cdot \text{SINR}_i = \gamma_i, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

$$0 \leq P_i \leq P_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

$$R_i \in \text{RS}_i, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

文中称上述式(2)-式(5)所描述的优化问题为问题 M 。式(2)为优化目标, 即最大化系统效用, $U_i(R_i)$ 为用户 i 的速率取 R_i 时对应的效用, 是速率的增函数, $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_K]$ 为 K 个用户的接收功率向量, 其中 P_i 为用户 i 的接收功率, $\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$ 为 K 个用户的速率模式, 其中 R_i 为用户 i 的速率, D 代表所有 $K!$ 种可能的译码顺序。式(3)表示用户 i 的速率取 R_i 时的 E_b/I 要求。式(4)为用户 i 的接收功率限制, 这是由于移动台的发射功率有限所致。式(5)表示各个用户的速率在各自对应的离散速率集合 RS_i 中取值, 集合 RS_i 中的元素个数记为 N_i 。

在给定用户速率模式 $\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_K]$ 的情况下, 令 $Y_i = W/(R_i \gamma_i)$, 根据式(1)与式(3), 推得各用户的接收功率要求如下:

$$P_1 = \frac{I_0W}{Y_1 - \sum_{i=2}^K \prod_{j=2}^i [(\theta + Y_{j-1})/(1 + Y_j)]} \quad (6)$$

$$P_i = \frac{\theta + Y_{i-1}}{1 + Y_i} P_{i-1}, \quad i = 2, \dots, K \quad (7)$$

定义1 就某一速率模式而言, 若在某种译码顺序下, 按式(6)与式(7)方式分配用户功率能够使式(3)与式(4)得到满足, 则该速率模式可行; 否则, 即在所有 $K!$ 种可能的译码顺序下, 按式(6)与式(7)方式分配用户功率均不能够使式(3)与式(4)得到满足, 则该速率模式不可行。

对于问题 M 而言, 可能的译码顺序与速率模式随着用户数的增长而指数增长, 该问题是一NP问题, 直接通过穷举法求解不可行, 需要考虑复杂性有效的次优算法。

3 次优贪婪算法

本节首先给出任意速率模式下如何调整译码顺序及检验其可行性的有效方法, 然后, 基于此方法提出复杂性有效的次优贪婪算法。

3.1 译码顺序调整及速率模式可行性检验

定理1 某一速率模式可行的充分必要条件是是按照 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 的降序排列所确定的译码顺序下, 式(3)与式(4)能够得到满足, 其中 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 定义为

$$Z_i = P_i^{\max}(1 + Y_i) = P_i^{\max}[1 + W/(R_i\gamma_i)], \quad i=1, 2, \dots, K \quad (8)$$

该定理的证明可以参考文献[9]中的定理2, 此处从略。

本文将按照 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 降序排列所确定的译码顺序记为ZD。相应地, 称检验某一速率模式可行与否的方法为ZD检验, 此方法的步骤总结如下:

(1) 根据式(8)计算 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$, 按照 $Z_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 的降序排列调整译码顺序为ZD。

(2) 根据式(6)与式(7)计算各个用户在译码顺序ZD下的接收功率要求。

(3) 判断式(3)与式(4)在译码顺序ZD下是否得到满足。根据定理1, 若式(3)与式(4)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。

相应地, 在ZD检验中, 检验某一速率模式可行与否仅仅涉及译码顺序ZD, 而不必像穷举法那样逐次检验各个译码顺序。在最坏的情况下, 穷举法需要检验所有 $K!$ 种可能的译码顺序才能够确定某一速率模式可行与否以及可行情况下对应的译码顺序。

从式(8)可看出, 译码顺序 ZD 是综合考虑了用户最大接收功率, 速率及对应 E_b/I 要求三方面因素所得到的, ZD 检验能够有效检验速率模式可行与否, 其合理性还可通过如下的特例进行理解:

