

基于分解的多目标进化算法的异构无线网络业务接入控制

毕晓君* 张倩

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 异构无线网络接入控制问题包含多个优化目标, 现有算法考虑不全面且多是将其转换为单目标求解, 限制了各目标的相对关系, 无法适应不同的实际需求。该文提出一种直接采用多目标进化算法的接入控制算法。首先将优化目标扩展为3个, 分别是最小化阻塞率、最小化占用总资源和负载均衡; 其次引入基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)并设计进化策略, 进行初步寻优; 最后通过非支配排序得到 Pareto 最优解集, 即最佳接入方案。仿真结果表明, 所提算法可以提高各优化目标的求解精度, 从而提高业务接入成功率和网络资源利用率, 并且为决策者提供多种接入方案, 可根据实际需求进行最优选择。

关键词: 异构无线网络; 接入控制; 多目标优化; 分解; 非支配排序

中图分类号: TP393; TP183

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)04-0778-07

DOI: 10.11999/JEIT170616

Service Access Control for Heterogeneous Wireless Networks Based on Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition

BI Xiaojun ZHANG Qian

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Access control of heterogeneous wireless networks contains many optimization objectives. The optimization objectives of existing algorithms are incompletem and most of them are converted to single objective which restricts the relative relation of each target and can not meet the different demands. Therefore, an access control algorithm is proposed, which uses the multi-objective evolutionary algorithm directly. First, the optimization objective is extended to three, which are the minimization of blocking rate, the minimization of occupancy resources and load balancing. Secondly, the Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition (MOEA/D) is introduced and evolutionary strategy is designed to perform preliminary optimization. Finally, the Pareto optimal solution set is obtained by non-dominated sorting, that is, the best access control scheme. The simulation results show that the proposed algorithm improves the accuracy of each optimization objective, and thus improves the success rate of access and the utilization ratio of network resources. It can also provide a variety of optimal access control schemes for decision makers, which can be optimally chosen according to actual requirements.

Key words: Heterogeneous wireless network; Access control; Multi-objective optimization; Decomposition; Non-dominated sorting

1 引言

随着网络技术的飞速发展, 不同网络在高带宽、短延时等方面已经各具明显的优势^[1]。但为了满足与日俱增的多样化的业务需求, 未来的移动通信系统必然是多网融合、优势互补, 即异构无线网络^[2]。业务接入控制是异构无线网络资源管理的关键, 其目的是为了控制用户业务合理地接入各个无线网络,

从而高效利用网络资源, 提高服务质量, 近年来已成为研究热点。

目前异构网络业务接入控制的相关研究已经取得了一些成果。文献[3]考虑了不同业务的 QoS 需求和链路层重传机制, 选择业务占用资源与网络可用资源比值最小的网络接入, 充分考虑网络间的负载均衡, 但忽略了业务接入不同网络的负载差异, 不利于资源的高效利用。文献[4]将各网络业务阻塞率相等作为神经网络的学习目标, 有效地平衡了各网络的业务阻塞情况, 但在业务数量较少时无法获得有效的阻塞率数据, 易造成资源的不合理分配。文献[5]通过构建非合作博弈论模型分配各无线网络在

收稿日期: 2017-06-28; 改回日期: 2017-11-21; 网络出版: 2018-01-23

*通信作者: 毕晓君 bixiaojun@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61175126)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61175126)

不同服务区域内的带宽和呼叫连接数目，以降低阻塞率，但非合作博弈中纳什均衡的存在性和唯一性难以确定，不利于最佳方案的求解。文献[6]将接入过程转化为多阶段决策过程，利用前一阶段用户的资源分配状态计算下一阶段用户的最优解，从而最大化系统传输速率，但未考虑各网络间负载均衡。

