

认知异构网络中基于克隆选择算法的动态频谱分配

石华, 李建东, 李钊

(西安电子科技大学 综合业务网理论和关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 建立了认知异构无线网络的系统模型。基于该模型, 以网络效益最大化为目标, 考虑接入网的频谱需求, 接入网之间的干扰和对应异构网络不同接入技术的多粒度重叠信道之间的干扰约束条件, 将频谱资源分配建模为非线性约束 0-1 整数规划问题, 进而提出基于克隆选择的认知异构网络中动态频谱分配算法, 并在该算法中设计了一种新的能够同时考虑接入网频谱需求和多粒度信道频谱资源的抗体整数编码方式。仿真结果表明, 所提算法相比于贪婪分配算法, 增加了网络效益, 提高了频谱使用效率。

关键词: 认知异构无线网络; 动态频谱分配; 克隆选择算法; 多粒度信道频谱资源; 网络效益

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)07-0059-08

Dynamic spectrum allocation based on clone selection algorithm in cognitive heterogeneous wireless networks

SHI Hua, LI Jian-dong, LI Zhao

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The system model of cognitive heterogeneous wireless networks was given. Based on this system model, the problem of dynamic spectrum allocation was formulated as a constrained 0-1 integer programming with maximizing the network utility in mind, and considering the demand for spectrum from various radio access networks, the interference between them and heterogeneous granularity channels because of the fact that different radio access technologies use channels with different widths. An intelligent algorithm named clone selection algorithm was applied to solve this problem within which a new coding scheme for the antibody was proposed based on the demand for spectrum and heterogeneous granularity channels. Simulation results show that the proposed method could improve the network utility and spectrum utilization compared with greedy allocation algorithm.

Key words: cognitive heterogeneous wireless networks; dynamic spectrum allocation; clone selection algorithm; heterogeneous granularity channels; network utility

1 引言

现有无线通信网络由多种基于不同无线接入技术(RAT, radio access technology)的无线接入网

(RAN, radio access network)共存构成, 这些接入网虽然提供相似业务, 但因分别独立工作, 不能保证用户业务总是获得最佳服务质量, 为此不同接入网通过融合而增加覆盖和提高服务质量, 异构无线网

收稿日期: 2011-05-09; 修回日期: 2011-11-15

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(60725105); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT0852); 高等学校创新引智计划基金资助项目(B08038)

Foundation Items: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (60725105); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320404); The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0852); The 111 Project (B08038)

络成为发展趋势；另外，目前固定分配频谱资源考虑的是 RAN 的峰值业务，忽略了业务分布的时间区域差异，导致频谱使用效率较低，异构无线网络可充分利用网络的异构性动态管理资源进而提高使用效率，同时认知技术使网络具有认知重构功能，可根据无线通信环境灵活改变发射参数，在不同频段上发送和接收信息，为认知异构网络动态管理资源提供了可能^[1]。

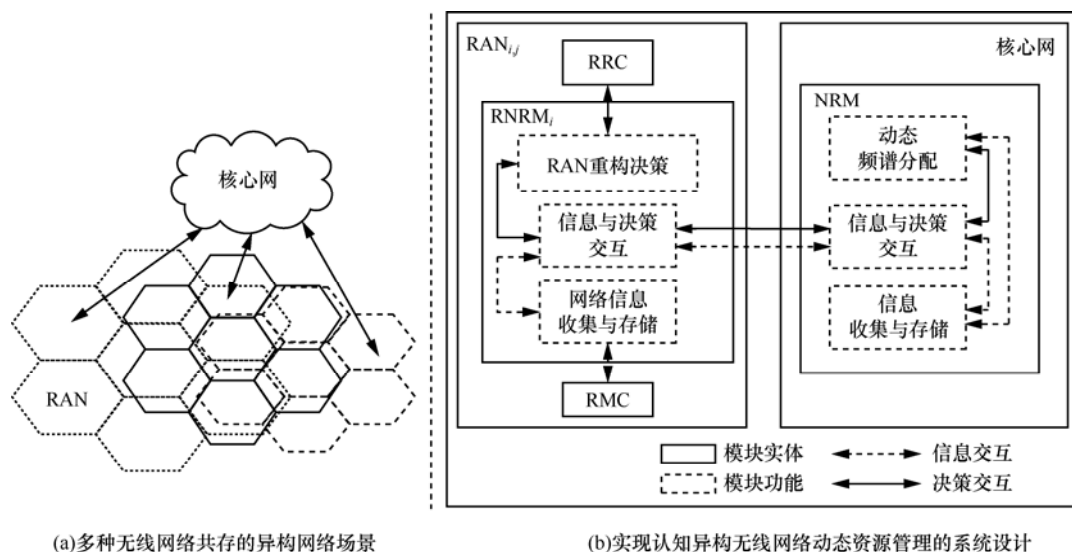
作为无线通信的基础资源，频谱资源的动态分配成为研究热点，从最初的主用户的空闲频段可以被次级用户感知并动态分配给次级用户共享，发展到现在的认知网络之间动态频谱分配。最初在认知无线场景中，文献[2~5]采用频谱拍卖的方式将主用户的空闲频段分配给次级用户，分别解决了拍卖过程中可能出现的次级用户不诚实报价和共谋问题，以及网络效益降低问题；文献[6]将基于信干噪比的物理干扰模型作为次级用户之间频谱分配的约束条件，提出近似分配算法；文献[7]采用免疫克隆选择优化次级用户之间频谱分配问题；这些文献都考虑的是相同频宽且不重叠的信道频谱资源在同类次级用户之间的分配问题。而随着认知技术在网络中的应用，接入网基站具有认知重构功能，可以根据接入网的业务分布而被动态分配频谱资源，此时认知异构无线网络中的接入网类型不同，其需求的信道频谱资源粒度随之也存在差异，文献[8]考虑了不同类型接入网之间的频谱分配问题，但未考虑对应不同接入技术的信道粒度的差异；文献[9]分别用冲突图和物理干扰模型来表示接入网之间的干扰，同时考虑了不同粒度的信道，用贪婪算法

