

认知无线网络中基于和声搜索的频谱分配与功率控制

杨劲松¹ 曾碧卿² 胡翩翩¹

(华南师范大学计算机学院 广州 510631)¹ (华南师范大学软件学院 佛山 528225)²

摘 要 针对认知无线网络中功率控制和频谱分配过程存在互相影响的问题,提出一种基于和声搜索的频谱分配和功率控制算法。通过综合分析频谱分配和功率控制过程中的各种约束条件,建立了联合功率控制和频谱分配的系统模型。算法根据系统模型特点设计和声搜索算法下相应编码方案,采用多目标优化方法处理复杂的约束条件,并赋予可行解适当的优先权重。仿真实验表明,算法可以很好地解决认知无线网络中的频谱分配和功率控制问题。

关键词 认知无线网络,多目标优化,频谱分配,功率控制,和声搜索

中图法分类号 TN925 **文献标识码** A

Spectrum Allocation and Power Control Based on Harmony Search Algorithm in Cognitive Radio Network

YANG Jin-song¹ ZENG Bi-qing² HU Pian-pian¹

(School of Computer, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)¹

(School of Software, South China Normal University, Foshan 528225, China)²

Abstract Aiming at the problem of the power control and spectrum allocation processes generating interference with each other in cognitive radio network, we proposed a power control and spectrum allocation algorithm based on harmony search in cognition radio network. With the comprehensive analysis of the conditions of various constraints and influence in the processes of spectrum allocation and power control, system model which joints power control and spectrum allocation is established. Coding scheme of harmony search algorithm was designed based on the characteristics of system model, and the algorithm chose the method of multi-objective optimizations to deal with model in complex constraints by giving feasible solutions appropriate priority weights. Simulation experiments show that the algorithm can solve the spectrum allocation and power control problems very well in cognitive radio network.

Keywords Cognitive radio network(CRN), Multi-objective optimization, Spectrum allocation, Power control, Harmony search

1 引言

无线电频谱资源是无法再生的无线通信资源。随着无线设备的发展和频谱资源占用需求的增大,使得频谱资源愈加紧张。如何有效提高无线频谱利用效率,合理分配频谱资源,以满足人们日益增长的对通信业务多样性的、高带宽性的和高质量的需求,成为制约无线网络发展的重要问题。认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术作为一种有效提高频谱资源利用率的方法已受到国内外学者的广泛关注^[1]。CR系统中,引入具有认知能力的次用户(Secondary User, SU),通过动态地感知周围环境,发现时域、频域和空域上可以被利用的频谱空洞,自适应地改变SU的传输功率、调制方式等无线电特性参数的手段来避免对主用户(Primary User, PU)的干扰,从而实现动态频谱共享^[2]。

针对CRN中的频谱问题,国内外学者进行了大量研究。文献[3]把次用户看作拓扑中的节点,将可用频谱看作是一种

颜色,将CRN中频谱分配问题抽象成图着色问题,以最大化频谱分配数量为目标,提出了一种基于列表着色的分布式贪婪频谱分配方案。但文献[3]缺乏对不同次用户之间的频谱效益和干扰的差别的考虑,针对这种情况,文献[4]引入效益矩阵来表示不同次用户在相应频段进行通信时获得的效益,提出了一种颜色敏感着色算法,算法通过设计不同的次用户标号值和颜色标号值,满足不同情况下系统的性能需求,取得了较好的频谱分配结果。但以上算法欠缺功率控制对网络性能的影响。文献[5]针对CRN中干扰温度和信干噪比参数不确定性问题,提出一种顽健分布式功率控制算法,将顽健功率控制问题转化为确定性的资源分配问题,实现了最小化认知系统功率消耗的目标,但却欠缺对信道选择的考虑。因此,不少学者开始考虑在频谱分配过程中同时联合进行用户功率控制。文献[6]考虑了用户功率对网络干扰的影响,通过将用户功率量化分级,提出了一种基于差分演化的功率控制与信道分配算法,实现了功率和频谱同时分配。文献[7]基于市场博

