

异构无线网络中基于免疫计算的联合会话接纳控制

朱思峰¹, 刘 芳^{1,2}, 戚玉涛^{1,2}, 柴争义¹, 吴建设^{1,2}

(1. 西安电子科技大学计算机学院, 陕西西安 710071;

2. 智能感知与图像理解教育部重点实验室(西安电子科技大学), 陕西西安 710071)

摘 要: 本文研究了单运营商异构网络环境下的联合会话接纳控制问题, 给出了一个基于免疫计算的会话接纳控制方案. 设计了联合会话接纳控制问题的数学模型, 给出了基于免疫多目标优化算法的控制方案框架, 并通过仿真实验验证了本文方案. 实验结果表明, 与文献方案相比, 本文设计的接入控制方案在阻塞率和频谱效用之间获得了更好的性能折中, 同时更好地兼顾了同一运营商内各个接入网络之间的公平, 具有较好应用价值.

关键词: 异构无线网络; 联合会话接纳控制; 免疫多目标优化算法

中图分类号: TP18, TN914.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 11-2648-06

Joint Call Admission Control Based on Immune Computing in Heterogeneous Wireless Network

ZHU Si-feng¹, LIU Fang^{1,2}, QI Yu-tao^{1,2}, CHAI Zheng-yi¹, WU Jian-she^{1,2}

(1. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: To solve the joint call admission control problem in heterogeneous network environment of single operator, a novel admission control algorithm based on immune computing was proposed. The mathematical model of joint call admission control problem was expounded, the framework of admission control solution based on immune multi-objective optimization algorithm was given, and simulation experiments were done to validate proposed solution. Experimental result shows that the proposed solution, compared with other solutions, obtains better performance tradeoffs between recent utility and frequency spectrum, balances preferably each radio access network of the same operator, and has the advantage of good application value.

Key words: heterogeneous wireless network; joint call admission control; immune multi-objective optimization algorithm

1 引言

异构无线网络(heterogeneous wireless network)中的会话接纳控制是针对异构无线通信系统的一种宏观资源管理,其目的是为了使用户业务在各个无线接入网络中达到合理分布^[1].从单运营商网络管理的角度看,集中式控制是合理和可行的,而且由于获取信息的完备性,能够获得较高的资源优化性能.近年来,单运营商场景下的集中式联合会话接纳控制引起了国内外学者的广泛关注.文献[2]提出了一种高带宽优先选择的接纳控制算法,为多模终端尽可能地分配高业务带宽的接入网络,但没有考虑到终端的信号强度,可能会造成资源浪费.文献[3]提出了基于层次分析法(analytic hierarchy

process, AHP)的会话接纳控制算法,引入模糊数学来处理信号强度、覆盖范围、网络负载、业务带宽等因素的综合影响,从而为多模终端分配不同的接入网络,以使整个异构网络中无线资源利用率最大.该方案的缺点是,各因素权重的确定、模糊推理规则的定义等在很大程度上依赖于专家,其主观性过大.文献[4]提出了一种在终端侧建立优先级列表的无线资源管理算法,其缺点是:由于终端计算能力很弱,难以实现较复杂的接纳优化运算.文献[5]和文献[6]提出了基于博弈论的接入控制算法.该算法的不足之处是:非合作无线资源分配博弈中的纳什均衡点的存在性和唯一性难以得到保证,难以获得最优的接纳控制性能.

多种无线接入网络(radio access network, RAN)组成

收稿日期:2011-02-18;修回日期:2011-05-16

基金项目:国家自然科学基金(No. 61072139);中央高校基本科研业务费专项资金(No. JY10000902001);国家教育部博士点基金(No. 20100203120008);博士点新教师基金(No. 20090203120016);河南省重点科技攻关项目(No. 112102210221, 102102210388);河南省教育厅自然科学研究计划项目(No. 2011B520030, No. 2010A520050)

异构网络环境中,各 RAN 的覆盖范围不同且相互重叠.在重叠覆盖的区域内,多模终端可以灵活地接入任一 RAN 并获取服务.不同于上述思路,本文利用免疫多目标优化算法对会话接入控制进行优化,从而降低会话需要的总带宽和会话请求阻塞率.