解决了频谱动态分配问题；然而贪婪算法每步做出在当前看来是最好的选择，容易求得局部最优解^[6]，不能有效解决稀有频谱资源的分配问题。

2 认知异构网络系统模型

本文根据 IEEE1900.4 标准^[10]给出异构无线网络系统模型，如图 1 所示。从图中可看出，因各种无线通信网络基本成熟布置，所以多种网络通过共享核心网而组成认知异构无线网络，便于动态管理无线资源，而不改变各网络原有的无线通信技术；核心网和接入网分别增加了模块实体：网络重构管理(NRM, network reconfiguration manager)模块、接入网网络重构管理 (RNRM, RAN network reconfiguration manger) 模块、无线接入网感知 (RMC, RAN measurement collector)模块和接入网重构控制 (RRC, RAN reconfiguration controller)模块，其中，RMC 模块感知网络信息并提交给 RNRM，RNRM 模块与 NRM 进行信息和决策交互，帮助 NRM 管理不同类型网络的接入网，NRM 模块实现动态资源分配，通过与 RNRM 交互通知分配结果，RRC 模块根据 RNRM 的重构请求实现接入网重新配置。

基于该系统模型，本文进行频谱资源动态管理方法的设计。由于接入网的业务分布随时间发生变化，同时不同接入网相同时间内的业务分布也不相同，所以接入网对频谱资源的需求在时间和空间维度上存在差异，需要 NRM 模块根据不同需求而周期地动态分配频谱资源。假设动态分配的周期为 T ，则频谱分配在 $t \in \{0, T, 2T, \dots\}$ 时刻进行。在周期开



(a)多种无线网络共存的异构网络场景

(b)实现认知异构无线网络动态资源管理的系统设计

图 1 认知异构网络系统模型

始时，NRM 使用频谱资源动态分配方法对各接入网分配频谱资源；在每个周期内，分得频谱资源的接入网可以不受干扰地使用该频谱资源；在周期结束时，所有接入网将本周周期分得的频谱资源使用权归还于 NRM，NRM 根据接入网提供的信息进行下个周期的频谱资源重新分配。动态频谱分配的具体实现流程将在下节内容详细给出。

3 频谱资源动态分配

本节将详细介绍每个周期 NRM 如何动态分配频谱资源给不同需求的接入网。

3.1 频谱资源分配问题

本节首先给出频谱资源分配的相关定义，然后将频谱分配建模为 0-1 整数规划问题。

定义 1 接入网集合、频谱需求集合和频谱资源效益集合。

设 K 种异构无线网络参与频谱资源分配，分别由 $RNRM_i (i=1, 2, \dots, K)$ 管理；第 i 种网络提出频谱需求的接入网个数为 N_i ，分别用 $RAN_{ij} (j=1, 2, \dots, N_i)$ 表示； RAN_{ij} 通过 RMC 感知接入网网络信息，预测业务请求，并估算满足这些业务请求所需要的信道数，提出频谱需求 d_{ij} ，同时估计每个信道的频谱资源效益 r_{ij} 。其中，业务请求的预测方法有多种，如基于历史值的线性回归预测和指数回归预测等^[11]。

通过前面的假设，将参与频谱分配的接入网组成的集合 $\{RAN_{(1,1)}, RAN_{(2,1)}, \dots, RAN_{(n,i)}, \dots, RAN_{(N,K)}\}$ 叫作接入网集合，其中 $N = \sum_{i=1}^K N_i$ 表示接入网总数， $RAN_{(n,i)}$ 表示第 n 个接入网及其属于第 i 种网络，与 RAN_{ij} 的对应关系为： $n = \sum_{x=1}^{i-1} N_x + j$ ；

对应接入网集合得到集合 $d = \{d_n, n=1, 2, \dots, N\}$ 和集合 $r = \{r_n, n=1, 2, \dots, N\}$ ，分别称为频谱需求集合和频谱资源效益集合。

需要说明的是，由于频谱资源被划分为信道后用于提供无线业务，所以接入网的频谱需求用该接入网需要的信道数表示；本文中的频谱资源效益可根据实际需要灵活选择为经济收入或频谱效率或信道吞吐量等，例如若异构无线网络分配频谱资源

追求频谱效率的提高，则可规定接入网提供的频谱资源效益为其使用频谱资源的频谱效率，若异构无线网络追求频谱资源经济利润的增加，则可规定频谱资源效益为接入网使用频谱资源得到的经济收入。