近年来，群智能优化算法因其良好的全局优化性能，被应用于接入控制问题，取得了优越的效果，已成为热点研究方向^[7]。文献[8]将网络接入问题转换为多属性优化问题，利用混沌遗传算法求解各因素的权重，根据效用值选择最佳网络接入，有效降低了阻塞率，其不足是各因素属性值的确定缺少客观性。文献[9]提出基于离散粒子群优化的接入控制算法，使用惩罚函数法将多个优化目标转换为单目标的优化问题求解，提高了用户满意度，但忽略了各网络之间的负载均衡。文献[10]使用隶属度函数将多目标优化转换为满意度值的优化，并利用遗传算法求解该单目标优化问题，综合考虑了负载均衡和网络资源利用率，但在网络负载较重时，易造成业务阻塞率的偏高，不能充分保证用户服务的质量。归纳现有基于优化算法的接入控制算法，大多只考虑两个优化目标并且将其转换为单目标问题求解，限制了各优化目标的相对关系且求解精度仍有待提高，而在优化领域，已经提出了性能优越的直接用于求解多目标优化问题的算法。

本文提出一种直接采用基于分解进化的多目标的接入控制(Multi-Objective Access Control based on Decomposition Evolution, MOAC/DE)算法，同时优化多个目标。首先，将优化目标扩展为3个，分别是最小化阻塞率、最小化占用总资源和负载均衡；其次引入基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)并设计新的进化策略，进行初步的寻优；最后利用非支配排序得到 Pareto 最优解集，即最佳接入方案。本文算法旨在综合考虑接入控制中的多个优化目标，提高各优化目标的求解精度，从而提高业务接入成功率和网络资源利用率，并且可提供多种接入方案，决策者可根据不同的实际需求进行最优选择。

2 接入控制的数学模型

业务接入控制是无线通信网络中重要的机制，决定网络资源的分配或无线信道与用户间的有效共享^[11]。图1给出异构无线网络中的接入控制机制。

异构网络接入控制的核心部分是图1中的优化过程，接入控制算法需要综合考虑网络端及用户端的多种因素，给出最优的接入控制方案，这实质上

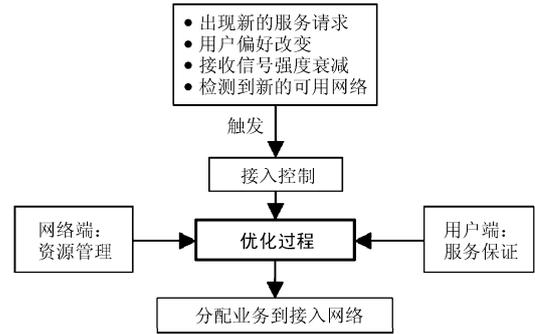


图1 异构无线网络接入控制机制

是多目标优化问题，也是本文研究的重点。下面详细介绍接入控制问题的数学模型和优化目标函数的确立。

为使模型具有普遍性，采用多用户正交频分复用(OFDM)系统作为研究对象。假设在异构系统中共有 m 个候选接入网络， n 个业务等待服务，根据文献[10]的资源分配模型，可以计算出网络 $j(1 \leq j \leq m)$ 能够提供的2维资源单元(Two-dimensional Resource Unit, TRU)总数，如式(1)所示。

$$T_j = \frac{N_j}{F_j} \cdot \frac{T_{Lj}}{T_{Sj} \cdot S_j} \quad (1)$$

式(1)中， N_j 为网络 j 的子载波总数， F_j 为每个子信道包含子载波个数， T_{Lj} 为每帧的帧长， S_j 为每个时隙包含 OFDM 符号个数， T_{Sj} 为 OFDM 的符号周期。

业务 $i(1 \leq i \leq n)$ 与网络 j 的连接情况用 x_{ij} 表示，如式(2)所示。则所求模型的解 \mathbf{X} 为一个 $n \times m$ 的 0/1 矩阵。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{业务 } i \text{ 接入网络 } j \\ 0, & \text{业务 } i \text{ 未接入网络 } j \end{cases} \quad (2)$$

接入控制问题通常采用的目标函数有3个：最小化业务占用总资源、最小化业务阻塞率以及网络的负载均衡。

在各接入网络总资源有限的前提下，以最小化业务占用总资源为优化目标，可以使网络剩余容量最大化，从而降低各网络负载率，提高网络资源的利用率。此优化目标函数表达式为

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{ij} \cdot t_{ij}) \quad (3)$$

式中， t_{ij} 为业务 i 接入网络 j 需要占用的 TRU 资源数，可由文献[10]计算得出。

降低业务阻塞率可以使更多的业务成功接入网络，为用户提供可靠的接入保证。将最小化业务阻塞率作为优化目标，目标函数如式(4)所示。

$$\min g(x) = 1 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \right) \quad (4)$$