2 集中式联合会话接纳控制问题

在有多个可用 RAN 的情况下,网络控制模块允许或拒绝会话接入到某个 RAN 中以达到资源优化配置的过程,被称为联合呼叫接纳控制(Joint call admission control, JACC).JACC 是实现联合无线资源管理的一类重要方法^[7].接纳控制算法集中管理接入网络的状态、终端状态、业务需求,以及用户的需求等信息,通过计算需求信息与异构网络系统状态信息之间的最佳匹配,完成网络选择过程,并给出选择结果.

假设在某个异构网络系统中,区域 Ω 内存在 M 个覆盖范围完全重叠的无线接入网络,并且各个接入网络采用的无线接入技术(radio access technology, RAT)均不相同.假设在区域 Ω 中共部署了 M 个基站,基站 $i(1 \leq i \leq M)$ 属于无线接入网络 $i(1 \leq i \leq M)$,可以用基站 i 来代表该区域中的接入网络 i .

假设在区域 Ω 内中均匀分布着 N 个多模终端,在单位时间内多模终端至多只有一个活跃的无线应用,而且该应用在同一时刻只能连接在一个无线接入网络中.另外,假设所有的多模终端移动范围始终在区域 Ω 内.

假设阴影衰落和多径衰落可以忽略不计,只考虑大尺度的路径损耗(path loss).设多模终端 j 与接入网络 i 的基站之间的距离为 d_{ij} ,则多模终端 j 在接入网络 i 中的路径损耗如式(1)所示.

$$L(d_{ij}) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda_i}\right) + 10\alpha \log\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) \quad (1)$$

其中, d_0 为参考距离, α 为路径损耗系数, λ_i 为接入网络 i 中的信号波长.根据式(1)可以得到多模终端在接入网络 i 中的信道增益为:

$$\theta_{ij} = 10^{-0.1L(d_{ij})} \quad (2)$$

考虑到下行接入选择问题与上行接入选择问题的解决方法非常相似,因此本文仅以下行情况为例来进行问题建模,在此基础上稍作修改就可以得到相应的上行模型.假设在异构网络环境下,每个接入网络的基站的下行总功率都是恒定的,而且均匀地分布在整个可用频带上.用 B_i 和 P_i 分别表示接入网络 i 在区域 Ω 内的可用带宽和下行总功率,则基站 i 在单位带宽上的发射功率为:

$$p_0^i = \frac{P_i}{B_i} \quad (3)$$

设多模终端 j 的接收机的白噪声功率谱密度为 N_0 ,

则多模终端 j 在接入网络 i 中的传输效能可以表示为:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{\theta_{ij} p_0^i}{\gamma N_0}\right) \quad (4)$$

式(4)中,参数 γ 与误比特率需求有关,当误比特率需求一定时,参数 γ 是一个常数.

设多模终端 j 的速率需求为 r_j ,则终端 j 在接入网络 i 中的带宽需求可表示为:

$$t_{ij} = \frac{r_j}{s_{ij}} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知,多模终端 j 在接入网络 i 中的带宽需求是由信道增益 θ_{ij} 决定的.由于同一个多模终端在不同接入网络中的信道增益通常是不同的,所以同一个多模终端在不同接入网络中的带宽需求也是不同的.在进行集中式接入选择的过程中,如果能够在各个接入网络的总带宽约束下,尽可能地把多模终端分配到信道增益较大的接入网络中,就能够充分利用异构无线网络中的多接入分集增益,减小各接入网络中的带宽占用,从而降低整个异构网络的带宽消耗.