定义 2 信道集合。

设待分配的频谱资源宽度为 F ， K 种异构无线网络相应接入技术对信道带宽的规定分别为 $B_i (i=1, 2, \dots, K)$ ，则频谱资源被划分为多粒度信道^[9]，如图 2 所示，对应每种网络的信道数为

$$M_i = \left\lfloor \frac{F}{B_i} \right\rfloor, \text{ 信道总数为 } M = \sum_{i=1}^K M_i, \text{ 每个信道用}$$

一个整数 $m (1 \leq m \leq M)$ 进行编号；将带宽相同的信道组成的集合 $\{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_K\}$ 叫作信道集合，其中

$$\Phi_1 = \{1, 2, \dots, M_1\}, \Phi_i = \left\{ \sum_{y=1}^{i-1} M_y + 1, \sum_{y=1}^{i-1} M_y + 2, \dots, \sum_{y=1}^i M_y \right\}$$

$(i=2, 3, \dots, K)$ ；信道集合 Φ_i 中的信道只能分配给相应接入技术的接入网。

定义 3 接入网干扰矩阵。

将表示 N 个接入网相互干扰状态的 $N \times N$ 维矩阵叫作接入网干扰矩阵，用分块矩阵表示为

$$IB_{N \times N} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{N_1 \times N_1}, \mathbf{I}_{N_1 \times N_2}, \dots, \mathbf{I}_{N_1 \times N_K} \\ \mathbf{I}_{N_2 \times N_1}, \mathbf{I}_{N_2 \times N_2}, \dots, \mathbf{I}_{N_2 \times N_K} \\ \dots \\ \mathbf{I}_{N_K \times N_1}, \mathbf{I}_{N_K \times N_2}, \dots, \mathbf{I}_{N_K \times N_K} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中，子块矩阵 $\mathbf{I}_{N_i \times N_{j_2}} = (\delta_{j_1 j_2})_{N_i \times N_{j_2}}$ 表示接入网 $RAN_{i j_1} (j_1 = 1, 2, \dots, N_i)$ 与 $RAN_{i_2 j_2} (j_2 = 1, 2, \dots, N_{i_2})$ 之间的干扰， $\delta_{j_1 j_2} = 1$ 表示 $RAN_{i j_1}$ 与 $RAN_{i_2 j_2}$ 同时使用重叠或同一信道时会相互干扰，而 $\delta_{j_1 j_2} = 0$ 表示互不干扰；当 $i_1 = i_2$ 时， $\delta_{j_1 j_2}$ 根据接入技术规定的频率复用系数确定，且当 $j_1 = j_2$ 时， $\delta_{j_1 j_2} = 1$ ，表示 RAN 与其自身存在干扰，不能被分配重叠或同一信道；当 $i_1 \neq i_2$ 时，若 $RAN_{i j_1}$ 与 $RAN_{i_2 j_2}$ 之间距离小于其覆盖半径之和，则认为相互干扰， $\delta_{j_1 j_2} = 1$ ，否则 $\delta_{j_1 j_2} = 0$ 。

定义 4 信道干扰矩阵。

将表示 M 个信道之间重叠状态的 $M \times M$ 维矩阵叫作信道干扰矩阵，表示为

待分配的频谱资源 F					
1	2	3	...		M_1
M_1+1	M_1+2	M_1+3	...		M_1+M_2
M_1+M_2+1	M_1+M_2+2	M_1+M_2+3	...		$M_1+M_2+M_3$

图 2 频谱资源多粒度信道划分

$$IC_{M \times M} = (\alpha_{m_1 m_2})_{M \times M} \quad (2)$$

当 $m_1 \neq m_2$ 时, 若信道 m_1 与信道 m_2 有重叠部分, 则 $\alpha_{m_1 m_2} = 1$, 表示接入网使用信道 m_1 会对信道 m_2 的信号造成干扰, 否则 $\alpha_{m_1 m_2} = 0$; 同理, 当 $m_1 = m_2$ 时, $\alpha_{m_1 m_2} = 1$ 。

定义 5 分配矩阵与可行分配矩阵。

将表示频谱分配结果的矩阵 $A_{N \times M} = (a_{nm})_{N \times M}$ 叫作分配矩阵, 若 $RAN_{(n,i)}$ 得到信道 m , 则 $a_{nm} = 1$, 否则 $a_{nm} = 0$; $RAN_{(n,i)}$ 得到的信道数为 $e_n = \sum_{m=1}^M a_{nm}$ 。

接入网利用频谱资源提供无线业务的前提是相互不存在干扰, 即相互干扰的 RAN 不能被分配重叠或同一信道; 另外, 接入网 $RAN_{(n,i)}$ 只能分得信道集合 Φ_i 中的信道, 且其得到的信道数不应大于其需求 d_n , 同时也不应大于可分配的信道数 M_i ; 则如果一个分配矩阵满足如下条件即称为可行分配矩阵

$$IB(n_1, n_2) \times IC(m_1, m_2) \times (a_{n_1 m_1} \times a_{n_2 m_2} + a_{n_1 m_2} \times a_{n_2 m_1}) = 0 \quad \forall n_1, n_2, m_1, m_2 \quad (3)$$

$$a_{n,m} \times 1_{m \notin \Phi_i} = 0 \quad \forall n, m \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M a_{nm} \leq \min(d_n, M_i) \quad \forall n \quad (5)$$