(1) 所有用户有相同的速率与 E_b/I 要求, 即所有的 $Y_i = W/(R_i\gamma_i)$ 相同。此时, 译码顺序ZD为按照 P_i^{\max} 的降序排列所确定的译码顺序。根据式(1)与式(3), 某一用户被译码的次序越靠后, 所受到的干扰就越小, 相应地, 接收功率要求就越低。因此, 按照 P_i^{\max} 的降序排列所确定的译码顺序对用户进行译码是最有可能使得式(3)与式(4)得到满足的。

(2) 所有用户的 P_i^{\max} 相同。此时, 译码顺序ZD为按照 $Y_i = W/(R_i\gamma_i)$ 降序排列所确定的译码顺序。根据式(1)与式(3), 某一用户对应的 $Y_i = W/(R_i\gamma_i)$ 越高, 其SINR要求就越低。同时, 某一用户被译码的次序越靠前, 所受到的干扰就越大。因此, 按照 $Y_i = W/(R_i\gamma_i)$ 的降序排列所确定的译码顺序对用户进行译码是最有可能使得式(3)与式(4)得到满足的。

3.2 贪婪算法的设计

基于ZD检验, 此节提出两种复杂性有效的次优贪婪算法, 用以实现速率分配与译码顺序调整的联合优化。这两种算法均以贪婪的方式逐步更新用户速率模式, 更新后的速率模式调整译码顺序为ZD, 相应地, 该速率模式可行与否通过ZD检验快速确定。

3.2.1 向上贪婪算法(Upward Greedy Algorithm, UGA)

UGA的基本思想是将对应于较低系统效用的可行速率

模式逐步更新为对应于更高系统效用的可行速率模式。在每次更新的过程中, 从所有可能重新分配速率的用户中仅选取一个用户重新分配速率, 该用户取为重新分配速率后效用增长最多者。算法设计如下。

(1) 初始化 所有 K 个用户的速率均置为各自对应离散速率集合 RS_i 中最低的速率。构造各用户的备选速率集合 PRS_i , PRS_i 包含集合 RS_i 中除最低速率外其余所有的元素, 并且 PRS_i 中的元素按照从大到小降序排列, 即首元素为最大速率, 尾元素为最小速率。

(2) 在所有非空集合 PRS_i 对应的用户中, 按照如下的方式选取用户 m 。

$$m = \arg \max_i \{U_i(R'_i) - U_i(R_i)\} \quad (9)$$

其中 R'_i 为 PRS_i 的首元素, R_i 为用户 i 的当前速率。相应地, 更新用户 m 的速率为 R'_m , 其余用户的速率不变。调整译码顺序为ZD, 根据ZD检验确定新的速率模式是否可行。若该速率模式可行, 令 $PRS_m = \phi$ 。否则, 用户 m 恢复先前的速率 R_m , 其余用户的速率不变, 并令 $PRS_m = PRS_m \setminus \{R'_m\}$ 。

(3) 重复执行(2)直至所有 PRS_i 为空, 算法结束。这时得到的速率模式为问题 M 的次优解。

3.2.2 向下贪婪算法(Downward Greedy Algorithm, DGA)

与UGA不同的是, DGA逐步更新不可行的速率模式为可行的速率模式。在每次更新的过程中, 从所有可能重新分配速率的用户中仅选取一个用户重新分配速率, 该用户取为重新分配速率后效用降低最少者。算法设计如下。

(1) 初始化 所有 K 个用户的速率均置为各自对应离散速率集合 RS_i 中最大的速率。调整译码顺序为ZD, 根据ZD检验确定此速率模式可行与否。若该速率模式可行, 算法结束。否则, 构造各用户的备选速率集合 PRS_i , PRS_i 包含集合 RS_i 中除最高速率外其余所有的元素, 并且 PRS_i 中的元素按照从大到小降序排列, 即首元素为最大速率, 尾元素为最小速率。