本文受国家自然科学基金项目(71272144),广州市科技计划项目(2013KP084)资助。

杨劲松(1991—),男,硕士生,主要研究方向为认知无线网络、智能算法, E-mail: yjsong4412@126.com; 曾碧卿(1969—),男,博士,教授,主要研究方向为分布式处理、并行 I/O、P2P 和认知无线网络, E-mail: zengbiqing0528@163.com; 胡翩翩(1991—),男,硕士生,主要研究方向为移动互联网。

弈理论,提出一种基于合作议价博弈的频谱分配方案,该方案在最大系统吞吐量和最小认知用户速率的同时,实现了公平有效的功率和频谱分配。

CRN的频谱分配和功率控制问题是非线性优化问题,传统的图论方法和最优化方法求解这类问题非常困难。和声搜索(Harmony Search, HS)算法是一种新兴的、高效的智能算法,自提出以来被广泛应用于多种约束优化、多目标优化分类问题以及相关工程实践领域^[8,9]。本文通过对CRN中功率控制和频谱分配问题建立相关系统模型,提出了一种基于和声搜索的认知无线网络频谱分配和功率控制算法,通过设计相应编码方案及约束条件的控制机制,增强算法寻解能力,确保算法快速收敛。

2 系统模型

考虑基于OFDM的认知无线网络,其包含一个主网络和一个次网络,如图1所示。主网络使用现存基础设施架构,包含多个主用户(PUs)和一个主用户基站(pBS),主用户忽略次用户的存在,通过主基站通信。次网络包含多个次用户(SUs)和一个次用户基站(sBS),使用具有CR技术的基础设施。每个次用户配置一副全向天线,使用半双工通信。次用户感知所有信道状态信息,并将感知结果发送给次用户基站(sBS)。次用户基站接受来自主用户基站发送的主用户信息和所有次用户的感知信息。假设:在 $X \times Y$ 的平面区域中随机分布 M 个主用户和 K 个次用户。主用户 m 以固定功率 p_m 发送消息,最大干扰负荷为 I_m^{\max} 。次用户 k 最小传输速率要求为 R_k^{\min} ,在信道 n 上的信道增益为 $g_{k,n}$ 。次基站最大功率负荷为 p^{total} 。

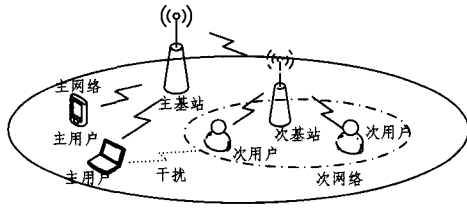


图1 基于OFDM的认知无线网络

系统采用OFMA调制技术,信道分成 N 个可用信道,每个信道的宽度为 w ,假定系统频谱分布情况如图2所示。

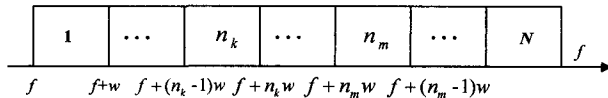


图2 系统频谱分布情况

由于存在旁瓣功率泄露,使得授权频带的主用户将受到来自使用其他频带的次用户的干扰,同时次用户也将受到主用户的干扰。主用户 m 对次用户 k 使用信道 n 时的干扰可表示为:

$$I_{n,k,m}^{\text{PS}} = p_m T_s \int_{|n_k - n_m - \frac{1}{2}|w}^{|n_k - n_m + \frac{1}{2}|w} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df \quad (1)$$

其中, n_k 为次用户 k 使用信道编号, n_m 为主用户 m 使用信道编号, T_s 为OFDM频率周期。

类似地,可得次用户 k 对主用户 m 使用信道 m 时的干扰可表示为:

$$I_{n,k,m}^{\text{SP}} = p_{k,n} T_s \int_{|n_k - n_m - \frac{1}{2}|w}^{|n_k - n_m + \frac{1}{2}|w} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df \quad (2)$$