此外, 为了避免一个网络负载过重而其他网络负载较轻, 造成网络资源的不合理分配, 将各网络负载率的方差最小作为优化目标, 可以保证网络间的负载均衡。目标函数如式(5)所示。

$$\min h(x) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\eta(j) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \eta(j) \right)^2 \quad (5)$$

式中, $\eta(j)$ 表示当前业务接入后占用 TRU 资源数与网络 TRU 总数的比值。可由式(6)计算。 B_j 表示网络 j 当前已被占用的资源数。

$$\eta(j) = \frac{1}{T_j} \left(B_j + \sum_{i=1}^m x_{ij} t_{ij} \right) \quad (6)$$

业务请求接入时, 由于一个业务同一时刻只能接入一个网络, 并且接入网络 j 的业务占用资源总和不得超过网络 j 所能提供的总资源, 分别有式(7)、式(8)所示的约束条件。

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} t_{ij} \leq T_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

3 基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)的业务接入控制

3.1 多目标接入控制的提出

第2节给出了接入控制优化问题通常采用的目标函数及约束条件。考虑到以下两点: (1)将最小化占用资源作为优化目标, 会使业务优先接入传输速率高的网络, 导致网络负载分布不均衡; (2)将最小化占用资源作为优化目标, 在网络负载较重时会以拒绝业务接入为代价, 导致阻塞率偏高, 无法为大量的业务提供可靠的接入保证, 影响服务质量。因此, 本文算法将优化目标确立为3个, 式(3)、式(4)、式(5)共同构成了本文算法的目标函数, 式(7)、式(8)为约束条件, 接入控制问题转换为式(9)所示的多目标优化问题。

$$\left. \begin{aligned} \min f(x) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{ij} \cdot t_{ij}) \\ \min g(x) &= 1 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \right) \\ \min h(x) &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\eta(j) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \eta(j) \right)^2 \\ \text{s.t.} \quad &\left\{ \begin{aligned} \sum_{j=1}^m x_{ij} &\leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} t_{ij} &\leq T_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)的多目标优化既考虑了网络性能(最小化业务占用资源、最大程度实现负载均衡), 又考虑了用户的服务质量(最小化业务接入阻塞率), 同时优化多个目标, 最终可得到多种优化的接入控制方案, 供决策者根据不同的需求进行选择。

3.2 基于 MOEA/D 的多目标接入控制算法

本文首先将接入控制转换为式(9)所示的多目标优化问题, 然后利用计算量低、收敛精度高的 MOEA/D 算法以及非支配排序进行求解, 得到最终的接入控制方案。

MOEA/D 是目前性能较为优越的多目标进化算法, 该算法将多目标问题分解为一系列单目标子问题^[12]。子问题间的个体协同进化, 利用聚合函数在邻域中进行个体比较, 大大降低了计算量^[13,14]。同时, 由于设置一组均匀分布的权重向量来引导种群进化, 使得个体能够均匀分布在权重向量的方向上, 因而所求 Pareto 解集具有良好的分布性。MOEA/D 因其优越的求解性能在诸多进化算法中脱颖而出, 引起广泛的关注。

在 MOEA/D 中, 权重向量的数量与进化种群的规模数值相等, 设其为 N 。在进化过程中每个权重向量都对应着一个最优解, 每个子问题的进化轨迹和搜索方向都受到相应权重向量的引导。初始权重向量的设置是 MOEA/D 的一个重要步骤, 通常采用均匀分布的权重向量生成方式。本文采用在超平面 $f_1 + f_2 + \dots + f_k = 1$ 上生成初始权重向量。每个权重向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ 满足式(10)。

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k = 1,$$

$$\lambda_i \in \left\{ \frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (10)$$

式中, H 是定义的正整数, 所有权重向量的每一维分量都是从 $\{0/H, 1/H, \dots, H/H\}$ 中取值, 那么生成权重向量的数量为 $N = C_{H+k-1}^{k-1}$ 。

分解策略采用目前应用广泛且效果较好的切比雪夫法(Tchebycheff approach), 如式(11)所示。

$$\min g^{tc}(x | \lambda, z^*) = \max_{1 \leq i \leq k} \left\{ \left| (f_i(x) - z_i^*) / \lambda_i \right| \right\} \quad (11)$$

