

# 基于元胞遗传机制的虚拟网络映射算法

王 明 庄 雷 王国卿 张坤丽  
(郑州大学信息工程学院 郑州 450000)

**摘 要** 满足节点和链路约束条件的虚拟网络请求最优映射问题是 NP-难问题,粒子群算法和遗传算法等启发式算法是解决这类问题的主要手段。这类启发式算法从数学模型优化的角度来求解问题,但未考虑虚拟网络映射节点本身的变化对最优解的影响,存在收敛速度较慢和容易陷入局部最优解的问题。文中将元胞遗传机制引入虚拟网络映射问题中,提出了虚拟网络映射算法 VNE-CGA。该算法利用元胞自动机对节点建模,使用“B4567/S1234”规则来替代传统遗传算法中的交叉操作;通过对邻居的学习来指导个体的寻优过程,弥补了传统遗传算法的固有缺陷,最终提高了虚拟网络请求的接受率以及底层物理网络的运营收益。

**关键词** 虚拟网络映射,元胞自动机,遗传算法,元胞遗传算法

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.009

## Virtual Network Mapping Algorithm Based on Cellular Genetic Mechanism

WANG Ming ZHUANG Lei WANG Guo-qing ZHANG Kun-li  
(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract** The optimal mapping problem of virtual network requests which satisfies the constraints of nodes and links is an NP-hard problem. Heuristic algorithms, such as particle swarm algorithm and genetic algorithm, can solve those problems. They solve the problem from the perspective of mathematical model optimization, but fail to consider the influence of the change of virtual network mapping node itself on the optimal solution, and they also have the problems of slow convergence speed and being easy to fall into local optimal solution. This paper introduced the cellular genetic mechanism into the problem of virtual network mapping, and proposed the virtual network mapping algorithm (VNE-CGA). This algorithm uses the cellular automata to model the nodes, and replaces the cross operator in the traditional genetic algorithm with the “B4567 / S1234” rule. Besides, the individual’s optimization process is guided through learning from neighbors, making up for the inherent defects of traditional genetic algorithms. Finally it improves the request acceptance rate of virtual network and the operating income of underlying physical network.

**Keywords** Virtual network mapping, Cellular automata, Genetic algorithm, Cellular genetic algorithm

## 1 引言

随着互联网规模的扩大及新型业务的增多,传统网络结构趋于“僵化”,而网络虚拟化为网络的创新和可持续发展提供了有力的支持<sup>[1-2]</sup>。网络虚拟化的核心思想是在同一个物理网络之上,为不同的业务构建各自的虚拟网<sup>[3]</sup>。其关键是将底层物理网络资源按需提供给虚拟网络请求,它是 NP-难问题<sup>[4]</sup>,启发式算法是求解这类问题的主要手段。文献[5]在粒子群算法的基础上提出了一种负载均衡算法,以提高底层网络的长期平均运营收益。文献[6]设计了一种基于蚁群算法的虚拟网络映射算法,利用蚁群的迭代和智能求解此优化问题。文献[7]初次使用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)解决此映射优化问题,但收敛速度较慢,并且容易陷入局部最优。文献[8]融合遗传算法与粒子群算法提出了一种迭代优

化映射方案,改善了局部最优问题。文献[9]在遗传算法的基础上加入单纯性算法,一定程度上改进了早熟收敛问题。

以上研究多从数学模型的角度来解决和优化问题,较少考虑到虚拟网映射中节点和链路本身的变化对最终映射结果的影响。元胞自动机依靠局部的简单规则来研究整体的复杂性,被广泛应用于信息传递<sup>[10]</sup>、图像加密<sup>[11]</sup>、复杂函数优化<sup>[12]</sup>及生物仿真<sup>[13]</sup>等领域。特别是对于许多单目标优化问题,元胞遗传算法作为一种成熟且高效的方案,已经取得了很好的效果<sup>[14-15]</sup>。本文利用元胞自动机对物理节点和链路进行建模,使用元胞遗传算法来解决虚拟网映射问题,提出了 Virtual Network Embedding-Cellular Genetic Algorithm (VNE-CGA)算法。据我们所知,目前所能查询检索到的文献中尚未有学者结合元胞自动机来求解虚拟网络映射问题。根据仿真实验分析,相较于传统遗传算法和文献[8-9]中提出