其中, $p_{k,n}$ 表示次用户 k 使用信道 n 上的发送功率。

假设次用户能完全获知各子信道的衰落情况,并能够自适应加载发射功率,定义次用户 k 在子信道 n 上的信号噪声干扰比(SINR)为:

$$H_{k,n} = \frac{g_{k,n}}{\Gamma(N_0 w + \sum_{m=1}^M I_{n,k,m}^{\text{PS}})} \quad (3)$$

其中, N_0 为加性高斯白噪声, Γ 为MQAM编制下的SINR差额, $\Gamma = -\ln(5\text{BER})/1.5$,BER为信道上的误码率^[10]。

根据香农公式,次用户 k 使用信道 n 时能达到的最大瞬时数据速率为:

$$R_{k,n} = w \log_2(1 + p_{k,n} H_{k,n}) \quad (4)$$

假设每个信道只被一个用户占用,因此次用户在发送数据时不会产生同频干扰。本文功率控制和频谱分配的目标是最大化CRN系统的总速率,即最大化所有次用户最大瞬时数据速率之和。CRN中的频谱分配和功率控制问题可形式化表示如下:

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} R_{k,n} \quad (5)$$

subject to: C1: $R_{k,n} \geq R_k^{\min}, \forall k \in K$

$$\text{C2: } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} I_{n,k,m}^{\text{SP}} \leq I_m^{\max}, \forall m \in M$$

$$\text{C3: } \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N a_{k,n} p_{k,n} \leq p^{\text{total}}$$

$$\text{C4: } \sum_{k=1}^K a_{k,n} \leq 1, \forall n \in N$$

$$\text{C5: } p_{k,n} \geq 0, \forall n \in N, \forall k \in K$$

3 基于和声搜索的频谱分配和功率控制实现

3.1 和声记忆库编码设计

由于每个信道同时只能被一个次用户使用,编码方式采用对所有信道对应的次用户编号进行编码,相比传统的对信道编号进行编码的方案,在次用户数目固定时,解向量 X_i 的变量个数相同,而在可用信道数目固定时,解向量 X_i 的变量个数更少,有利于减少解空间维度,使算法更快收敛。另外,考虑次用户信道分配的同时进行次用户功率分配,编码的长度设计为信道的个数 n 的两倍,分配方案 X_i 可表示为: $X_i = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), x_i = \langle k_i, p_i \rangle, k_i$ 表示信道 i 分配给次用户 k_i 使用, k_i 的取值范围为 $[1, K]$ 的整数,表示次用户的编号。次用户 k_i 在信道 i 上使用功率 p_i 进行通信。

因此和声记忆库HM设计为:

$$HM = \begin{bmatrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^{HMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle k_1^1, p_1^1 \rangle & \langle k_2^1, p_2^1 \rangle & \dots & \langle k_n^1, p_n^1 \rangle & f(x^1) \\ \langle k_1^2, p_1^2 \rangle & \langle k_2^2, p_2^2 \rangle & \dots & \langle k_n^2, p_n^2 \rangle & f(x^2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \langle k_1^{HMS}, p_1^{HMS} \rangle & \langle k_2^{HMS}, p_2^{HMS} \rangle & \dots & \langle k_n^{HMS}, p_n^{HMS} \rangle & f(x^{HMS}) \end{bmatrix}$$

3.2 约束条件处理

由于CRN中的频谱分配和功率控制问题约束条件较为复杂,在搜索的解空间内将存在较多的不可行解。如果算法迭代过程中完全拒绝不可行解,将会使算法收敛速度变得非常慢。因此本文采用多目标优化方法处理约束条件,将原来的约束优化问题转化为两个目标函数进行优化:a)原问题的目

标函数 $f(x_i)$; b) 违反约束条件的程度的不可行度函数 $\Phi(x_i)$ 。

由式(4)和式(5), 原问题目标函数为:

$$f(x_i) = \sum_{n=1}^N \omega \log_2 \left(1 + p_n \frac{g_{k,n}^{k,n}}{\Gamma(N_0 \omega + \sum_{m=1}^M I_{n,k,m}^{PS})} \right) \quad (6)$$