式中, $z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_k^*)$ 为参考点, 即当前种群中的个体在各目标函数上取得的最优值构成的理想点。进化过程中距离参考点的加权距离最小的个体, 在相应权重向量引导的所有个体中适应度值也最优。此外, 在使用聚合函数比较个体时, 为了消除各目标函数值不同量纲的影响, 需要将各目标函数值归一化。

本文采用如式(2)所示的二进制编码, 则解 \mathbf{X} 为式(12)所示的一个 $n \times m$ 的 0/1 矩阵。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

矩阵整体构成了一个个体，每一行作为一个基因。每一个个体的进化都由变异、交叉、修正、选择4部分组成。

(1)变异：考虑到解形式的特殊性，变异操作是个体 \mathbf{X}_a 以一定的概率 τ 随机变换矩阵某些行中0和1的位置，从而产生变异个体 \mathbf{X}'_a 。

(2)交叉：从权重向量对应的临域集合中随机选择另一个个体 \mathbf{X}_b ，与变异个体 \mathbf{X}'_a 以概率 CR 发生交叉操作，交换某些行中的基因序列，产生新个体 \mathbf{X}'_b ，这样可使临域中优化目标性能相近的个体提供优秀的基因，利于种群的协同进化。

(3)修正：由于该优化问题带有约束条件，在新个体 \mathbf{X}'_b 产生后需采用修正策略对其进行处理：尽可能在每行基因中出现“1”；当某一网络负载已满时将业务接入其他网络，即改变1的位置；若所有网络负载已满，则业务被阻塞，该行元素全为“0”。以上的修正策略可以尽量将更多的业务接入网络，有利于降低业务阻塞率。

(4)选择：通过比较子代个体 \mathbf{X}'_b 与父代个体 \mathbf{X}_a 及其邻域个体的适应度值，选择优秀的个体进入下一代，以促进种群的进化。个体比较只在邻域范围内进行，利于向所在方向快速的进化。

所有个体经过 Gmax 代的进化，可得到一组解集，完成初步的寻优。为便于说明，以2维目标空间为例，图2给出了解集的分布示意图。

MOEA/D 摒弃了以往进化算法中利用 Pareto 支配比较个体的方式，大大降低了计算量，并使所得解集均匀分布在所有权重向量的方向上。针对本问题，由于目标函数值1为整数且个数有限，初步寻优得到的解分布在有限个间断的区间，如图2所示。这些解之间未经过 Pareto 支配关系的比较，因此它们虽然在不同方向上最优，但并非都是 Pareto

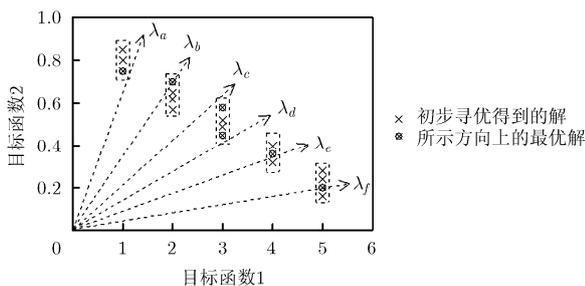


图2 初步寻优得到解的分布示意图

最优。

因此，通过一轮非支配排序，可以有效地提取每一间断区域内的 Pareto 最优解。非支配排序的规则如下：对于最小化问题，两个解 \mathbf{X}_1 和 \mathbf{X}_2 ，如果满足式(13)，即 \mathbf{X}_1 的所有目标函数值都不劣于 \mathbf{X}_2 ，且至少有一个目标函数值优于 \mathbf{X}_2 ，则称 \mathbf{X}_1 是非支配的， \mathbf{X}_2 是被支配的。

$$\left. \begin{aligned} \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, f_i(\mathbf{X}_1) \leq f_i(\mathbf{X}_2) \\ \exists j \in \{1, 2, \dots, n\}, f_j(\mathbf{X}_1) < f_j(\mathbf{X}_2) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