设接入网络 i 对多模终端 j 的分配情况为 $a_{ij} \in \{0, 1\}(1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N)$,在集中式接入选择算法的作用下,如果无线资源协同管理模块选择将多模终端 j 接入到网络 i 中,即从接入网络 i 中分配 t_{ij} 个带宽给多模终端 j ,则 a_{ij} 取值 1;否则, a_{ij} 取值 0.由于每个多模终端在同一时刻最多只能连接到一个接入网络中,所以有式(6)成立.

$$\sum_{i=1}^M a_{ij} \leq 1, \forall j(1 \leq j \leq N) \quad (6)$$

设多模终端接入阻塞率为 Z ,则其计算方法如式(7).

$$Z = 1 - \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M a_{ij} \right) / N \quad (7)$$

在区域 Ω 中,多模终端对无线接入网络总带宽占用越小,说明对异构网络无线资源的利用效能越高,整个异构无线网络的网络容量也就越大,这也正是无线运营商进行集中式接入控制的目的所在.另外,多模终端的接入阻塞率越低,用户体验越好.在这种思路的指导下,本文把异构网络中的集中式接入控制问题建模成为以下的优化问题:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_{ij} t_{ij} \\ & \min Z \\ & \text{s.t. } a_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \forall j \\ & \sum_{i=1}^M a_{ij} \leq 1, \forall j \\ & \sum_{j=1}^N a_{ij} t_{ij} \leq B_i, \forall i \end{aligned}$$

其中,第一个目标函数是多模终端消耗的总带宽;第二个目标函数是多模终端的接入阻塞率;第一个约束是接入选择结果的取值范围;第二个约束是一个多模终端在一个时刻最多只能连接到一个接入网络中;第三个约束是各接入网络的总带宽约束。

值得说明的是:本文模型既考虑了网络运营商的利益(最大化网络容量),又考虑了用户的利益(最小化多模终端的会话接入阻塞率)。本文提出的方案是一种网络运营商和用户都能接受的折衷方案。

3 基于免疫计算的联合会话接纳控制算法

免疫多目标优化算法作为一类新兴的随机搜索算法,在工程优化领域得到了广泛的应用^[8~12]。本文根据异构网络环境下联合会话接纳控制问题的特点,设计了一种基于免疫计算的联合会话接纳控制算法。

3.1 问题编码

在免疫算法中,把问题抽象为抗原,把问题的可能候选解抽象为抗体。按照本文前面的叙述,每个多模终端只能接入到一个网络中,也就是说,把终端接入到哪个网络是组合优化问题,故采用二进制编码是适宜的。

每个抗体对应一种接入控制方案,在本文中,对抗体采用矩阵编码,如式(8)。

$$\mathbf{R} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T \quad (8)$$

式(8)中,行向量 $\alpha_j (1 \leq j \leq M)$ 为第 j 个多模终端接入 M 个接入网络的情况。由于每个终端在某时刻最多只能接入到一个网络中,所以在抗体矩阵中,每列元素值之和最多为 1。为了使会话负载在各个接入网络之间进行平衡,每个网络接入终端的数目不宜过多,即抗体矩阵中每行中值为 1 的元素不能过多。因此,在对免疫算法种群进行初始化时,要在随机产生抗体的基础上,按照上述思路进行修正。

3.2 抗体克隆操作

对于约束优化问题,抗体种群在进化过程中会产生一些不可行解(抗体解码得到的方案不满足约束条件),而在这些不可行解中存在一些接近可行解边缘的不可行解。本文把接近可行解边缘的不可行解,称为有益解。有益解对算法搜索最优解是非常有帮助的,尤其是当搜索空间(决策空间)是非凸空间时,因此,本文把有益解组成记忆种群,并参与抗体种群的克隆操作,进而提高算法的收敛性能。

设第 t 代抗体种群为 $B(t)$, 抗体种群规模为 N_B ; 记忆种群为 $G(t)$, 记忆群规模为 N_G ; 克隆后生成的抗体种群为 $C(t)$, 其规模为 N_C ; 设记忆克隆操作为 O^C , 则对种群 $B(t) \cup G(t)$ 施加 O^C 后生成新种群 $C(t)$ 的过程如式(9)。

$$C(t) = O^C(B(t) \cup G(t)) \quad (9)$$

本文设计的免疫记忆克隆操作采用比例克隆方式,即具有较大拥挤距离值的抗体具有较大的克隆份数。

3.3 基因变异操作

本文采用单克隆变异,对于矩阵编码的抗体 R_i , 随机选择 R_i 中两列进行对换形成新的抗体 R'_i 。设克隆后种群规模为 N_D , 对克隆后种群中的抗体重新编号,记为 $C(t) = \{R_1(t), R_2(t), \dots, R_{N_D}(t)\}$ 。基因变异操作记作 O^M , 则对种群 $C(t)$ 施加 O^M 后生成新种群 $D(t)$ 的过程如式(10)。

$$\begin{aligned} D(t) &= O^M(C(t)) \\ &= \{O^M(R_1(t)), O^M(R_2(t)), \dots, O^M(R_{N_D}(t))\} \\ &= \{R'_1(t), R'_2(t), \dots, R'_{N_D}(t)\} \end{aligned} \quad (10)$$