其中, $1_{m \notin \Phi_i} = \begin{cases} 1, & m \notin \Phi_i \\ 0, & m \in \Phi_i \end{cases}$ 。

定义 6 网络效益。

给定任一可行分配矩阵 A , 认知异构无线网络会获得相应的网络效益, 定义为接入网使用频谱资源的频谱资源效益总和

$$R(A) = \text{sum}(r \times A) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N r_n a_{nm} \quad (6)$$

定义 7 频谱资源分配问题。

基于以上定义, 本文中的频谱资源分配问题指的是求解一个可行分配矩阵, 使认知异构无线网络获得的网络效益最大, 即在式(3)~式(5)的约束下, 求解频谱资源最优分配矩阵 $A^* = (a_{nm}^*)_{N \times M}$

$$A^* = \arg \max \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N r_n a_{nm} \quad (7)$$

从式(3)~式(5)和式(7)可以看出, 频谱资源分配被建模为非线性约束 0-1 整数规划问题。传统整数规划解法, 如分支界定法等, 是一种确定性算法, 对小规模整数规划问题求解效果较佳; 而智能优化

算法大多采用并行搜索技术, 克服了传统整数规划解法单点搜索效率低的问题, 在实际应用中具有较大灵活性, 对整数变量较多的整数规划问题的求解较为有效^[12]。智能方法中的克隆选择算法具有快速的收敛速度、较好的种群多样性以及避免早熟收敛的特性^[7], 本文利用克隆选择算法来求解式(7)所示的频谱分配问题, 与文献[7]不同的是, 本文考虑认知异构无线网络场景及多粒度信道频谱资源, 而文献[7]考虑认知无线电次级用户场景和同类信道资源, 另外, 本文根据接入网对频谱资源的需求而进行频谱资源分配, 而文献[7]未考虑次级用户的信道需求。

3.2 基于克隆选择算法求解最优分配矩阵

根据式(4)和式(5)的约束条件, 本小节算法采用一种新的抗体编码方式和针对此编码方式的变异操作, 同时为了满足式(3)的约束条件而增加了抗体修正操作; 当算法终止时, 最优抗体即最优分配方案^[13]。克隆选择算法求解最优频谱资源分配矩阵的具体步骤如下。

步骤 1 算法初始化。

设置克隆选择算法的参数: 抗体种群规模 S , 克隆控制参数 N_c , 基本变异概率 p_m , 初始迭代次数 $g=0$, 最大迭代次数 N_{gen} , 最优抗体连续无明显改善的迭代次数 $f=0$ 及门限 Th 。

步骤 2 抗体种群初始化。

初始化抗体种群 $C(g) = \{C_1, C_2, \dots, C_S\}$ 。用 $D_n = \min(d_n, M_i)$ 表示 $RAN_{(n,i)}$ 可能得到的最大信道数, 则每个抗体用长度为 D_n 的基因片段表示 $RAN_{(n,i)}$ 得到的相应信道编号, 抗体长度为 $L = \sum_{n=1}^N D_n$, 每个抗体 $C_k = (c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kL})$ 代表一种分配方案; 用向量 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n, \dots, h_N\}$ 表示抗体中对应 $RAN_{(n,i)}$ 基因片段的开始位置, 其中, $h_1 = 1$, $h_n = \sum_{x=1}^{n-1} D_x + 1$ ($n=2, 3, \dots, N$); 采用整数编码方式, 基因片段 $\{c_{kh_n}, c_{kh_n+1}, \dots, c_{k(h_n+D_n)}\}$ 中每个基因的位值等于对应信道集合 Φ_i 中的一个整数, 即 $c_{kl} = m$ ($m \in \Phi_i, l = h_n, h_n+1, \dots, h_n+D_n$)。

在频谱分配问题中, 若采用传统二进制编码方式, 则一个抗体的长度为 $N \times M$, 而由于接入网只能分配相应接入技术规定带宽的信道, 这样抗体编码中会有大量 0 存在, 浪费存储和计算资源, 另外二进制编码方式不能将接入网的频谱需求考虑在内, 需要单独检验抗体对应的分配方案是否满足式(5)的约束条

件; 本文采用的整数编码方式直接满足式(4)和式(5)的约束条件, 同时缩短了抗体长度, 减小了搜索空间, 另外可以从抗体直接得知 RAN 被分配的信道编号。

步骤3 抗体修正操作。

一个抗体可能存在 2 种情况需要修正: 第一, 对应 $\text{RAN}_{(n,i)}$ 的基因片段 $\{c_{kh_n}, c_{kh_n+1}, \dots, c_{k(h_n+D_n)}\}$ 存在相同整数值, 即 $\text{RAN}_{(n,i)}$ 被重复分配了同一信道; 第二, 相互干扰的 RAN 被分配重叠或同一信道, 即不满足式(3)的约束条件。本步骤将抗体映射为分配矩阵进行修正, 再将修正后的分配矩阵映射为抗体。