对所得解集中的个体进行非支配排序，将被支配的解删除，保留所有的非支配解，即为该多目标优化问题的 Pareto 最优解，对应不同的最佳接入控制方案。

3.3 算法步骤

本文所提出的接入控制算法求解步骤如下：

步骤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。

步骤2 设定算法参数，生成权重向量，计算权重向量间的欧氏距离，随机产生初始种群。

步骤3 权重向量引导不同个体协同进化：进行变异、交叉、修正操作，产生子代个体，通过比较子代个体与父代个体的适应度值选择优秀个体进入下一代。

步骤4 判断迭代次数是否达到 Gmax，若没有，则转入步骤3；若达到 Gmax，则转入步骤5。

步骤5 进行非支配排序。得到最优解集，即最佳接入控制方案。

4 仿真结果与分析

为验证本文算法的有效性和先进性，这里进行仿真实验。实验在 Intel(R)Celeron(R)CPU G260 @2.80 GHz, 4.00 G 内存, 2.80 GHz 主频的计算机上进行，软件运行环境为 Matlab 2012a，网络仿真模型如图3所示，网络1、网络2、网络3分别表示3种目前常见的网络：McWiLL, TD-LTE 和 WiMax，网络半径分别为 3 km, 1.5 km, 3 km，基站位置随机生成，使3种网络不同程度地重叠覆盖。系统子载波数为 1024，一个2维资源单元由 48 个连续子载波与 10 个符号周期组成。网络1详细参数见文献[15]，网络2、网络3参数见文献[4]。

仿真实验中，随机产生各网络的初始业务分布和 100 个新到业务，其中实时业务与非实时业务随机出现，实时业务速率均匀分布在 50~200 kbps，非实时业务速率均匀分布在 40~140 kbps。算法中的参数分别设置如下：H=15，临域子问题个数 $T=3$ ，变异概率 τ 为 0.5，交叉概率 CR 为 0.6，最大迭代次数 Gmax 为 200。初始种群随机生成。

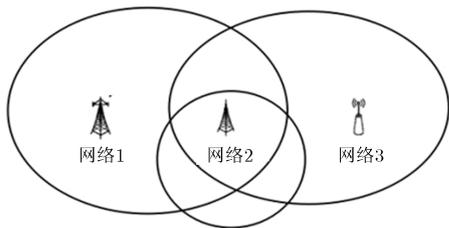


图3 仿真网络模型

4.1 算法的有效性验证

以业务数量 $n = 50$ 为例，图4给出了利用本文算法求得的最优解集在解空间的分布情况。

图4中每个点都是多目标优化问题的一个最优解，其形式为一个 $0/1$ 矩阵，对应于一种接入控制方案，在解空间中的坐标分别对应于3个目标函数值。此时，由于网络剩余资源充足，没有用户被阻塞，所有解均分布在阻塞率为0的平面中。图中最靠左侧的解占用资源数的函数值最小但归一化负载的值较大，即负载均衡程度相对略差；而位于最右侧的解与之相反，这些解在不同的目标函数上各有优势，而靠近中间部分的解在各目标上取得折中的效果。

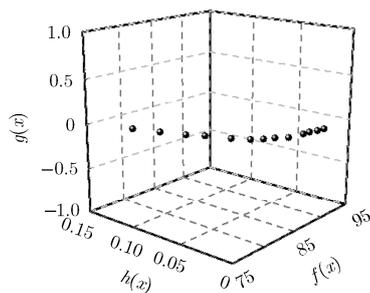
当业务数量 $n = 90$ 时，最优解集的分布如图5所示。

$n = 90$ 时网络负载较多，出现被阻塞的用户。图4中由于不同解对应的阻塞率值不同，解的分布出现不同的层次。这些解的3个目标函数值各不相同，可能在某个目标函数上取得最优值，或者是将不同目标进行折中。

以上实验结果表明，采用本文算法对接入控制的多目标优化问题进行求解，可以得到一个最优解集，这些解对应于不同的接入控制方案，在不同的目标函数值上优势明显，也可以将各目标良好地折中，可供决策者根据不同的需求进行最优的选择，这是直接采用多目标进化算法求解的优势之一。

4.2 算法的先进性验证

为了进一步验证本文算法的先进性，在得到的

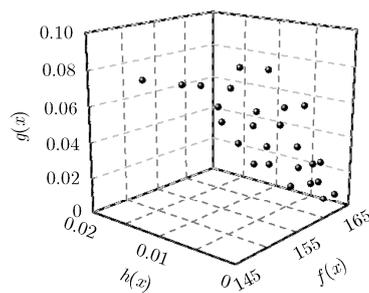
图4 $n=50$ 时的最优解集在解空间的分布

最优解集中选取一组各目标较为均衡的解，将其与目前求解效果较好的算法：基于优化算法的MOC^[10]，以及非优化算法的MLB^[3]，RBF-FNN^[4]分别进行对比。