根据约束条件, 定义解向量的不可行度 (Infeasibility Degree, IFD), 只有当一个解的不可行度小于一定阈值时, 该解才被允许进入和声记忆库。

因此定义解向量 x_i 的不可行度函数 $\Phi(x_i)$ 为对各个约束条件产出偏差值的平方和:

$$\Phi(x_i) = \sum_{j=1}^J [\min\{0, g_j(x_i)\}]^2 + \sum_{k=J+1}^n [h_k(x_i)]^2 \quad (7)$$

由约束条件 C1、C2 和 C3 分别计算相应冲突的约束值:

$$g_1^k(x_i) = \sum_{n=1}^N \omega \log_2 \left(1 + p_n \frac{g_{k,n}^{k,n}}{\Gamma(N_0 \omega + \sum_{m=1}^M I_{n,k,m}^{PS})} \right) - R_k^{\min} \quad (8)$$

$$g_2^m(x_i) = I_m^{\max} - \sum_{n=1}^N I_{n,k,m}^{SP} \quad (9)$$

$$g_3(x_i) = P^{\text{total}} - \sum_{n=1}^N p_{k,n} \quad (10)$$

由于 HM 矩阵设计使得不会出现一个信道分配给多个次用户的情况, 因此约束条件 C4 不必再考虑。同时, 次用户使用功率作为解分量取值范围始终大于零, 算法迭代过程中不会出现违反约束条件 C5 的情况, 故也无需考虑。因此最终不可行度函数 $\Phi(x_i)$ 为:

$$\Phi(x_i) = \sum_{k=1}^K [\min\{0, g_1^k(x_i)\}]^2 + \sum_{m=1}^M [\min\{0, g_2^m(x_i)\}]^2 + [\min\{0, g_3(x_i)\}]^2 \quad (11)$$

定义不可行度阈值为 Φ_{crit} :

$$\Phi_{crit} = \frac{1}{t} \left(\sum_{i=1}^{IMS} \Phi(x_i) \right) / HMS \quad (12)$$

其中, $1/t$ 为退火因子, 随着迭代的进行, t 由 T_0 变化到 T_1 。在迭代开始阶段不可行度阈值较大, 算法以较大概率接受不可行解, 有利于跳出局部极值, 避免陷入局部最优。随着迭代进行, 不可行度阈值慢慢缩小, 在算法迭代末尾阶段, 较小的不可行度阈值易于算法快速收敛。

3.3 算法可行解权重调整

在算法迭代搜索过程中, 随机选择和声会造成一定的无方向性。当不可行度不为零时, 基于退火因子的不可行度阈值可以良好地控制算法的搜索区域, 而当不可行度为零时, 可行解在其附近的概率非常大, 为了更快收敛, 应该在其附近做局部搜索, 因此应给予不可行度为零的和声更大的选择概率。对于不可行度为零的和声设计, 其选择权重为:

$$\omega(x_a) = \frac{\omega}{(\omega-1)n_a + HMS} \quad (13)$$

其中, n_a 为 HM 中不可行度为零的和声数目, ω 为权重因子。

其他和声的选择权重为:

$$\omega(x_b) = \frac{1}{(\omega-1)n_a + HMS} \quad (14)$$

3.4 算法实现步骤与流程

步骤 1 算法参数初始化。

设定解向量长度 N , 和声记忆库大小 HMS , 和声记忆库选择概率 $HMCR$, 算法迭代次数 K , 音调调整概率 PAR , 次用户编码调整步长 bw_1 , 功率调整步长 bw_2 , 退火因子初始温度 T_0 和终止温度 T_1 , 解分量 $x_i = \langle k_i, p_i \rangle$ 的取值范围分为 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 和 $[p_{\min}, p_{\max}]$, 及其他参数初始化。