3.4 种群分类操作

按照约束条件满足情况,对种群 $D(t)$ 中的抗体进行分类,本文设计的分类操作步骤如下:

Step 1 计算种群 $D(t)$ 中每一个抗体在第 $k+1$ 目标函数上的值;

Step 2 若抗体 $R_i(t) \in D(t)$ 在第 $k+1$ 目标函数上的值为零,则把该抗体并入可行解集 $X(t)$; 否则,并入非可行解集 $\bar{X}(t)$;

Step 3 根据 *pareto*-占优的概念把可行解集 $X(t)$ 划分为 *pareto*-占优集 $P(t)$ 和非 *pareto*-占优集 $\bar{P}(t)$;

Step 4 根据不可行解违反约束的程度将非可行解集 $\bar{X}(t)$ 划分为有益的不可行解集 $U(t)$ 和无益的不可行解集 $\bar{U}(t)$ 。

3.5 种群更新操作

设种群 $P(t)$ 的规模为 n_P , 期望保留的抗体种群规模为 n_B , 目标空间维数为 k , 本文设计的种群更新操作步骤如下:

Step 1 计算第 $i (1 \leq i \leq k)$ 个目标下第 $j (1 \leq j \leq n_P)$ 抗体的适应度值 d_{ij} ;

Step 2 求出 k 个目标下所有抗体的适应度值, 得到适应度矩阵 $\mathbf{W} = (w_{ij})_{k \times n_P}$;

Step 3 对矩阵 $\mathbf{W} = (w_{ij})_{k \times n_P}$ 按照列求和, 每一列之和为一个抗体的总适应度值, 计算每个抗体的总适应度值。

Step 4 按照每个抗体的总适应度值对种群 $P(t)$ 中抗体进行降序排序;

Step 5 删除 $P(t)$ 中总适应度值较小的 $n_P - n_B$ 个抗体, 剩下的 n_B 个抗体构成新的抗体种群 $P(t)$ 。

3.6 基于免疫计算的接纳控制算法框架

Step 1 对异构网络环境中的相关数据进行认知、采集并进行预处理。

Step 2 对联合会话接纳控制问题进行抗体编码。

Step 3 对抗体种群进行初始化. 设抗体种群为 $B(t)$, 其规模为 n_B ; 记忆种群为 $G(t)$, 其种群规模为 n_G ; 克隆后生成的种群为 $C(t)$, 其种群规模为 n_C ; 可行解种群为 $X(t)$, 非可行解种群为 $\bar{X}(t)$; *pareto* 占优解种群为 $P(t)$, 非 *pareto* 占优解种群为 $\bar{P}(t)$; 有益非可行解种群为 $U(t)$, 无益非可行解种群为 $\bar{U}(t)$. 最大迭代次数 T , 初始化进化代数 $t=0$. 初始化抗体种群为 $B(t)$, 从 $B(t)$ 中取 n_G 个抗体构成记忆种群 $G(t)$.

Step 4 C 对种群 $B(t) \cup G(t)$ 执行抗体克隆操作, 生成种群 $C(t)$.

Step 5 对种群 $C(t)$ 执行基因变异操作, 生成种群 $D(t)$.

Step 6 对种群 $D(t)$ 执行种群分类操作, 把 $D(t)$ 划分为 $X(t)$ 和 $\bar{X}(t)$; 把可行解集 $X(t)$ 划分为 $P(t)$ 和 $\bar{P}(t)$; 将非可行解集 $\bar{X}(t)$ 划分为 $U(t)$ 和 $\bar{U}(t)$.