(2) 在所有非空集合 PRS_i 对应的用户中, 按照如下的方式选取用户 m 。

$$m = \arg \min_i \{U_i(R_i) - U_i(R'_i)\} \quad (10)$$

其中 R'_i 为 PRS_i 的首元素, R_i 为用户 i 的当前速率。相应地, 更新用户 m 的速率为 R'_m , 其余用户的速率不变。调整译码顺序为ZD, 根据ZD检验确定新的速率模式可行与否。若该速率模式可行, 算法结束。否则, 令 $PRS_m = PRS_m \setminus \{R'_m\}$ 。

(3) 重复执行(2)直至得到可行的速率模式, 算法结束。这时得到的速率模式为问题 M 的次优解。

推论1 在DGA中, 若每次更新速率模式后译码顺序不调整为译码顺序ZD, 而是采用任意其他的译码顺序, 这样所达到的系统效用不会大于采用译码顺序ZD的结果。

证明 在DGA中, 可能达到的系统效用随着速率模式的更新而逐步降低。同时, 根据定理1, 在所有可能的译码顺

序中, 速率模式在译码顺序ZD下是最有可能使得式(3)与式(4)得到满足的。因此, 在DGA中, 若每次更新速率模式后译码顺序不调整为ZD, 而是采用任意其他的译码顺序, 这样所达到的系统效用不会大于采用译码顺序ZD的结果。证毕

从上述UGA与DGA的算法设计中可看出: 在这两种算法中, 一个可能解对应的均为一种速率模式, 相应的译码顺序为ZD。尽管总的速率模式有 $\prod_{i=1}^K N_i$ 种, 但在每次速率模式更新的过程中仅有一个用户调整速率, 因此, 这两种算法的搜索空间均为 $\sum_{i=1}^K N_i$, 最坏的情况需检验所有 $\sum_{i=1}^K N_i$ 个可能解才能够求解问题M。与其相对的是, 直接用穷举法求解问题M, 一个可能解对应的是一种速率模式与任意一种译码顺序的组合, 就给定的速率模式而言, 这样可能的组合有 $K!$ 种。相应地, 穷举法的搜索空间为 $\left\{ \left(\prod_{i=1}^K N_i \right) \cdot (K!) \right\}$, 最坏的情况需检验所有 $\left\{ \left(\prod_{i=1}^K N_i \right) \cdot (K!) \right\}$ 个可能解才能够求解问题M。

4 仿真结果与性能分析

本节通过仿真实验展示上节所提算法的性能。

4.1 仿真环境

信道增益由路径损耗与阴影效应构成, 即

$$h = \frac{1}{L(d)} \cdot e^{\beta \cdot \xi} \quad (11)$$

式中 $\beta = \ln 10/10$; ξ 是零均值标准差为 σ 的高斯随机变量; $e^{\beta \cdot \xi}$ 代表服从对数正态分布的阴影效应^[10]; 以dB为单位计算路径损耗 $L(d)$ 的公式为^[10]

$$L(d) = 129.4 + 35.2 \cdot \lg(d) \quad (12)$$

此处 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这样产生: 先给出所有用户接收信号最大信噪比的平均值, 根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) 范围内随机均匀产生各用户的路径损耗。

典型系统参数根据文献[10]设定, 3.84MHz的系统带宽, 移动台最大发射功率为0.25W, 接收机噪声功率为-103.2dBm, 3dB的外小区干扰储备, 阴影效应标准差 σ 为6dB。实际系统中小区的用户数通常为30-40^[2], 因此, 本文小区用户数设为40, 各用户的速率集合为 $\{0, 2^1, 2^2, \dots, 2^8\}$ kbps, 所有非0速率的 E_b/I 要求为4dB。此外, 效用函数的定义如文献[3]:

$$U_i(R_i) = \begin{cases} a_i + b_i \cdot \ln(R_i - c_i), & R_i > c_i \\ 0, & R_i \leq c_i \end{cases} \quad (13)$$