步骤 2 和声记忆库 HM 初始化。

在解向量定义域内, 按式(15)和式(16)随机均匀产生 HMS 条和声, 同时得到相应不可行度和目标函数值。

$$k_i = k_{\min} \pm \text{rand}() \times (k_{\min} - k_{\max}) \quad (15)$$

$$p_i = p_{\min} \pm \text{rand}() \times (p_{\min} - p_{\max}) \quad (16)$$

步骤 3 产生新的解向量。

计算当前 HM 中的不可行度阈值 Φ_{crit} , 并产生新的和声。解向量产生的伪代码如下:

```
for i=1 to N
  if rand() < HMCR
    x_i^new = x_i^f (按式(13)、式(14)设计权重随机选择)
  if rand() < PAR
    if 分量 x_i^new 是表示功率的分量
      x_i^new = p_i^f ± rand() × bw_2
    else
      x_i^new = k_i^f ± rand() × bw_1
    end if
  end if
else
  if 分量 x_i^new 是表示功率的分量
    x_i^new = p_min ± rand() × (p_min - p_max)
  else
    x_i^new = k_min ± rand() × (k_min - k_max)
  end if
end if
end for
```

步骤 4 计算目标函数和不可行度。

按式(6)和式(11)计算新和声的目标函数值和不可行度。

步骤 5 更新和声记忆库。

如果新解的不可行度大于阈值, 舍弃; 否则判断新产生的和声向量的目标函数值是否优于和声记忆库中最差和声向量对应的目标函数值, 如果优于, 则用这个新的和声向量替换和声记忆库中最差和声向量, 反之, 舍弃。

步骤 6 判断终止条件。

判断当前算法迭代次数是否大于设定最大迭代次数 K , 若是, 则终止迭代; 否则返回步骤 3。

4 仿真实验

为验证算法有效性, 在 Matlab2012 中进行仿真实验。设定主网络中有 3 个主用户, 发送功率固定为 20mW, 主用户最大干扰负荷在 [1mW, 3mW] 中随机取值, CRN 中信道分成若干可用信道, 每个信道的宽度 $\omega = 50\text{kHz}$, 信道中加性高斯白噪声 $N_0 = 10^{-11}\text{W}$, 期望的误码率 $\text{BER} = 10^{-3}$, 系统中信道衰减指数为 4, OFDM 符号周期 $T_s = 10^{-6}\text{s}$ 。假设次网络中次用户位于距离次基站 500m 的范围内, 它们的最小传输数据速率需求在 [0.1Mb/s, 0.3Mb/s] 中随机产生, 次基站的最大功率负荷为 50mW。

4.1 算法参数选择

为了选择合适的和声记忆库选择概率 $HMCR$ 、音调调整概率 PAR 及可行解权重 ω , 分别考察其不同取值时的算法性能。

假定 CRN 中信道分成 10 个可用信道, 在次网络中随机部署 5 个次用户。图 3 和图 4 分别显示了在和声记忆库选择

概率 $HMCR$ 取不同值时,和声记忆库中最小不可行度和次用户传输速率之和随算法迭代过程变化的趋势。图 3 显示 $HMCR$ 取较大的值时算法不可行度下降更快,当 $HMCR$ 取 0.95 和 0.98 时,算法找到可行解的迭代次数明显少于当 $HMCR$ 取 0.8 和 0.9 时。参考图 4,当 $HMCR$ 取较大值时,算法收敛速度也更快,但容易陷入局部最优(参考 $HMCR=0.98$ 时),因此选择 $HMCR=0.95$ 作为和声记忆库选择概率。

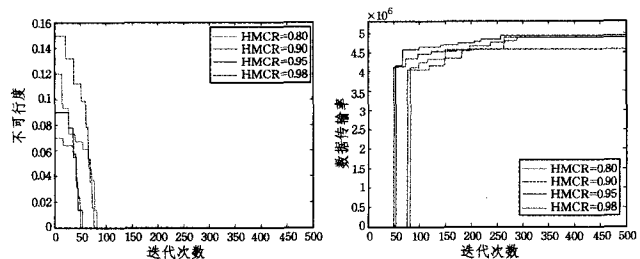


图 3 不可行度变化情况 图 4 数据传输速率变化情况

图 5 和图 6 分别示出了在音调调整概率 PAR 取不同值时,和声记忆库中最小不可行度和次用户传输速率之和随算法迭代过程变化的趋势。可见, PAR 越小,不可行度下降越明显,在 $PAR=0.2$ 时,算法更容易获得最大次用户数据传输速率之和,因此选择 $PAR=0.2$ 作为算法音调调整概率。