Step 7 对种群 $P(t)$ 执行种群更新操作;

Step 8 若 $U(t)$ 存在一个抗体 $R_u(t)$, 其违反约束的程度小于记忆种群 $G(t)$ 中某抗体 $R_m(t)$, 则将抗体 $R_u(t)$ 添加到 $G(t)$ 中, 同时将 $G(t)$ 中的抗体 $R_m(t)$ 删除. 依次进行, 直到 $U(t)$ 中每个抗体的违反约束的程度都大于或等于 $G(t)$ 中抗体违反约束程度.

Step 9 若终止条件满足, 则转到 Step10; 否则, 令 $B(t+1) = P(t)$, $G(t+1) = G(t)$, $t = t + 1$, 转到 Step4.

Step 10 对种群 $P(t)$ 中的抗体进行解码操作, 生成会话接纳方案. 对于多目标优化算法, 最后输出的 *pareto*-占优解可能有多个, 即生成的候选方案可能有多个.

Step 11 按照网络运营商预置规则(例如, 低阻塞率优先或高带宽利用率优先), 对候选方案进行排序输出.

4 仿真实验及分析

假定:某运营商的异构网络系统中存在 GERAN、UTRAN 和 WLAN 三种无线接入网络; 所有终端均为多模终端, 且具备上述三种 RAT 协议栈组件, 可以直接配置到任意 RAT 下工作而无需软件下载过程; 每个多模终端在某时刻只有一种业务. 仿真基于 MATLAB 和 NS2 环境, 利用 NS2 中的 MIH 模块来获取网络性能参数并根据业务类型对接入方案的效用做出评估. 在 NS2 仿真环境下, 随机产生三种 RAT 基站的位置、三种 RAT 接入网络可用带宽、多模终端的位置、多模终端的需求带宽. 假定该服务区有语音和数据两种业务, 它们具有相同的最小带宽需求(16kb/s). GERAN 和 WLAN 分别适合语音和数据业务, 而 UTRAN 对两种业务都适合. 对高带宽优先选择算法、基于 AHP 的控制算法和本文算法进行对比实验.

设 3 个无线接入网络重叠覆盖的区域内有 65 个多模终端, 每单位时间会话接入请求数目逐步增加, 在同样的仿真环境下, 三种控制算法的系统吞吐量, 如图 1 所示.

图 1 可以分为 3 个阶段. 在第一阶段(刚开始时), 高带宽优先算法的系统吞吐量最好, 本文算法次之, 基于 AHP 的控制算法最差. 在用户会话数目增加阶段, 随着用户会话数目的增加(从 10 个增加至 35 个), 网络负载成为影响系统吞吐量的主要因素, 此时在高带宽优先算法中出现负载不平衡, 发生拥塞, 系统吞吐量迅速下降, 在用户会话数目为 35 时, 系统吞吐量下降到最低点; 基于 AHP 的控制算法由于部分地考虑了阻塞率因素, 其系统吞吐量逐步增加, 在用户会话数目为 35 时系统吞吐量到达的最高点; 而本文算法充分考虑了系统带宽消耗及会话阻塞率两个优化目标, 使得系统吞吐量能一直随着会话数目的最长而增长. 在用户会话数目进一步增加阶段, 高带宽优先选择算法通过丢弃一些会话, 使得系统吞吐量缓慢回升; 基于 AHP 的控制算法, 其负载饱和后, 系统吞吐量出现缓慢的下降; 而本文算法的系统吞吐量一直处于增长状态, 但增长幅度略有下降. 总的看来, 本文算法要优于高带宽优先选择算法和基于 AHP 的接纳控制算法.

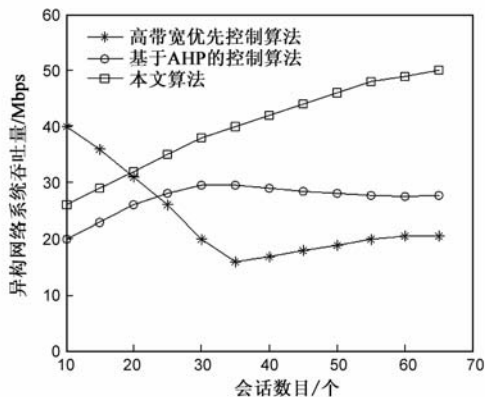


图1 系统吞吐量随会话数增长的变化情况

接下来比较在同样的会话数目下, 会话阻塞率随网络流量的变化情况, 如图 2 所示.

