

基于自适应集中性和多样性搜索策略的多用户检测方法^{*}

温万惠¹ 刘光远¹ 贺 一²

(西南师范大学电子信息工程学院 重庆400715)¹ (重庆师范大学现代信息管理系 重庆400047)²

摘要 序列扩频系统的性能受到多用户干扰的严格制约。多用户检测方法被证明是限制这种干扰的一种有效方法。本文提出一种自适应 Tabu 搜索算法,用于序列扩频系统中的多用户检测,其中引入自适应集中性和多样性搜索策略,充分发挥短禁忌周期彻底搜索局部空间的能力。仿真实验表明,这种多用户检测方法具有接近最佳检测的误比特性能和较好的抗远近效应能力,并具有多项式计算复杂度。

关键词 多用户检测, Tabu 搜索算法, 自适应集中性和多样性搜索策略

A New Multi-user Detection Method Based on Adaptive Intensification and Diversification Search

WEN Wan-Hui LIU Guang-Yuan HE Yi

(School of Electronic Information Engineering, South-West Normal University, Chongqing 400715)¹

(Department of Advanced Information Management, Chongqing Normal University, Chongqing 400047)²

Abstract The performance of CDMA system is deeply constrained by multi-user interference. Multi-user detection is proved to be an effective method to restrain such interference. In this paper, an adaptive Tabu Search algorithm is proposed for multi-user detection in CDMA system, where a novel intensification and diversification strategy is introduced in the fixed list size Tabu Search algorithm so as to improve its capability to find the global optimum. Simulation shows that this MUD method has excellent BER, anti-near-far performance as well as polynomial computational complexity.

Keywords Code-division multi-access, Multiuser detection, Tabu search algorithm, Adaptive intensification and diversification search

1 引言

直接序列扩频(DS-CDMA)是最常用的 CDMA 扩频方式。在 DS-CDMA 中,每个用户被分配给不同的扩频序列。在多用户信道环境下,接收机接收的信号是系统中每个用户的信号经过叠加并被背景噪声污染后的信号。扩频序列的正交性在实际通信环境下不可能达到理想状态,因此多用户干扰总是存在。多用户检测(MUD)的目的就是从接收到的混合信号中准确地检测出用户的传送数据。

在文[1]中, S. Verdu 提出并分析了一种基于最大似然检测(ML)的 MUD 方法。该方法具有最优的误比特性能和抗远近效应能力。然而,其计算复杂度却随用户数呈指数增长,已被证明是一个 NP 完全问题^[2]。为了在误比特性能、抗远近效应能力和计算复杂度三方面取得一个合理的折衷,多年来人们不断探索在前两个性能上接近最优检测而又具有多项式复杂度的 MUD 方法。这些方法大致可分为三类:线性检测方法(如:解相关检测);非线性检测方法(如:多级干扰消除);计算智能方法(如:禁忌搜索(TS)、遗传算法(GA))。计算智能多用户检测方法是近几年随着计算优化算法的发展而出现的。文[3]中提出了一种基于严格禁忌搜索(Strict Tabu Search)策略的多用户检测方法。文[4]中提出了一种基于遗传算法的多用户检测方法。文[5]和文[6]将几种计算智能多用户检测方法进行了综述。

文[7]中指出,在基本禁忌搜索算法中加入某些策略,可以增强算法的全局寻优能力。严格禁忌搜索(Strict Tabu Search)策略禁忌过去迭代找到的所有解,因此可以完全避免搜索循环的发生,但当全局最优解周围分布了很多局部最优解时,搜索可能停止在局部最优解处。在文[5]中将响应禁忌搜索(RTS)用于多用户检测。RTS 的全局寻优策略是,当搜索出现循环的次数超过某一值时,增大禁忌长度,并辅以相应的减小禁忌长度的条件,使得禁忌长度自适应于搜索的需要。由于禁忌长度选取对于算法的性能起关键作用(禁忌周期长有利于防止循环发生但使算法效率低;禁忌周期短有利于对局部空间更彻底的搜索但算法不易跳出局部最优),基本禁忌搜索算法(即定长禁忌搜索(Fixed List Tabu Search))往往需要和其它策略配合使用。