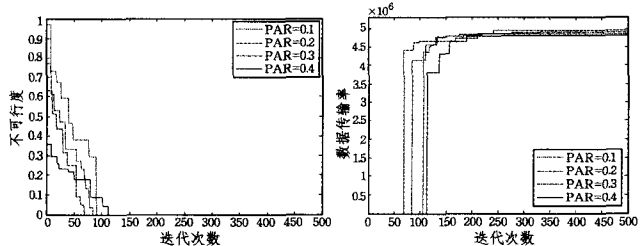


图 5 不可行度变化情况 图 6 数据传输速率变化情况

图 7 显示了在不做可行解权重调整和可行解权重 w 分别取值 1.5、2.5、3.5 时,迭代次数和次用户数据传输速率之和变化的关系。

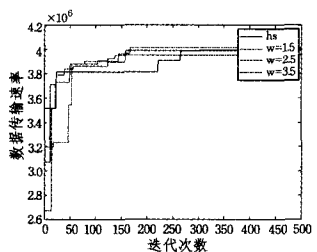


图 7 不同可行解权重下数据传输速率变化情况

可见,在初始解中都存在可行解的情况下,即刚开始存在不可行度为 0 的初始解,在对和声记忆库中的可行解赋予更大的权值时,显然有利于算法更快地收敛,且取更大的权重时,算法收敛速度更快,但同时带来了陷入局部最优的风险。因此选择 $w=1.5$ 作为算法可行解权重。

4.2 算法性能

为了进一步考察和声搜索算法的性能,取 CRN 中信道数为 10、次用户数为 5 时,与遗传算法 GA 进行比较。

图 8 和图 9 分别显示了 HS 算法和 GA 算法在迭代寻解的过程中不可行度和次用户传输速率之和的变化趋势。易见,HS 算法在搜寻可行解的过程中,更快收敛,不可行度在

49 次左右,迭代时下降为 0,在搜寻最优解的过程中收敛速度略慢于 GA 算法,但最终搜寻的解更优。

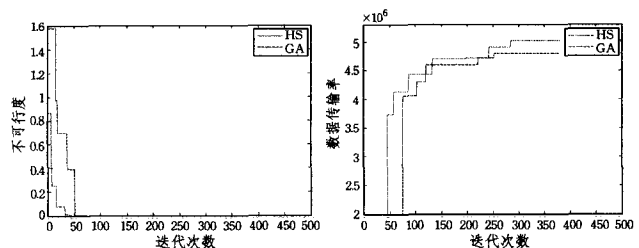


图 8 不可行度变化情况 图 9 数据传输速率变化情况

4.3 网络性能与信道数/次用户数的关系

考察网络性能随信道数和次用户数变化的情况,并与 GA 算法进行比较。图 10 和图 11 分别示出了次用户传输数据速率之和随 CRN 中信道数目及次用户数目变化的情况。在图 10 中,CRN 中随机分布 5 个次用户,信道数从 10 到 20 依次取值。在图 11 中,取信道数为 15 时,次用户数从 5 到 15 依次取值。 $HS(MAX)$ 和 $GA(MAX)$ 分别表示和声搜索算法和遗传算法在 20 次试验中取得的最大次用户传输速率之和, $HS(AVG)$ 和 $GA(AVG)$ 分别表示和声搜索算法和遗传算法在 20 次试验中取得的平均次用户传输速率之和。