从图 2 可以看出, 本文算法的会话阻塞率最低, 显著地优于基于 AHP 的接纳控制算法和高带宽优先选择算法. 其原因是: 本文算法采用了多目标优化, 阻塞率是其中的一个优化目标, 因此在编码空间内搜索时, 已经充分考虑了会话阻塞率目标, 获得的 *pareto* 占优解是兼顾阻塞率和系统带宽的接入控制方案. 尽管基于 AHP 的接纳控制算法也考虑了业务带宽及用户会话数目等因素, 但是由于其权重的确定、模糊推理规则的定义等在很大程度上依赖于专家, 其主观性过大, 难以获得理想的方案.

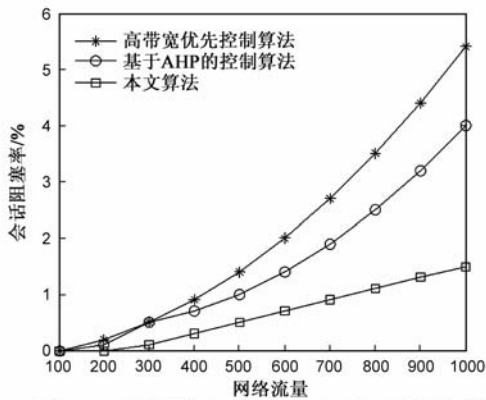


图2 三种算法的会话阻塞率随网络流量的变化

在相同的实验数据下(系统接入 30 会话,其中 15 个话音业务会话,15 个数据业务类型的会话),不同接入网络中的会话带宽分配情况,如表 1 所示。

表 1 不同接入网络中的会话带宽分配情况

控制算法	GERAN		UTRAN		WLAN ≥64kb/s
	32kb/s	64kb/s	32kb/s	64kb/s	
高带宽优先算法	5	7	0	8	15
基于 AHP 的算法	5	5	5	7	8
本文算法	10	0	5	5	10

从表 1 可以看出,本文算法的会话分配最为合理,把 10 个数据类型的会话分配到 WLAN,把 5 个数据类型的会话分配到 UTRAN 的高带宽,把 5 个语音类型的会话分配到 UTRAN 的低带宽,把 10 个语音类型的会话分配到 GERAN 的低带宽,使得 3 个接入网络的负载均衡,并且为 GERAN 和 UTRAN 节省了大量高带宽频段。

各个接入网络中的频谱效用分布情况,如表 2 所示。

表 2 各接入网络中的频谱效用分布情况

控制算法	GERAN	UTRAN	WLAN
高带宽优先控制算法	2107	950	2853
基于 AHP 的控制算法	1856	1345	2312
本文算法	2102	1998	2017

从表 2 可以看出,基于高带宽优先选择的控制算法,不能保证频谱效用的均衡;基于 AHP 的控制算法在一定程度上考虑到了负载均衡,使得三种接入网络的频谱效用较为均衡。表现最好的是本文算法,本文算法下的三种接入网络均获得了较高的频谱效用,并且保证了三种接入网络的频谱效用均衡,这反映了本文算法在安排会话接入时充分考虑了负载均衡,具有较好的系统资源效用。

5 结束语

本文从单运营商异构网络环境下联合无线资源管理的特点出发,利用免疫优化算法的全局寻优能力,为包含多种无线接入网络的异构网络系统设计了集中式联合会话接入控制算法。仿真实验结果表明,与文献算