图6表示各算法由于所有网络负载已满造成的业务阻塞情况。随着业务数量的增加，本文算法的阻塞率始终低于其他算法；当业务数量到达85时，其他算法均出现被阻塞的业务，只有本文算法的阻塞率仍为0；业务数量为90时，本文算法阻塞率较3种算法分别降低33.3%，50.0%，71.5%，具有明显的优势。这是由于MLB, RBF-FNN重点考虑的因素分别是网络间的负载差距、阻塞率差距，未考虑阻塞率的优化；而MOC在求解过程中删除了阻塞率这一优化目标，使其在业务数量较多时，以阻塞业务为代价来最大化网络剩余容量，导致阻塞率偏高，给用户带来不利的服务体验。而本文算法增加了最小化阻塞率作为优化目标，大幅度降低了阻塞率，使得更多业务成功接入网络，给用户提供充足的业务接入可靠性保证。

图7为4种算法业务占用总资源数的对比。由于本文算法与MOC算法都考虑了业务占用资源数的最小化，两种算法的曲线整体低于其他算法；随着业务数量的增加，本文算法的曲线始终维持在较低的水平，即占用资源数始终较少，有效地保证了剩余网络资源的最大化，从而高效利用网络资源；当业务数量达到90后，其他算法曲线逐渐上升到最高点，即网络资源全部被占满，而本文算法的曲线还有上升空间，网络容量还有剩余，可以继续接入新业务，为更多的用户提供接入保证。

图8给出了本文算法的网络归一化负载。3条曲线分别对应于3个网络，曲线越集中，在每点的上下差距越小，表明各网络间的负载差距越小，负载均衡程度越好。图8中，随着业务数量的增加，本文算法的3条曲线始终保持在较小的差距内，表明各网络负载较为均衡，达到了较好的效果。

图5 $n=90$ 时的最优解集在解空间的分布

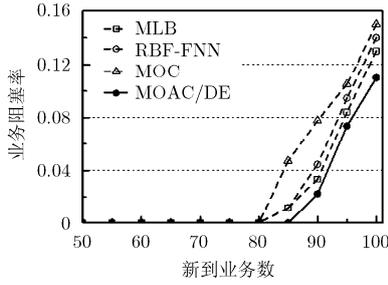


图 6 业务阻塞率对比

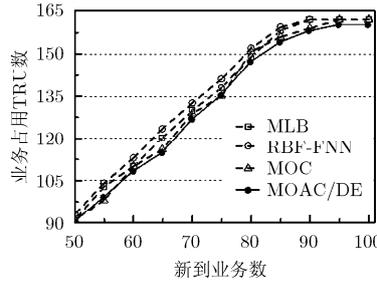


图 7 业务占用 TRU 数对比

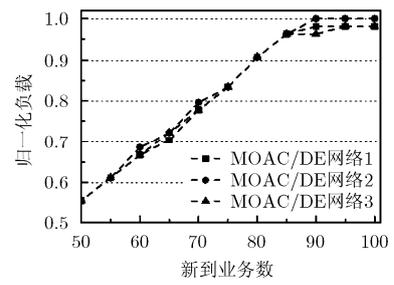


图 8 本文算法的归一化负载

将本文算法与其他 3 种算法的归一化负载进行对比，如图 9 所示。

当业务数量少于 85 时，本文算法与 MLB, MOC 算法的曲线都比较集中，即网络负载始终保持较为均衡的状态，且 3 种算法的均衡程度较为接近；本文算法稍优于两种算法，但明显优于 RBF-FNN 算法。这是由于 MLB 算法业务始终选择负载率最小的网络接入，能够有效地减少网络间的负载差距；MOC 与本文算法都将网络负载率方差最小作为优化目标，可以使业务均衡地分布在各网络，最大程度实现负载均衡；而 RBF-FNN 算法是将各网络阻塞率的差值作为学习目标，在业务数量较少时不能获得有效的阻塞率数据，影响算法的效果。