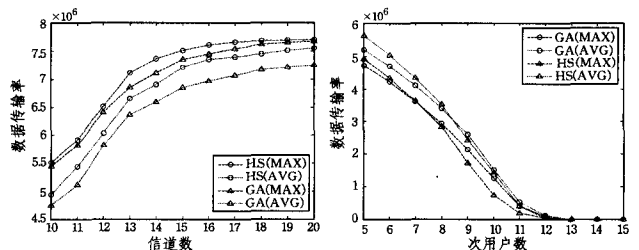


图 10 次用户数为 5 时 图 11 信道数为 15 时

从图 10 中可以看出,次用户传输速率之和随信道数增加而增加,且增加趋势逐渐缓和。图 11 显示,次用户传输速率之和随信道数增加而逐渐减少,次用户数为 13 时,数据传输速率之和减少为 0。随着信道数或次用户数变化,HS 算法收敛速度和 GA 算法收敛情况大致相近,但显然 HS 算法寻优效果优于 GA 算法。

结束语 本文综合 CRN 中频谱分配和功率控制问题建模,使次用户功率之和在不超过次基站功率负载的情况下,控制次用户对主用户产生的干扰,在满足次用户最小数据速率需求的同时,以最大化系统中次用户所获最大瞬时数据速率之和为目标,建立系统模型,进行频谱分配和功率控制。据此,提出一种 CRN 中基于和声搜索的频谱分配和功率控制算法。算法的主要特点在于:1)采用对所有信道对应的次用户编号进行编码的方案,有效缩短了解向量中分量的个数,减少了编码长度,从而缩减了解空间维度。2)采用多目标方法处理约束条件,将模型中复杂的约束条件转化为不可行度函数,通过降低不可行度函数的值来搜寻可行解。3)通过赋予不可行度为零的和声适当的优先权重,从而更好地利用可行解的特性,加快算法收敛。最后,通过仿真实验,讨论适合算法寻解的参数选择,考察算法在网络中信道数和次用户数变化时的情况,并与遗传算法进行对比,在算法收敛速度和遗传算法相近的情况下,取得了更好的寻优结果,很好地处理了 CRN 中的频谱分配和功率控制问题。下一步将深入研究算法的参数设定以及初始和声分布问题,进一步提升算法的性能。

参考文献

- [1] Mitola J, Maguire G Q J. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *Personal Communications, IEEE*, 1999, 6(4):13-18
- [2] Tragos E Z, Zeadally S, Fragkiadakis A G, et al. Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks: A Comprehensive Survey[J]. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 2013, 15(3):1108-1135
- [3] Wang W, Liu X. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks[C]// *IEEE Vehicular Technology Conference, IEEE*, 1999, 2005, 1: 690-694
- [4] Zheng H, Peng C. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access[C]// *2005 IEEE International Conference on Communications, 2005 (ICC 2005)*. IEEE, 2005, 5: 3132-3136
- [5] 徐勇军, 赵晓晖. 认知无线电系统的顽健资源分配算法[J]. *通信学报*, 2014(4): 124-129
- [6] 贾杰, 李燕燕, 陈剑, 等. 认知无线网中基于差分演化的功率控制与信道分配[J]. *电子学报*, 2013, 41(1): 62-67
- [7] Ni Q, Zarakovitis C C. Nash bargaining game theoretic scheduling for joint channel and power allocation in cognitive radio systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(1): 70-81
- [8] 欧阳海滨, 高立群, 邹德旋, 等. 和声搜索算法探索能力研究及其修正[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(1): 57-65
- [9] Geem Z W, Kim J V, Loganathan G. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search[J]. *SIMULATION*, 2001, 76(2): 60-68
- [10] Goldsmith A J, Chua S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(10): 1218-1230
- [11] Chen Y, Lei Q, Yuan X. Resource allocation based on dynamic hybrid overlay/underlay for heterogeneous services of cognitive radio networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 79(3): 1647-1664
- [12] Zhao Z, Peng Z, Zheng S, et al. Cognitive radio spectrum allocation using evolutionary algorithms[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(9): 4421-4425
- [13] 张翅, 曾碧卿, 杨劲松, 等. OFDMA 认知无线网络中面向功率控制的频谱定价与分配[J]. *计算机科学*, 2015, 42(3): 85-90
- [14] Del Ser J, Matinmikko M, Gil-Lopez S, et al. A novel harmony search based spectrum allocation technique for cognitive radio networks[C]// *2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. IEEE, 2010: 233-237