式中用户速率 R_i 的单位为kbps, 参数 a_i, b_i 与 c_i 假设在 $(0, 1)$ 区间内服从均匀分布, 在仿真过程中随机产生。

4.2 译码顺序对贪婪算法性能的影响

图1与图2分别展示了UGA与DGA在不同译码顺序下所达到的系统效用, 此处RA为按照速率升序排列所确定的译

码顺序, RD为按照速率降序排列所确定的译码顺序, 而RN为随机选择的译码顺序。图1中, 在译码顺序ZD下, UGA所达到的效用总是大于同一算法在其他译码顺序下所达到的效用。图2中, 在译码顺序ZD下, DGA所达到的效用不小于同一算法在其他译码顺序下所达到的效用, 这与推论1是一致的。此外, 从图1及图2还可看出, 残余功率因子 θ 越小, 算法在ZD与其他译码顺序下的效用差异就越明显。这是由于 θ 越小, 对应于更高效用的速率模式就越有可能可行, 而根据定理1, 在译码顺序ZD下, 式(3)与式(4)最有可能被满足即使在其它的译码顺序下约束不被满足。因此, 效用差异随着 θ 的降低而更加明显。

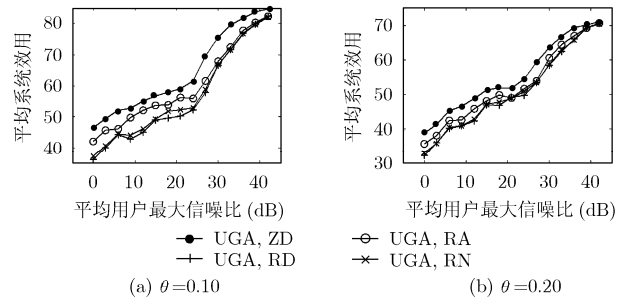


图1 译码顺序对UGA的影响

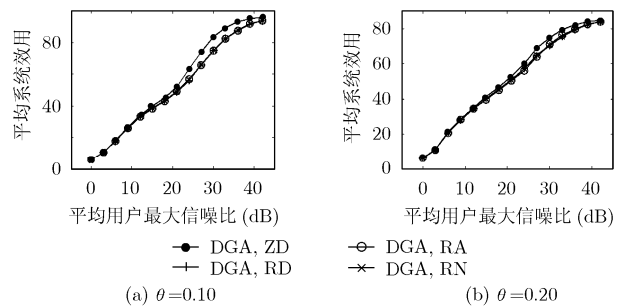


图2 译码顺序对DGA的影响

4.3 贪婪算法与穷举法的比较

4.3.1 计算量的比较 如3.2节的分析, UGA与DGA中可能解的数目为 $\sum_{i=1}^K N_i$, 而穷举法中可能解的数目为 $\left\{ \left(\prod_{i=1}^K N_i \right) \cdot (K!) \right\}$ 。检验某一可能解可行与否的过程涉及相同的计算量, 该过程涉及的操作包括通过式(6)与式(7)计算各用户的接收功率要求以及判断式(4)满足与否。因此, 算法的计算量可用所需检验的可能解的个数来衡量。在仿真实验中, $K = 40, N_i = 9$, 在最坏的情况下, 穷举法求解问题M所需检验的可能解的数目为 $\left\{ \left(\prod_{i=1}^K N_i \right) \cdot (K!) \right\} = 1.2060 \cdot e+086$; 与其相对的是, UGA与DGA求解问题M所需检验的可能解的个数至多为 $\sum_{i=1}^K N_i = 360$ 。图3从所需检验的可能解的个数角度给出UGA与DGA的计算量, 此处残余功率因子 θ 为0.1。从图中可看出, UGA与DGA所需检验的可能

解的数目仅为上百个, 较之穷举法, 计算量显著降低。

4.3.2 系统效用的比较 为保证穷举法能够仿真实现, 本节考虑用户规模较小的情况, 即用户数为6的情况。此外, 为避免移动台最大发射功率的限制过于宽松使得所有用户均可取到最大速率, 限制各移动台的最大发射功率仅为0.025W。图4比较了当残余功率因子 θ 为0.1时不同算法所得到的系统效用, 此处ESM对应于穷举法。从图中可看出, UGA在所有信噪比的情况下均接近于穷举法得到的最优解, 而DGA在信噪比较高的情况下同样能够接近于最优解。