到稿日期:2017-11-03 返修日期:2018-02-31 本文受国家 973 计划(2012CB315901),国家自然科学基金(61379079)资助。

王 明(1992-),男,硕士,主要研究方向为下一代互联网;庄 雷(1963-),女,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为形式语言与自动机理论、模型检测、下一代互联网, E-mail: ielzhuang@zzu.edu.cn(通信作者);王国卿(1989-),男,博士,主要研究方向为模型检测、虚拟网络映射;张坤丽(1977-),女,博士,讲师,主要研究方向为机器学习、自然语言处理。

的改进算法,本算法提高了底层网络的运营收益以及虚拟网络映射的接受率。

本文第 2 节介绍了虚拟网络映射的基本概念,提出评价指标并建立数学模型;第 3 节研究遗传算法在虚拟网络映射中的应用并分析了其中的不足,然后针对虚拟网络映射使用元胞自动机对遗传算法进行改进,最后提出了 VNE-CGA 算法;第 4 节介绍实验环境并对实验结果进行分析;最后总结全文。

## 2 虚拟网络映射问题的描述及建模

### 2.1 问题描述

1) 底层物理网络:用带权无向图  $G_S = (N_S, E_S)$  表示,其中  $N_S$  是底层物理网络的节点集合,  $E_S$  是底层物理网络的链路集合。物理节点  $n_s \in N_S$  上的剩余 CPU 资源记作  $c(n_s)$ 。物理链路  $l_s \in L_S$  上的可用带宽资源定义为  $b(l_s)$ 。如图 1(a) 所示,该底层网络有 6 个节点和 7 条链路,矩形左边的数字代表映射前的  $c(n_s)$ ,右边数字代表映射完成后的  $c(n_s)$ ;链路旁左边和右边的数值分别为映射前和映射后的  $b(l_s)$ 。

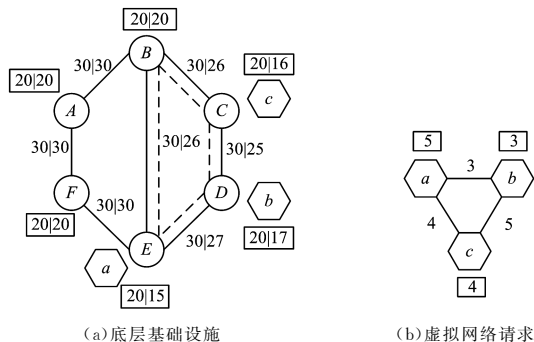


图 1 底层基础设施和虚拟网络请求

Fig. 1 Underlying infrastructure and virtual network requests

2) 虚拟网络请求:用带权无向图  $G_V = (N_V, E_V)$  表示,其中  $N_V$  是虚拟节点集合,  $E_V$  是虚拟链路集合。使用  $c(n_v)$  定义  $n_v \in N_V$  所需要的 CPU 资源,  $b(n_v)$  定义  $e_v \in E_V$  所需要的带宽资源。图 1(b) 表示的虚拟网络请求中包含 3 个虚拟节点和 3 条虚拟链路,其中虚拟节点  $a$  所需的 CPU 资源为 5, 虚拟链路  $(a, b)$  所需的带宽资源为 3。

3) 虚拟网络映射:虚拟网络映射问题可以定义为映射:  $M: G_V(N_V, E_V) \rightarrow G_S(N_{S'}, E_{S'})$ , 其中  $N_{S'} \in N_S, E_{S'} \in E_S$ 。

### 2.2 评价指标

本文主要研究使用元胞遗传算法来解决带节点和链路约束的虚拟网络映射优化问题,目的是降低物理网络资源的运营成本并提高物理网络的运营收益。与文献[9]相似,在  $t$  时刻接受一个虚拟网络请求的收益被定义为其所需的资源之和:

$$R(G_V, t) = (1-\alpha) \sum_{n_v \in N_V} c(n_v) + \alpha \sum_{l_v \in L_V} b(l_v) \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  用来标识链路资源和 CPU 资源的相对权重。  $\alpha$  的取值范围为  $(0, 1)$ , 其值趋近于 1, 表示单位链路资源产生的收益愈大;其值趋近于 0, 则表示单位 CPU 资源产生的收益愈大。

在  $t$  时刻接受一个虚拟网请求的成本被定义为消耗的底层物理网络资源之和:

$$C(G_V, t) = (1-\alpha) \sum_{n_v \in N_V} c(n_v) + \alpha \sum_{l_v \in L_V} \sum_{l_s \in L_S} b(f_{l_s}^{l_v}, l_v) \quad (2)$$