1) 设置一个零矩阵 $A_{N \times M}$ 。

2) 根据向量 H 的元素 $h_n (n=1, 2, \dots, N)$, 及抗体 C_k 中对应 $\text{RAN}_{(n,i)}$ 信道分配状态的基因片段 $\{c_{kh_n}, \dots, c_{k(h_n+D_n)}\}$, 得到矩阵 A 的第 n 行元素, 即让 m 依次等于 $c_{kl} (l=h_n, h_n+1, \dots, h_n+D_n)$, 若 $m \neq 0$, 则 $a_{nm} = 1$, 表示 $\text{RAN}_{(n,i)}$ 得到信道 m , 否则 a_{nm} 的值不变; 这样抗体 C_k 被映射为分配矩阵 A , 同时对抗体进行了第 1 种情况下的修正。

3) 对分配矩阵 A 进行可行性检查, 若 $\text{RAN}_{(n_1,i_1)}$ 与 $\text{RAN}_{(n_2,i_2)}$ 存在干扰, 即 $IB(n_1, n_2) = 1$, 则寻找第 n_1 行非零元素 $a_{n_1 m_1}$ 与第 n_2 行非零元素 $a_{n_2 m_2}$, 判断信道 m_1 与 m_2 是否重叠或是同一信道, 若 $IC(m_1, m_2) = 1$, 则随机修改 $a_{n_1 m_1}$ 或 $a_{n_2 m_2}$ 为 0, 这样使分配矩阵满足式(3)的约束条件, 成为可行分配矩阵, 即完成第 2 种情况下的修正。

4) 抗体 C_k 中基因片段 $\{c_{kh_n}, \dots, c_{k(h_n+D_n)}\}$ 的每一位 $c_{kl} (l=h_n, h_n+1, \dots, h_n+D_n)$ 依次等于第 n 行 $(n=1, 2, \dots, N)$ 非零元素 a_{nm} 所在列的列值 m , 若第 n 行非零元素个数小于 D_n , 则用 0 补足, 这样将分配矩阵 A 映射为抗体 C_k 。

5) 重复第 1)~4)步修正抗体种群中的所有抗体。

步骤4 克隆操作。

抗体种群中 S 个抗体都被进行克隆操作, 得到 $C^c(g) = \{C_1^c, C_2^c, \dots, C_S^c\}$, 其中, $C_k^c = \{C_{1k}, C_{2k}, \dots, C_{q_k k}\}$ 满足 $C_{1k} = C_{2k} = \dots = C_{q_k k} = C_k$, q_k 为抗体 C_k 的克隆规模

$$q_k = \left\lfloor N_c \frac{R(C_k)}{\sum_{k=1}^S R(C_k)} \right\rfloor \quad (8)$$

其中, $R(C_k)$ 为抗体 C_k 的适应度, 即对应分配矩阵

的网络效益。

步骤5 变异操作。

父代抗体保持不变, 而克隆抗体依概率被进行变异操作, 得到 $C^{cm}(g) = \{C_1^{cm}, C_2^{cm}, \dots, C_S^{cm}\}$, 其中, $C_k^{cm} = \{C_{1k}^m, C_{2k}^m, \dots, C_{q_k-1k}^m, C_{q_k k}^m\}$, 由 C_{ik} 变异为 C_{ik}^m 的过程为产生一个新抗体 C_{temp} , C_{ik}^m 中每个基因的位值依变异概率 p_{mk} 等于 C_{ik} 或 C_{temp} 相应位的位值, 抗体变异概率 p_{mk} 的计算公式为

$$P_{mk} = P_m \frac{\max(R(C(g))) - R(C_k) + \text{mean}(R(C(g)))}{\max(R(C(g))) - \min(R(C(g))) + \text{mean}(R(C(g)))} \quad (9)$$

其中, $\max(R(C(g)))$ 、 $\min(R(C(g)))$ 和 $\text{mean}(R(C(g)))$ 分别表示抗体种群 $C(g)$ 适应度的最大值、最小值和均值, 从式(9)可看出, 适应度较大的抗体变异概率较小, 适应度较小的抗体变异概率较大, 这样可以减慢适应度较大的抗体变异速度, 而加快适应度较小的抗体变异速度, 同时保证适应度最大的抗体变异概率不为 0。

抗体经变异后可能产生不可行解, 参见步骤 3 对变异得到的抗体进行修正。

步骤6 选择操作。

从父代抗体与克隆变异抗体 $C_k^{cm} = \{C_{1k}^m, C_{2k}^m, \dots, C_{q_k-1k}^m, C_{q_k k}^m\} (k=1, 2, \dots, S)$ 中选择适应度最大的抗体 $C'_k = \arg \max_{C_x \in C_k^{cm}} R(C_x)$, 产生下一代抗体种群: $C(g+1) = \{C'_1, C'_2, \dots, C'_S\}$ 。

步骤7 判断最优抗体是否有所改善, 同时增加迭代次数。

若 $C(g+1)$ 与 $C(g)$ 的最优抗体的适应度无明显改善, 则 $f=f+1$, 否则 $f=0$; 迭代次数 $g=g+1$ 。

步骤8 算法终止判断。

本文采用双终止条件判断算法是否终止, 若迭代次数超过最大值 $g \geq N_{gen}$, 或最优抗体连续无明显改善的迭代次数超过门限 $f \geq Th$, 则算法终止, 转步骤 9, 否则转步骤 4。