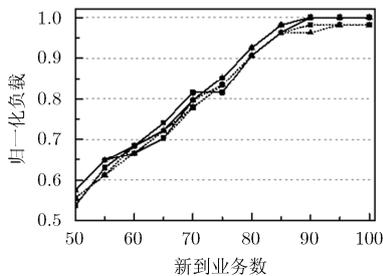
当业务数量超过 85 后，其他算法的曲线逐渐完全重合，而本文算法的曲线之间存在相对明显的差距，负载相对不够均衡。这是由于业务数量超过 85 的情况下，其他算法网络资源逐渐被占满，各网络负载均逐渐达到 100%，因此曲线在最高点重合；而本文算法由于将业务占用资源数最少作为优化目标，因此只有网络 1 的负载达到 100%，另外两个网络的资源还有剩余，对应的曲线未到达最高点。虽然此时的负载均衡程度相对略差，但本文算法能够兼顾节省占用资源、降低阻塞率的优化，综合来讲，本文算法在网络负载均衡方面取得了很好的效果。

综合以上实验结果，由于本文算法增加了阻塞

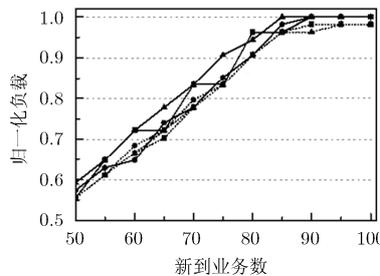
率的优化，相比于 3 种算法能够大幅度降低阻塞率，提高业务接入成功率；在业务占用资源数方面，本文算法与 MOC 算法都取得较好的效果，有利于节省网络资源；而在网络负载方面，本文算法与 MLB, MOC 算法整体的均衡程度相近，并明显优于 RBF-FNN 算法，可以使业务均衡地分布在各个网络。MOC 算法在求解时只考虑了最小化占用资源与负载均衡，忽略了阻塞率的优化，并将其转换成单目标问题求解，各目标的求解精度不高，影响其性能。综合分析，本文算法可以提高各优化目标的求解精度，从而提高业务接入成功率和网络资源利用率，同时可为决策者提供多种有效的接入控制方案，可根据不同的需求进行最优的选择。

5 结论

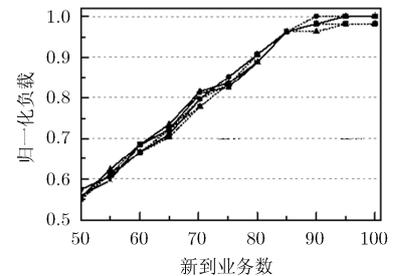
异构无线网络接入控制问题包含多个优化目标，现有算法多是只考虑了两个优化目标并且将其转换为单目标问题求解，限制了各目标的相对关系，无法适应不同的实际需求。本文直接采用多目标优化算法，同时优化多个目标。首先，将优化目标扩展为 3 个，分别是最小化阻塞率、最小化占用总资源和负载均衡；其次引入基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)并设计进化策略，进行初步的寻优；最后通过非支配排序得到 Pareto 最优解集，即最佳接入方案。仿真结果表明，本文算法由于增加了阻



(a)与MLB算法的归一化负载对比



(b)与RBF-FNN算法的归一化负载对比



(c)与MOC算法的归一化负载对比

图 9 本文算法与 3 种算法的归一化负载对比

塞率的优化,大幅度降低了阻塞率,同时能够兼顾节省网络资源与网络间的负载均衡。与当前效果较好的业务接入控制算法相比,本文算法提高了各个优化目标的求解精度,从而提高了业务接入成功率和网络资源利用率,并且为决策者提供了多种接入方案,可根据不同的实际需求从中进行选择。