其中,  $f_{l_s}^{l_v} \in \{0, 1\}$ , 当物理链路  $l_s$  向虚拟链路  $l_v$  划分带宽资源时,  $f_{l_s}^{l_v} = 1$ ; 否则  $f_{l_s}^{l_v} = 0$ 。  $b(f_{l_s}^{l_v}, l_v)$  表示  $l_s$  向  $l_v$  分配的带宽值。

虚拟网络映射的主要评价指标如下:

1) 底层网络的长期平局运营收益

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T R(G_V, t)}{T} \quad (3)$$

2) 虚拟网络请求接受率

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T VNR_s}{\sum_{t=0}^T VNR} \quad (4)$$

其中,  $\sum_{t=0}^T VNR_s$  表示从  $t=0$  时刻到  $T$  时刻成功映射的虚拟网络请求个数,  $\sum_{t=0}^T VNR$  表示从  $t=0$  时刻到  $T$  时刻的请求总数。

3) 底层网络的长期平均收益开销比

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=0}^T R(G_V, t)}{\sum_{t=0}^T C(G_V, t)} \quad (5)$$

### 2.3 虚拟网络映射问题的整数线性规划模型

本文研究虚拟网络映射的优化问题,以提高底层网络运营收益为目标,建立了相应的混合整数线性规划模型。该模型涉及到以下两个变量:

1) 二进制变量  $f_{uv}^{ij}$ 。变量值为 1 时表示物理链路  $(i, j)$  为虚拟链路  $(u, v)$  分配了带宽资源, 取值为 0 时表示未分配带宽资源。

2) 二进制变量  $x_u^i$ 。变量值为 1 时表示虚拟节点  $u$  被映射到物理节点  $i$  上; 取值为 0 时表示未被映射。

对于一个虚拟网络映射请求, 节点映射的成本是一定的, 而带宽分配的成本会随着方案的不同发生变化。因此将式(6)作为该模型的目标函数:

$$\text{Minimize } \sum_{(u,v) \in L_V} \sum_{(i,j) \in L_S} f_{uv}^{ij} \times b(l_{uv}) \quad (6)$$

要完成一次虚拟网络映射, 必须满足容量约束条件, 即物理节点和物理链路必须具备充足的资源才能够成功映射。物理节点的可用计算资源必须满足虚拟网络节点的计算资源需求, 如式(7)所示:

$$\begin{cases} \forall u \in N_V, \forall i \in N_S \\ x_u^i \times c(u) \leq c(i) \end{cases} \quad (7)$$

物理链路的可用带宽资源必须满足虚拟链路的带宽需求, 如式(8)所示:

$$\begin{cases} \forall (i, j) \in L_S, \forall (u, v) \in L_V \\ f_{uv}^{ij} \times b(l_{uv}) \leq b(l_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

在同一个虚拟网络请求中, 为了保证映射的正确性, 每个底层物理节点只能划分一个虚拟节点, 而一个虚拟节点也只能被映射到一个物理节点上。约束条件如式(9)所示:

$$\begin{cases} \forall w \in N_S, \sum_{m \in N_V} x_{mw} \leq 1 \\ \forall m \in N_V, \sum_{w \in N_S} x_{mw} \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

如果虚拟节点  $u$  和  $v$  分别被映射到物理节点  $i$  和  $j$  上, 那么虚拟链路  $(u, v)$  将被映射到从节点  $i$  到  $j$  的一条底层物理路径  $P$  上。在源点  $i$  上, 流出的流量为 1, 流入的流量为 0,

因此  $\sum_{(i,j) \in L_S} f_{uv}^{ij} - \sum_{(j,i) \in L_S} f_{uv}^{ji} = 1$ ; 在汇点  $j$  上, 流出的流量为 0, 流入的流量为 1, 因此  $\sum_{(i,j) \in L_S} f_{uv}^{ij} - \sum_{(j,i) \in L_S} f_{uv}^{ji} = -1$ ; 而在路径  $P$  的其他节点上, 流出和流入的流量均为 1, 所以  $\sum_{(i,j) \in L_S} f_{uv}^{ij} - \sum_{(j,i) \in L_S} f_{uv}^{ji} = 0$ 。连接性约束条件如下:

$$\forall i \in N_S, \forall (u,v) \in L_V$$

$$\sum_{(i,j) \in L_S} f_{uv}^{ij} - \sum_{(j,i) \in L_S} f_{uv}^{ji} = \begin{cases} 1, & \text{if } x_u^i = 1 \\ -1, & \text{if } x_u^i = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