步骤9 参见步骤 3 中第 1)~2)步, 将抗体种群中的最优抗体映射为最优分配矩阵 $A_{N \times M}^*$, $\text{RAN}_{(n,i)}$ $(n=1, 2, \dots, N)$ 得到的信道数 $e_n = \sum_{m=1}^M a_{nm}^*$, 对应信道编号为第 n 行非零元素所在列的列值。

3.3 基于克隆选择算法的频谱资源分配流程(CSA-SA)

本小节在前面两节的基础上, 结合认知异构无线网络系统模型, 给出基于克隆选择算法频谱资源动态分配 (CSA-SA, clone selection algorithm-spectrum allocation) 的具体实现流程。

第1步 RAN_{ij} ($i=1, 2, \dots, K, j=1, 2, \dots, N_i$) 中的 RMC 模块感知接入网网络信息, 预测业务请求, 提出频谱需求和频谱资源效益, 将信息 (d_{ij}, r_{ij}) 通过与 RNRM_i 的信息交互接口发送至 RNRM_i。

第2步 RNRM_i ($i=1, 2, \dots, K$) 收集其管理的所有 RAN 的频谱需求信息, 并将此信息 (RAN_{ij}, d_{ij}, r_{ij}) 通过与 NRM 的信息交互接口提供给 NRM。

第3步 NRM 根据收到的信息得到接入网集合、频谱需求集合和频谱资源效益集合, 计算接入网干扰矩阵; 将频谱资源多粒度信道划分, 得到信道集合, 计算信道干扰矩阵; 再利用克隆选择算法求解频谱资源最优分配矩阵 A^* , 即完成动态频谱分配。

第4步 NRM 将最优分配矩阵 A^* 进行分块, 如式(10)所示。

$$A_{N \times M}^* = \begin{pmatrix} A_{N_1 \times M_1}, 0, \dots, 0 \\ 0, A_{N_2 \times M_2}, \dots, 0 \\ \dots \\ 0, 0, \dots, A_{N_K \times M_K} \end{pmatrix} \quad (10)$$

通过与 RNRM_i 的决策交互接口, 将 $A_{N_i \times M_i}$ 即频谱资源分配结果通知 RNRM_i ($i=1, 2, \dots, K$)。

第5步 RAN_{ij} ($i=1, 2, \dots, K, j=1, 2, \dots, N_i$) 中的 RRC 模块根据频谱分配结果实现接入网重构, 即通过软件自适应地修改接入网网络参数^[14]; 同时开始计时, 当周期 T 结束时, 转第1步。

4 性能仿真

4.1 仿真场景及算法参数设置

认知异构无线网络仿真场景用 GSM、cdma2000、WCDMA 3 种网络, 每种网络用 49 个六边形小区无缝重叠覆盖, 小区半径为 577m, 对应信道带宽规定为 200kHz、1.25MHz 和 5MHz; 小区基站具有认知重构功能, 可根据频谱分配结果工作在任意频段。在本文仿真过程中, 各小区随机提出频谱需求, 同时每个小区的频谱需求和频谱资源效益设为服从均匀分布的随机数, 即反映了不同接入网的业务分布和频谱需求的不同。

克隆选择算法参数设置如下: 抗体种群规模 $S=20$, 克隆控制参数 $N_c=200$, 基本变异概率 $p_m=1$, 最大迭代次数 $N_{gen}=200$, 最优抗体连续无明显改善的迭代次数门限 $Th=10$ 。

仿真通过变化待分配的频谱资源宽度 F 和参与分配的小区数, 对基于克隆选择算法的频谱资源分配 CSA-SA 和同样考虑异构无线网络多粒度信道频谱资源动态分配的文献[9]中基于贪婪算法的频谱资源分配 GA-SA (greedy algorithm-spectrum allocation) 进行比较, 用以下性能指标来描述比较结果。

1) 网络效益 (R , revenue): $R = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N r_n a_{nm}$, 即频谱分配优化问题的目标函数。

2) RAN 频谱需求满足率 (RS, RAN satisfactory): $RS = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{e_n}{d_n}$ 。

3) 频谱使用效率 (SU, spectrum utilization): $SU = \sum_{n=1}^N e_n \times B_i$, 即接入网实际利用的频谱带宽。

4) 频谱占用 (SO, spectrum occupation)^[15]: $SO = \frac{SU}{F}$, 表示频谱资源的实际利用比率。

4.2 仿真结果

1) 由于提出频谱需求的小区随机产生, 所以在仿真结束时对小区数进行统计, 提出频谱需求的小区有 22 个, cdma2000 小区有 25 个, WCDMA 小区有 20 个, 其频谱需求分别服从 [0,100]、[0,16]、[0,4] 的均匀分布, 频谱资源效益分别服从 [0.2,2]、[1.25,12.5]、[5,50] 的均匀分布。产生频谱需求的小区固定不变, 改变待分配的频谱资源宽度 (F) 从 5MHz 递增到 30MHz, 观察算法性能, 如图 3 和图 4 所示。