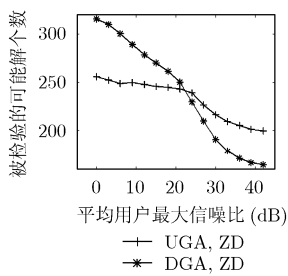


图3 贪婪算法的计算量

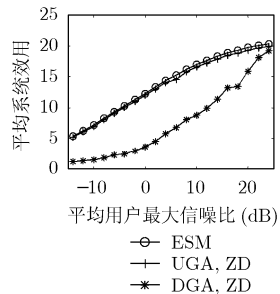


图4 不同算法的系统效用

4.4 两种贪婪算法的相互比较

综合图1-图3, 对两种贪婪算法UGA与DGA的性能进行比较后, 可以得到如下的结论: 在(实际系统)用户规模较大的情况下, 当信噪比较低时, UGA的计算量较低同时具有更高的系统效用, 即UGA有着更好的性能; 与其相对的是, 当信噪比较高时, DGA的计算量较低同时具有更高的系统效用, 即DGA有着更好的性能。

5 结束语

本文考虑了非理想串行干扰消除下DS-CDMA系统上行链路的效用最大化问题。在这类系统中, 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, 最大化基于用户速率的系统效用是NP问题, 需要考虑速率分配与译码顺序调整两方面的联合优化, 而在实际情况中, 通过穷举法求解这类NP问题是不可行的。文中针对此问题提出了两种复杂性有效的次优贪婪算法。在这类算法中, 用户速率模式逐步贪婪地更新, 再针对每步更新后的速率模式调整译码顺序, 根据调整后的译码顺序快速检验对应速率模式的可行性, 而不是采用穷举法逐个验证所有可能的译码顺序。相应地, 算法具有较低的计算复杂性和较好的性能, 可用于实现DS-CDMA系统中用户速率的快速有效分配。

参考文献

[1] Buzzi S and Poor H V. Joint receiver and transmitter optimization for energy-efficient CDMA communications[J].

IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(3): 459-472.

[2] Chatterjee M, Lin Hai-cao, and 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 and Li Ye. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-Part I: theoretical framework[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(2): 614-624.

[4] Hou Jie-lei, Smee J E, and Pfister H D, et al. Implementing interference cancellation to increase the EV-DO RevA reverse link capacity[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(2): 96-102.

[5] Benvenuto N, Carnevale G, and Tomasin S. Joint power control and receiver optimization of CDMA transceivers using successive interference cancellation[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 2007, 55(3): 563-573.

[6] Jalali S and 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.

[7] Shu Tao and Niu Zhi-sheng. Optimal decoding order and power allocation in multimedia CDMA networks with imperfect successive interference cancellation[C]. *IEEE Vehicular Technology Conference, Jeju, South Korea, 22-25 Apr, 2003, Vol.1: 358-362.*

[8] Veronesi D, Tomasin S, and Benvenuto N. Cross-layer optimization for multimedia traffic in CDMA cellular networks[J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008, 7(4): 1379-1388.

[9] Zhou Zhao-rong, Feng Gang, and Zhang Yi-de, et al. Efficient feasibility examination for successive interference cancellation in DS-CDMA systems[C]. *IEEE Global Communications Conference, New Orleans, LA, USA, 30 Nov-4 Dec, 2008: 1-5.*

[10] Holma H and Toskala A. WCDMA for UMTS[M], 3rd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2004: 186-229.

周朝荣: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为无线资源管理。

李乐民: 男, 1932年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为宽带通信网络技术。

张翼德: 男, 1977年生, 博士, 副教授, 研究方向为跨层协议、无线网络多播技术及无线资源管理。

冯 钢: 男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络技术。