本文介绍一种基于自适应集中性和多样性搜索的多用户检测方法,它以传统匹配滤波器的判决输出作为初始解,采用定长禁忌搜索算法,在其中引入自适应的集中性和多样性搜索策略,充分发挥短禁忌周期彻底搜索局部空间的能力,辅以有效的多样性搜索策略,避免算法陷入局部最优,从而使算法的全局寻优能力大大增强。文章接下来的部分首先介绍多用户 CDMA 的系统模型,然后介绍 TS 算法的基本原理并将其用于多用户检测,接着给出对自适应集中性和多样性搜索策略的描述。最后以一个120个用户的 CDMA 系统的仿真结果来说明算法的性能。

^{*} 本文受以下基金项目资助:教育部科学技术研究重点项目(104262);重庆市自然科学基金项目(2003-7881)。温万惠 硕士研究生,主要研究方向为计算智能与通信。刘光远 博士,教授,硕士生导师,目前主要从事的研究方向为神经网络、模糊控制及现代优化方法。

2 多用户 CDMA 系统模型

对于有 K 个用户的同步 CDMA 系统,接收机接收到的

$$r(t) = \sum_{k=1}^K b_k(t - \tau_k) S_k(t - \tau_k) + n(t - \tau_k) \quad (1)$$

其中, b_k 表示第 k 个用户的二进制信号, s_k 表示第 k 个用户的特征波形, τ_k 是某一接收机的接收时延, $n(t)$ 为背景噪声。由于异步系统可以等效为某一同步系统^[8], 为简化分析, 假设一个同步 CDMA 系统, 采用 BPSK 调制, 背景噪声为加性高斯白噪声(AWGN)。则接收机匹配滤波器的输出可表示为:

$$y = b + Qb + z \quad (2)$$

其中, $y = [y_1, y_2, \dots, y_K]$ 表示 K 个匹配滤波器的输出, $b = [b_1, b_2, \dots, b_K]$ 表示所需解调的数据向量, Qb 表示多用户干扰, $z = [z_1, z_2, \dots, z_K]$ 是 AWGN 的匹配滤波器输出,

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1K} \\ \rho_{21} & 0 & \dots & \rho_{2K} \\ \cdot & \cdot & \ddots & \cdot \\ \rho_{K1} & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

表示各用户的扩频序列的互相关矩阵。

传统接收机是直接对匹配滤波器的输出进行取符号运算而得到判决结果。由(2)式可知, 在各用户的互相关系数不为零时, 其判决结果受到多用户干扰的影响。

在文[1]中, S. Verdu 提出一种基于最大似然检测的最佳多用户检测方法:

$$b' = \arg \max_{b_1, \dots, b_K} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \int_0^T [r(t) - \sum b_k S_k(t)]^2 dt \right\} \quad (3)$$

其中, $b' = [\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_K]$ 是检测结果向量。要检测出由 K 个用户的发送比特组成的向量 $b = [b_1, b_2, \dots, b_K]$, 需要在解空间的 2^K 个可能解中进行搜索, 该问题是一个 NP 完全问题。然而, 当各用户以相等的功率发送数据时, 我们可以把最佳多用户检测描述为以下二进制约束优化问题^[4]:

$$\min f(b) = b^T R b - 2y^T b \quad (4)$$

$$\text{s. t. } b_i \in \{\pm 1\}^K, i = 1, 2, \dots, K$$

其中, b 为可行解向量, y 为匹配滤波器的输出向量, R 为扩频码的归一化相关矩阵。

3 TS 算法及其在 MUD 中的应用

TS 算法是 F. Glover 提出的一种解决全局优化问题的启发式算法^[9]。对于(4)式描述的二进制约束优化问题, 定义 TS 算法的评价函数: $f(b) = b^T R b - 2y^T b$, 在解空间 S 中, 找到一个使评价函数值最小的向量 b' , 即为与发送比特向量的 Euclidean 距离最小的解向量^[1], TS 算法把它作为判决解向量。