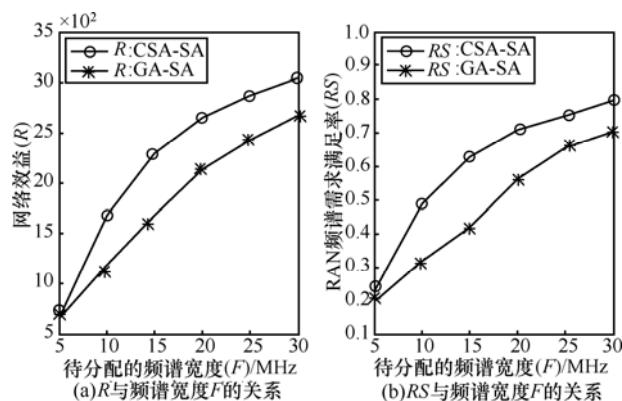


图 3 R 和 RS 与频谱宽度 F 的关系

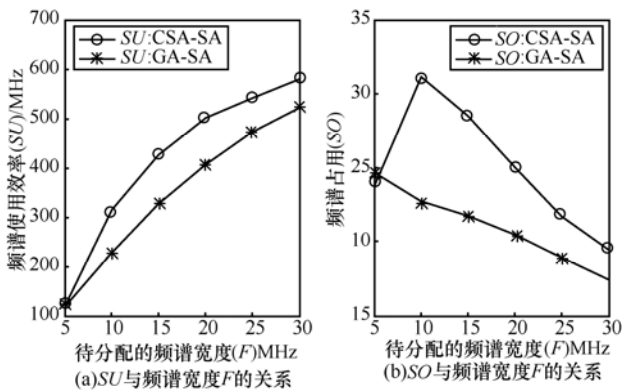


图 4 SU 和 SO 与频谱宽度 F 的关系

图 3(a)和图 3(b)分别为网络效益和 RAN 频谱需求满足率与频谱资源宽度 F 的关系曲线，从图中可以看出，当提出频谱需求的小区保持不变时，增加频谱资源宽度带来了 RAN 频谱需求满足率的增加，进而增加了网络效益；当 F 的值较小时，抗体编码长度较短，搜索空间较小，而 CSA 局部搜索能力较弱，所以 CSA-SA 比 GA-SA 改善程度并不明显；随着 F 值的增大，CSA-SA 比 GA-SA 带来了较大改善。图 4(a)和图 4(b)分别为频谱使用效率和频谱占用与 F 的关系曲线，在小区频谱需求固定不变的前提下，随着 F 的增大，如图 3(b)所示，得到满足的小区需求越来越多，则图 4(a)中频谱使用效率曲线呈上升趋势，但逐渐趋于平缓，导致图 4(b)中 CSA-SA 得到的频谱占用曲线呈先上升再下降趋势；由于贪婪算法容易求得局部最优解，所以虽然 GA-SA 得到的频谱使用效率曲线也呈上升趋势，但对应的频谱占用曲线一直下降；另外，当 F 的值较小时，CSA-SA 比 GA-SA 有所不足，原因是 CSA 局部搜索能力较弱。

2) 频谱资源宽度 F 固定为 15MHz，改变提出频谱需求的小区数目，观察算法性能，如图 5 和图 6 所示。提出频谱需求的小区随机产生，初始 GSM 小区有 23 个，cdma2000 小区有 25 个，WCDMA 小区有 30 个，其频谱需求分别服从[0,75]、[0,12]、[0,3]的均匀分布，频谱资源效益分别服从[0.2,2]、[1.25,12.5]、[5,50]的均匀分布；各种网络小区逐次增加 2 个，每次增加时原小区的频谱需求和资源效益不变，而新增加小区的频谱需求与频谱资源效益随机产生。

图 5(a)和图 5(b)分别为网络效益和 RAN 频谱需

求满足率随小区数增加而变化的曲线，在频谱资源宽度一定的条件下，随着提出频谱需求的小区的增加，RAN 频谱需求满足率曲线呈下降趋势，这是因为小区增加的同时带来了干扰的增加；但由于频谱资源分配的目标函数为网络效益最大化，资源效益较大的小区比较容易得到频谱资源，所以网络效益仍然会增加，而干扰导致这种增加趋势缓慢；CSA-SA 的性能曲线优于 GA-SA，因为贪婪算法在频谱分配的每一步只考虑暂时的效益增加，并没有考虑因干扰而造成隐形效益损失。图 6(a)和图 6(b)为频谱使用效率和频谱占用与小区数的关系曲线图，虽然图 5(b)中 RAN 频谱需求满足率曲线呈下降趋势，但随着小区数的增加，频谱使用效率曲线仍然呈上升趋势；由于频谱资源宽度不变，频谱占用曲线与频谱使用效率曲线的变化趋势相同。