法相比,本文设计的接入控制算法在阻塞率和频谱效用之间获得了更好的性能折中,同时也更好地兼顾了同一运营商内各个接入网络之间的公平,具有较好的应用价值。

参考文献

- [1] Coutinho, Rodolfo W L, Coelho et al. Optimal policy for joint call admission control in next generation wireless networks [A]. Proceedings of the 2010 International Conference on Network and Service Management [C]. Texas: Springer-verlag, 2010. 214 - 217.
- [2] Guo C, Guo Z, Zhang Q, et al. A seamless and proactive end-end mobility solution for roaming across heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 22(2): 834 - 848.
- [3] Qingyang S, Jamalipour A. Quality of service provisioning in wireless LAN/UMTS integrated systems using analytic hierarchy process and gray relational analysis[A]. Global Telecommunications Conference Workshops [C]. Texas: Springer-verlag, 2008. 220 - 224.
- [4] Modeas I, Kaloxylas A, Passas N et al. An algorithm for radio resources management in integrated cellular/WLAN networks [A]. Proceedings of the 18th Annual IEEE Int'l Symp on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C]. Texas: Springer-verlag, 2009. 261 - 275.
- [5] 李明欣, 陈山枝, 谢东亮, 等. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 2037 - 2049.
LI Ming-Xin, CHEN Shan-Zhi, XIE Dong-Liang, et al. Resource Allocation and Admission Control Based on Non-Cooperation Game in Heterogeneous Wireless Networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(8): 2037 - 2049. (in Chinese)
- [6] 陈前斌, 周伟光, 柴蓉, 等. 基于博弈论的异构融合网络接入选择方法研究[J]. 计算机学报, 2010, 33(9): 1633 - 1642.
Chen Qian-bin, Zhou Wei-guang, Chai Rong, et al. Game-theoretic approach for network access selection in heterogeneous integrated networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(9): 1633 - 1642. (in Chinese)
- [7] Yu Fei, Krishnamurthy V. Optimal Joint Session Admission Control in Integrated WLAN and CDMA Cellular Networks with Vertical Handoff[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2007, 6(1): 126 - 139.
- [8] 张向荣, 蹇晓雪, 焦李成. 基于免疫谱聚类的图像分割[J]. 软件学报, 2010, 21(9): 2196 - 2205.
Zhang Xiang-rong, Qian Xiao-xue, Jiao Li-cheng. Immune spectral clustering algorithm for image segmentation[J]. Journal of Software, 2010, 21(9): 2196 - 2205. (in Chinese)
- [9] 朱思峰, 刘芳, 柴争义. 免疫聚类算法在基因表达数据分

析中的应用[J].北京邮电大学学报,2010,33(2):54-57.

Zhu Si-feng, Liu Fang, Chai Zheng-yi. Application of immune clustering algorithm to the analysis of gene expression data[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010,33(2):54-57. (in Chinese)

- [10] 朱思峰,刘芳,柴争义.基于免疫计算的 TD-SCDMA 网络基站选址优化[J].通信学报,2011,32(1):106-110.

Zhu Si-feng, Liu fang, Chai Zheng-yi. Immune computing-based base station location planning in the TD-SCDMA network[J]. Journal on Communications, 2011, 32(1): 106 - 110. (in Chinese)

- [11] 尚荣华,焦李成,马文萍,等.用于约束多目标优化的免疫记忆克隆算法[J].电子学报,2009,37(6):1289-1294.

Shang Rong-hua, Jiao Li-cheng, Ma Wen-ping, et al. An immune memory clone algorithm for constrained multi-objective optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1289 - 1294. (in Chinese)

- [12] 孟宪福,解文利.基于免疫算法多目标约束 P2P 任务调度策略研究[J].电子学报,2011,39(1):101-107.

Meng Xian-fu, Xie Wen-li. Research on P2P task scheduling with multi-objective constraints based on immune algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 101 - 107. (in Chinese)

作者简介



朱思峰 男,1975 年生于河南周口.西安电子科技大学博士生.研究方向为免疫算法、下一代无线网络.

E-mail: zhusifeng@163.com



刘芳 女,1963 年生于湖南,西安电子科技大学教授、博导、IEEE 高级会员.研究方向为自然计算、计算智能.

戚玉涛 男,1978 年生于河南信阳.西安电子科技大学副教授,博士.研究方向为并行免疫算法.

柴争义 男,1976 年生于陕西渭南.西安电子科技大学博士生.研究方向为计算智能、认知网络等.

吴建设 男,1969 年生于陕西.西安电子科技大学副教授,博士.研究方向为智能信息处理及其在无线通信中的应用.