定长 TS 算法中, 禁忌表的长度是确定的, 当解空间的崎岖程度大到当前的禁忌长度不能跳出局部最优时^[7], 就需要采用其它的策略, 使算法能够继续全局寻优的过程。文[10]中提出了一种集中性和多样性搜索的自适应策略, 并用之对 TSP 问题进行求解, 证明了这种策略的有效性。

基于以上考虑, 下面将要描述的算法中, 采用了图1所示的自适应集中性和多样性搜索策略, 该策略有以下四个特点:

(1) 引入长时记忆, 即记忆过去每一步迭代最好解的评价函数值; (2) 根据评价函数值的比较, 自适应地选择集中性搜索或多样性搜索; (3) 根据禁忌表的状态, 集中性搜索自适应地进行, 这体现在集中性集合长度的自适应变化; (4) 多样性搜索自适应地进行, 这体现在多样性集合长度的自适应变化。

图1描述了集中性和多样性的自适应策略, 其中, Int_end 为集中性搜索最好解所在的位置, 也为集中性搜索集合的长度, 它的变化范围为 $1 \leq Int_end \leq tlength + 1$, num_div 为多样性搜索集合的长度, 它的变化范围为: $2 \leq num_div \leq \frac{size(N)}{4} - Int_end$ 。

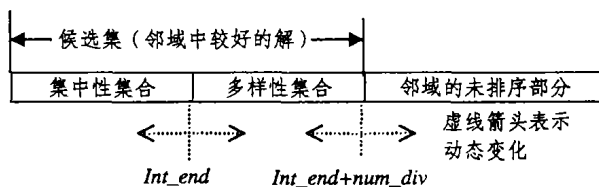


图1 集中性和多样性的自适应策略

算法的基本步骤如下:

步1: 初始化。以传统匹配滤波器的判决输出作为 TS 算法的初始解 b_{now} 。设置禁忌长度为 $tabulength = 2$; 置禁忌表为空。对当前最好解 $best_so_far$ 及其评价函数值 $f_{best_so_far}$ 、多样性搜索解集的长度 num_div 、过去迭代最好解 $f_{past}(j)$ (j 为迭代步数) 初始化;

步2: 产生邻域和候选集。产生当前解 b_{now} 的邻域, 找出其中评价函数值较好的部分组成候选集。

步3: 集中性搜索。通过与禁忌表的比较, 找到邻域中未被禁忌的最好解作为本次迭代的集中性搜索最好解 $best_Int$, 并记录这个解在邻域中的位置为 Int_end ;

步4: 判断。通过评价函数值的比较, 判断搜索是否循环, 若未出现循环, 不需进行多样性搜索, 本次迭代最好解 $best_this_step = best_Int$, 多样性搜索集长度 $num_div = \max(2, num_div - 2)$, 转到步6; 若搜索出现循环, 进行多样性搜索;

步5: 多样性搜索。选取候选集的第 $Int_end + 1$ 个到第 $Int_end + num_div$ 个解作为多样性搜索解集, 再在该集合中随机选取1个解作为多样性搜索的最好解 $best_div$ 。本次迭代最好解 $best_this_step = best_div$, 多样性搜索集长度 $num_div = \min(num_div + 2, \frac{size(N)}{4} - Int_end)$;

步6: 更新。记录本次迭代最好解的评价函数值, 并更新当前最好解 $best_so_far$ 。

步7: 禁忌。禁忌本次迭代最好解 $best_this_step$, 同时修改禁忌表中各对象的任期。判断是否已达到最大迭代步数。若否, 则返回步2; 若是, 则结束搜索过程, $best_so_far$ 作为 TS 的判决向量。