### 3 基于元胞遗传算法的虚拟网络映射算法

#### 3.1 遗传算法在虚拟网络映射中的应用

##### 1) 映射方案的编码和初始种群的生成

本文使用实数编码, 假定  $N_V = \{n_v^1, n_v^2, \dots, n_v^L\}$ , 其中  $L = |N_V|$ , 即一共有  $L$  个虚拟节点。用长为  $L$  的序列表示问题的解(染色体),  $n_v^i$  的值表示第  $i$  个虚拟节点映射所映射到的物理节点。随机生成  $N$  个染色体作为初始种群。

##### 2) 交叉算子

传统遗传算法中常采用部分映射交叉法, 先利用随机方法对群体进行配对, 然后随机确定交叉点所在的位置, 最后以概率  $P_c$  交换配对染色体间的部分基因。

##### 3) 变异算子

首先使用随机的方法设置每个个体的基因变异位置, 随后根据变异概率  $P_m$  改变基因位的值。

##### 4) 可行解检查

经过交叉和变异之后的解可能不是问题的可行解。如父串  $A = (18, 6|7, 8, 3|4, 22, 25)$ ,  $B = (3, 38|7, 9, 12|4, 16, 13)$ , 两者交配后得到  $A1 = (18, 6|22, 8, 3|35, 22, 25)$ , 这时  $A1$  中底层物理节点 22 同时承载了第 3 个和第 7 个虚拟节点, 这不符合式(9)中的约束要求, 因此使用随机方法重新对第 7 个虚拟节点进行映射, 直到满足约束条件。

##### 5) 适应度评测

对于一条给定的染色体(即一种映射方案)而言, 原始的资源分配优化问题被简化成虚拟网络链路映射问题, 即多商品流(MCF)问题。在本文提出的算法中, 目标函数的取值恒定且非负, 优化方向是求其最小值, 故可以直接使用式(6)的值作为个体的适应度。

通过对图 2 所示的传统遗传算法进行描述和研究, 我们发现了以下问题:

1) 传统遗传算法在选择下一代个体时, 个体被选择的可能性取决于个体的适应度, 但是这个选择过程是概率性的, 如果完全服从这一基本模式, 那么可能会发生某一代中适应度较高的个体偶然未被选中的情况; 反过来, 由于每次都选择种群内的“佼佼者”(适应度高的个体)而忽略了一些“潜力股”, 种群极有可能陷入局部最优。

2) 对于动态虚拟网络请求问题, 采用传统遗传算法进行求解可能会因为早熟而导致算法对以后变化的数据不再产生反应。

3) 交叉操作的作用。交叉操作可以保证不丢失某些可能的解, 但另一方面, 特别是对于初始种群, 交叉操作与设置一

个大的变异率的作用相同。这个过程并没有对“交叉”操作进行适当的引导, 个体之间的学习是盲目的。

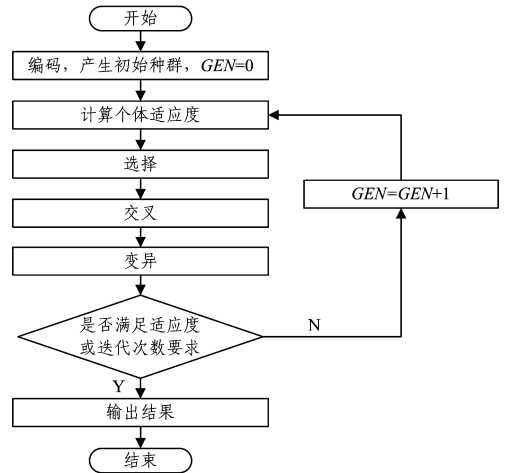


图 2 传统遗传算法的计算流程

Fig. 2 Computation process of traditional genetic algorithm

#### 3.2 元胞自动机的改进与建模

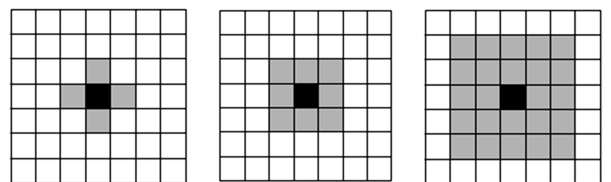
如 3.1 节所述, 传统遗传算法容易早熟收敛, 陷入局部最优, 为提高其寻优能力, 改进算法性能, 本文引入了元胞自动机。本文通过分析虚拟网络映射的特点, 使用元胞自动机对网络节点进行建模, 并结合传统遗传算法, 提出了一种以最大化底层网络运营收益为目标的映射算法。