(上接第 252 页)

力的少保守性充分条件, 并通过求解 LMIs 的方式给出了鲁棒 H_∞ 容错控制器的求解方法。文中为获得少保守性结论, 构造了新的时滞依赖 L-K 泛函; 对 L-K 泛函求导时: 1) 未忽略任何有用项; 2) 未采用会引入松弛变量的自由权矩阵技术; 3) 未采用本身带有难以克服的保守性的 Jensen 积分不等式, 而是采用了状态、时延状态、状态在时延区间的积分共同依赖, 且具有更紧下界的改进型 Wirtinger 积分不等式。最后, 仿真算例验证了本文方法的有效性及其少保守性。

参考文献

- [1] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Yong-gang. A survey of recent results in networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 138-172
- [2] 赵维俭, 袁华强, 李迪, 等. 一类物联网控制系统中的时延问题研究[J]. *计算机科学*, 2014, 41(6A): 303-305
- [3] Yan Huai-cheng, Yan Sheng, Zhang Hao, et al. An overview of networked control of complex dynamic systems[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014: 1-10
- [4] Huo Zhi-hong, Zheng Yuan, Xu Chang. A robust fault-tolerant control strategy for networked control systems[J]. *Journal of Networked and Computer Applications*, 2011, 34(2): 708-714
- [5] 黄鹤, 谢德晓, 张登峰, 等. 基于 T-S 模糊模型的网络控制系统鲁棒 H_∞ 容错控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(6): 1292-1298
- [6] Li Wei, Cao Hui-chao, Wan Jun. Robust fault-tolerant control for uncertain NCS based on dynamic output feedback[C]// *Proceedings of the 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Shanghai, China, 2011, 3: 179-186
- [7] Zhang Yu-quan, Zhong Qiu-hai, Wang Yan, et al. Fault-tolerant design for MIMO networked control systems with communication constraints[C]// *Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference*. Yantai, China, 2008, 1380-1384
- [8] Feng Jian, Wang Shen-quan. Reliable fuzzy control for a class of nonlinear networked control systems with time delay[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(7): 1091-1099
- [9] 李炜, 蒋栋年. 基于 T-S 模糊模型的非线性网络化控制系统的 H_∞ 鲁棒容错控制[J]. *控制与决策*, 2010, 25(4): 598-605
- [10] Wang Hui-jiao, Zhou Bo, Lim Cheng-chew, et al. H_∞ fault-tolerant control of networked control systems with actuator failures[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2014, 12(8): 1127-1136
- [11] Peng Chen, Fei Min-Rui, Tian En-gang. Networked control for a class of T-S fuzzy systems with stochastic sensor faults[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2013, 212: 62-77
- [12] 李炜, 赵莉, 康莉莎, 等. 执行器故障不确定非线性 NCS 鲁棒满意容错设计[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(11): 2668-2674
- [13] Seuret A, Gouaisbaut F. On use of the Wirtinger inequalities for time-delay systems[C]// *Proceedings of the 10th IFAC*, Boston, United States, 2012, 10: 260-265
- [14] 李元龙, 林宗利. 奇异线性系统在执行器饱和和受限下不变集条件的改进[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(7): 955-961
- [15] Seuret A, Gouaisbaut F. Wirtinger-based integral inequality: Application to time-delay systems[J]. *Automatica*, 2013, 49(9): 2860-2866
- [16] 王君. 非线性 NCS 的鲁棒容错控制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 2013: 44-46
- [17] Wang You-yi, Xie Li-hua, De Souza C E. Robust control of uncertain nonlinear systems[J]. *Systems and Control Letters*, 1992, 19(2): 139-149