4 仿真结果与说明

仿真基于以下条件:

- (1) 同步系统, 用户数为120。
- (2) 扩频码采用127位的 PN 码, 即扩频增益为127, 归一化最大互相关系数为23/127。
- (3) 调制方式为 BPSK 调制。

4.1 检测性能

在图2中给出了几种多用户检测方法误比特率的比较。从中可以看出, 在本文中提出的 ATS 和在文[7]中提出的 RTS 具有很好的 BER 特性, 接近理想状态(即单用户 singleuser 时的 BER)。当信噪比较大时, ATS 的误比特率性能比 RTS 稍好。

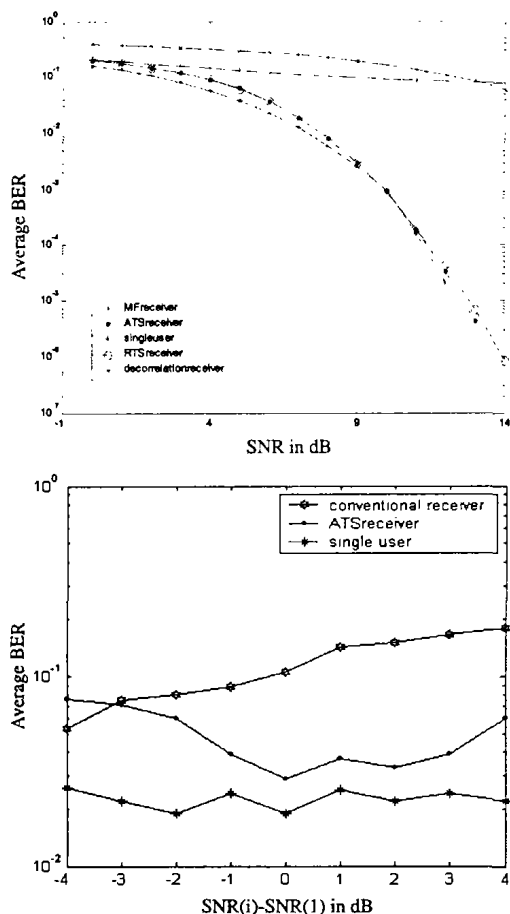


图2 BER 性能比较

4.2 抗远近效应能力

假使用户1为期望用户, SNR(1)=6dB,横轴表示期望用户与干扰用户发送功率比,图3给出了三种多用户检测方法抗远近效应能力的比较,从中可以看出,ATS对远近效应不敏感,具有较好的抗远近效应的能力。

4.3 计算复杂度

仿真所用的自适应禁忌搜索算法,最大迭代步数为 $maxstep = 400 = floor(\alpha \times K)$,即不大于 $\alpha \times K$ 的整数, α 是一

个正实数, K 为系统中的用户数。判断是否进行多样性搜索时进行的评价函数值比较最多为 $\alpha \times K$ 次。对邻域的排序最多需要 $K \times K$ 次迭代,因此算法复杂度为:

$$O(\alpha K(K^2 + K)) = O(K^3)$$

结论 本文介绍了一种基于自适应集中性和多样性搜索策略的多用户检测方法。根据评价函数值的比较,算法自适应地选择集中性搜索或多样性搜索。由于禁忌长度取得很短,集中性搜索可以对好解空间进行彻底搜索以寻找全局最优解;多样性搜索选取最优解时是在多样性集中随机选取的,这保证了搜索的广泛性,并且搜索的广泛性还受多样性集大小的自适应变化的控制。这种集中性和多样性的自适应搜索策略,既保证了算法的有效性,又使搜索能高效率地进行。经仿真实验证明,该方法所用的自适应集中性和多样性搜索策略可以大大增强基本禁忌搜索算法的全局寻优能力,使这种多用户检测方法具有接近最佳检测的误比特性能和较好的抗远近效应能力,并且具有多项式计算复杂度 $O(K^3)$ 。