参考文献

- [1] YAN J, WANG X, LI S, *et al.* A heterogeneous wireless network selection algorithm for smart distribution grid[C]. 2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), IEEE, Changsha, China, 2016: 1959-1963. doi: 10.1109/FSKD.2016.7603480.
 - [2] KOLIPAKA S, BHANDARI B N, and DEY A. Joint admission control and vertical handoff between WLAN and WIMAX in wireless mesh networks for QoS[C]. 2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH), IEEE, Coimbatore, India, 2016: 1018-1023. doi: 10.1109/ICETECH.2016.7569403.
 - [3] 孙卓, 刘铁军, 张倩倩, 等. 异构无线分组网络中的接入选择机制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2762-2769. doi: 1004-731X (2008) 10-2762-04.
SUN Zhuo, LIU Tiejun, ZHANG Qianqian, *et al.* Radio access selection algorithm in heterogeneous wireless packet networks[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(10): 2762-2769. doi: 1004-731X(2008)10-2762-04.
 - [4] 石文孝, 范绍帅, 王楠, 等. 基于模糊神经网络的异构无线网络接入选择算法[J]. 通信学报, 2010, 31(9): 151-156. doi: 10.3969/j.issn.1000-436X.2010.09.020.
SHI Wenxiao, FAN Shaoshuai, WANG Nan, *et al.* Fuzzy neural network based access selection algorithm in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(9): 151-156. doi: 10.3969/j.issn.1000-436X.2010.09.020.
 - [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. doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03638.
LI Mingxin, CHEN Shanzhi, XIE Dongliang, *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. doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03638.
 - [6] 俞鹤伟, 梁根, 秦勇. 异构无线网络多链路接入动态资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 817-824. doi: 10.11999/JEIT160583.
YU Hewei, LIANG Gen, and QIN Yong. Multiple link access and dynamic resource allocation algorithm in heterogeneous wireless networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 817-824. doi: 10.11999/JEIT160583.
 - [7] GOUDARZI S, WAN H H, ANISI M H, *et al.* Comparison between hybridized algorithm of GA-SA and ABC, GA, DE and PSO for vertical-handover in heterogeneous wireless networks[J]. *Sādhanā*, 2016(7): 1-27. doi: 10.1007/s12046-016-0509-4.
 - [8] 唐良瑞, 李文猛, 盛洁, 等. 基于混沌遗传的异构无线网络接入选择策略[J]. 电子学报, 2014, 42(8): 1564-1570. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.08.016.
TANG Liangrui, LI Wenmeng, SHENG Jie, *et al.* A chaos genetic algorithm based access selection in heterogeneous wireless networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(8): 1564-1570. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.08.016.
 - [9] ZHANG W, KWAK K S, and FENG C. Network selection algorithm for heterogeneous wireless networks based on multi-objective discrete particle swarm optimization[J]. *KSIIT Transactions on Internet & Information Systems*, 2012, 6(7): 1802-1814. doi: 10.3837/tiis.2012.07.005.
 - [10] 盛洁, 马冬. 异构无线网络业务接入多目标优化控制算法[J]. 电子学报, 2016, 44(2): 282-288. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02006.
SHENG Jie and MA Dong. Multi-objective optimal based service access control algorithm for heterogeneous wireless networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(2): 282-288. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02006.
 - [11] CARVALHO G H S, WOUNGANG I, ANPALAGAN A, *et al.* A semi-Markov decision process-based joint call admission control for inter-RAT cell re-selection in next generation wireless networks[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(17): 3545-3562. doi: 10.1016/j.comnet.2013.07.029.
 - [12] ZHANG Q and LI H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(6): 712-731. doi: 10.1109/TEVC.2007.892759.
 - [13] MOHAMMADI A, OMIDVAR M N, LI X, *et al.* Sensitivity analysis of penalty-based boundary intersection on aggregation-based EMO algorithms[C]. 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), IEEE, Sendai, Japan, 2015: 2891-2898. doi: 10.1109/CEC.2015.7257248.
 - [14] SATO H. Analysis of inverted PBI and comparison with other scalarizing functions in decomposition based MOEAs[J]. *Journal of Heuristics*, 2015, 21(6): 819-849. doi: 10.1007/s10732-015-9301-6.
 - [15] 温斌, 林波, 刘昀, 等. Mc Wi LL 宽带无线接入技术及应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2009: 6-7.
WEN Bin, Lin Bo, LIU Yun, *et al.* Broadband Wireless Access Technology and Application[M]. Beijing: The Posts and Telecommunications Press, 2009: 6-7.
- 毕晓君: 女, 1966年生, 教授, 研究方向为信息智能处理技术、智能优化算法、数字图像处理等。
张倩: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为多目标优化、异构无线网络无线资源管理。