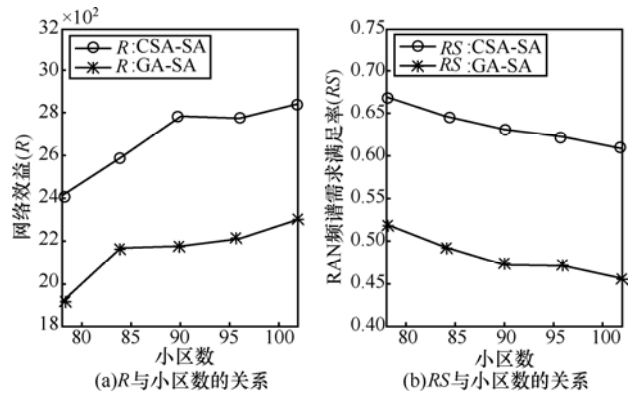


图 5 R 和 RS 与小区数的关系

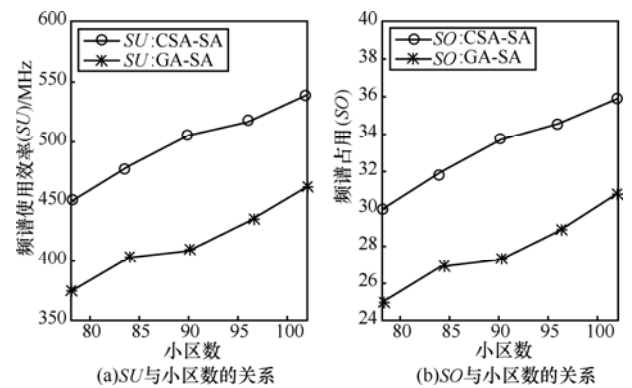


图 6 SU 和 SO 与小区数的关系

从仿真结果可以看出，虽然在频谱资源分配优化问题求解时目标函数只考虑了网络效益，但 CSA-SA 在其他性能指标的仿真中也表现较好。

5 结束语

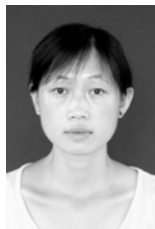
本文建立了认知异构无线网络的系统模型，

联合考虑接入网频谱需求和频谱资源效益、多粒度信道以及干扰矩阵对频谱资源动态分配的影响, 基于网络效益最大化, 用有约束非线性 0-1 整数规划建模认知异构无线网络频谱资源动态分配问题, 并用克隆选择算法进行频谱分配结果的求解。仿真结果显示该算法相比于贪婪分配算法, 增加了网络效益, 提高了频谱使用效率, 具有较好的性能。

参考文献:

- [1] LEAVES P, MOESSNER K, TAFAZOLLI R, *et al.* Dynamic spectrum allocation in composite reconfigurable wireless networks[J]. Communications Magazine, IEEE, 2004, 42(5): 72-81.
- [2] ZHOU X, GANDHI S, SURI S, *et al.* eBay in the Sky: strategy-proof wireless spectrum auctions[A]. MobiCom'08, Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. San Francisco, California, USA, 2008.
- [3] JIA J, ZHANG Q, ZHANG Q, *et al.* Revenue generation for truthful spectrum auction in dynamic spectrum access[A]. MobiHoc'09, Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. New Orleans, LA, USA, 2009.
- [4] ZHOU X, ZHENG H. TRUST: a general framework for truthful double spectrum auctions[A]. INFOCOM 09[C]. Rio de Janeiro, 2009. 999-1007.
- [5] ZHOU X, ZHENG H. Breaking bidder collusion in large-scale spectrum auctions[A]. MobiHoc '10, Proceedings of the Eleventh ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. Chicago, Illinois, USA, 2010.
- [6] LILI C, LEI Y, XIA Z, *et al.* Optimus: SINR-Driven Spectrum Distribution via Constraint Transformation[A]. 2010 IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum[C]. Singapore, 2010. 1-12.
- [7] 柴争义, 刘芳. 基于免疫克隆选择优化的认知无线网络频谱分配[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 92-100.
CHAI Z Y, LIU F. Spectrum allocation of cognitive wireless network based on immune clone selection optimization[J]. Journal on Communications, 2010, 31(11): 92-100.
- [8] TOKA L, VIDCS A. General distributed economic framework for dynamic spectrum allocation[J]. Computer Communications, 2009, 32(18): 1955-1964.
- [9] SUBRAMANIAN A P, AL-AYYOUB M, GUPTA H, *et al.* Near-optimal dynamic spectrum allocation in cellular networks[A]. 2008 IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Chicago, IL, 2008. 1-11.
- [10] IEEE 1900.4, IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks[S].
- [11] LEAVES P, GHADERI-NIRI S, TAFAZOLLI R, *et al.* Dynamic spectrum allocation in hybrid networks with imperfect load prediction[A]. 3G Mobile Communication Technologies[C]. 2002.444-448.
- [12] 杜祜康, 赵英凯. 整数规划问题智能求解算法综述[J]. 计算机应用研究, 2010,(2): 408-412.
DU H K, ZHAO Y K. Survey on intelligent optimization algorithms for solving integer programming problems[J]. Application Research of Computers, 2010,(2): 408-412.
- [13] CASTRO L N, ZUBEN F J. Learning and optimization using the clonal selection principle[J]. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002, 6(3): 239-251.
- [14] THOMAS R W, DASILVA L A, MACKENZIE A B. Cognitive networks[A]. 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Baltimore, 2005. 352-360.
- [15] SANG Y L, SEUNG Y L, SUNG H A, *et al.* Frequency use status investigation and spectrum utilization metric[A]. Proceedings of 10th ISART[C]. Colorado, 2008. 1-6.

作者简介:



石华 (1986-), 女, 山西太谷人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为认知异构无线网络中动态频谱资源管理。



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 西安电子科技大学研究生院常务副院长, 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室主任、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线 IP 技术、移动通信、软件无线电、ad hoc 自组织网络等。



李钊 (1981-), 男, 陕西西安人, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 MIMO 无线通信、认知无线电、无线通信资源管理。