参考文献

- Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multi-access channels. IEEE Trans. Inform. Theory, 1986, 32: 85~96
- Verdu S. Optimum multi-user asymptotic efficiency. IEEE Trans. Commun., 1986, 34: 890~897
- 王焱滨,李春光,虞厥邦.一种基于禁忌搜索的多用户检测方法.信号处理,2002,18(3): 207~215
- Abedi S, Tafazolli R. Genetic multiuser receiver for code division multiple access communications. IEE Electron. Lett., 2000, 36: 1957~1958
- Tan P H. Multiuser Detection in CDMA - Combinatorial Optimization Methods. [Tech. Rep. 408L]. Department of Comp. Eng., Chalmers University of Technology, Sweden, 2001
- Tan P H, Rasmussen L K. Multiuser detection in CDMA-a comparison of relaxations, exact and heuristic search methods, to appear in IEEE Trans. Wireless Commun
- Battiti R, Tecchiolli G. The reactive tabu search. ORSA Jour. on Computing, 1994(2): 126~140
- 唐普英. 计算智能及其在 multi-user 检测中的应用研究. [电子科技大学博士学位论文]. 2002
- Glover F, Laguna M. Tabu search. Kluwer Academic Publishers, Boston MA, 1997
- 贺一, 刘光远. Tabu Search 中集中性和多样性的自适应搜索策略. 计算机研究与发展, 2004, 41(1): 162~166

(上接第38页)

都是带宽的函数,因此,在这样的网络中,延时-延时抖动约束路由问题就是多项式时间可解的。

小结 当前主要的 QoS 技术包括 IntServ、DiffServ 和 MPLS, 这些 QoS 机制都需要 QoS 路由来为其寻找(如果存在的话)能满足可用资源要求的路径。但是,单播和多播的 QoS 路由都可能会遇到基本的单度量路由问题,或由其派生的多度量组合路由问题。这些问题中,有些是多项式可解的,有些有 NPC 复杂度,但可以用一些成熟的启发式方法来解决,而且对于不是“强 NPC”的组合问题,也存在多项式时间内求解的精确算法。此外,在实际网络中人们很少遇到网络传输的 NPC 行为。

如果在 QoS 路由协议或算法的设计中,有效地解决了上述多种可能面临的路由问题,就能通过 QoS 路由的实现,满足网络应用量化的 QoS 要求,而且达到有效地利用资源,均衡网络负载,提高网络吞吐量的目的。

参考文献

- Juva H. Analysis of Quality of Service Routing Approaches and

Algorithms. Master's thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, 2003. 12~28

- Wang Z, Crowcroft J. QoS Routing for Supporting Multimedia Applications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 2~16
- Chen Shigang, Nahrstedt K. An overview of Quality of Service Routing for Next-Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions. IEEE network, 1998, 67~68
- Kuipers F A, Van Mieghem P. MAMCRA: a constrained-based multicast routing algorithm. Computer Communications, 2002, 25(8): 801~810
- Wang B, Hou J C. Multicast routing and its qos extension: problems, algorithms, and protocols. IEEE Network, 2000, 14(1): 22~36
- Alkahtani A M S, Woodward M E, Al-Begain K. An Overview of Quality of Service (QoS) and QoS Routing in Communication Networks. ISBN: 1-9025-6009-4 (c) 2003 PGNet
- Orda A, Sprintson A. QoS Routing: The Precomputation Perspective. IEEE INFOCOM 2000 - The Conference on Computer Communications, 2000, 1: 128~136
- Guerin R, Orda A, Williams D. QoS Routing Mechanisms and OSPF Extensions. IETF Internet Draft, 1996, citeseer. nj. nec. com /guerin96qos. html