元胞自动机(Cellular Automata, CA)是一类在空间和时间上都离散的动力学系统, 被广泛应用于复杂问题的研究分析中, 其最基本的组成部分包括元胞、元胞空间、邻居及演化规则<sup>[16]</sup>。

1) 元胞: 在本文的模型中, 将节点映射方案  $N_V = \{n_v^1, n_v^2, \dots, n_v^L\}$  作为个体进行编码, 节点编号  $n_v^i$  用  $LB$  位二进制数表示, 编码后的个体即为一个长度为  $LB$  的二进制向量。其中, 编码后的每一个二进制位即为一个元胞。

2) 元胞空间: 对于虚拟网络映射问题来说, 使用带权无向图来表示底层网络和虚拟网络请求, 因此本文采用最常用的二维空间结构进行建模。将种群中的染色体按行排列, 形成一个  $(LB)q$  的二进制矩阵, 其中  $q$  为染色体的数量。

3) 邻居: 元胞自动机中元胞状态的更新只依赖于其本身的状态及其邻居的状态。常用的邻居模型有 Von Neumann 邻居、Moore 邻居以及扩展的 Moore 邻居(见图 3)。通常情况下, Von Neumann 邻居模型计算简单, 但是不及 Moore 邻居稳定; 而扩展的 Moore 邻居的计算量太大。本模型采用 Moore 邻居进行建模, 即个体  $C_{ij}$  的邻居为  $C_{i-1,j-1}, C_{i-1,j}, C_{i-1,j+1}, C_{i,j-1}, C_{i,j+1}, C_{i+1,j-1}, C_{i+1,j}, C_{i+1,j+1}$ 。



(a) Von Neumann 邻居

(b) Moore 邻居

(c) 扩展的 Moore 邻居

图 3 元胞自动机邻居的结构

Fig. 3 Structures of cellular automata neighbors

4)规则:简单地讲,规则就是一个状态转移函数,可记为  $f$ ;  $S_i^{t+1} = f(S_i^t, S_N^t)$ 。其中,  $f$  为状态转移函数;  $S_N^t$  表示  $t$  时刻  $i$  元胞的邻居状态集合。经典的“生命游戏(B3/S23)”的描述为:如果一个死元胞有 3 个活邻居,则其繁殖(Born,状态从 0 变为 1),否则状态不变;如果一个活元胞邻居有 2 个或 3 个元胞,则其生存(Survey,状态不变),否则死亡(状态从 1 变为 0)。演化规则的数学表达式如下:

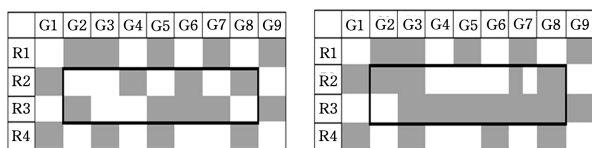
$$\begin{cases} \text{if } S_i^t = 0 \text{ then } S_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum S_N^t = 3 \\ 0, & \text{if } \sum S_N^t \neq 3 \end{cases} \\ \text{if } S_i^t = 1 \text{ then } S_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum S_N^t = 2, 3 \\ 0, & \text{if } \sum S_N^t \neq 2, 3 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

随着虚拟网络映射的进行,底层物理资源时刻都在发生变化,特别是当底层网负载过重时,传统“尽力服务”的模式很可能会导致底层网络资源的不平衡利用,从而失去更多利益<sup>[17]</sup>。为提高底层网络提供商的收益,在虚拟网络映射的过程中,既要尽量降低底层资源的使用成本,也要平衡利用底层资源。结合经典的演化规则“生命游戏(B3/S23 规则)”,我们将算法回收和分配物理资源的过程类比成生物的消亡和繁殖。经过实验分析对比,确立了基于演化规则“B4567/S1234”的元胞遗传算法。演化规则如式(12)所示:

$$\begin{cases} \text{if } S_i^t = 0 \text{ then } S_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum S_N^t = 4, 5, 6, 7 \\ 0, & \text{if } \sum S_N^t \neq 4, 5, 6, 7 \end{cases} \\ \text{if } S_i^t = 1 \text{ then } S_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum S_N^t = 1, 2, 3, 4 \\ 0, & \text{if } \sum S_N^t \neq 1, 2, 3, 4 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

### 3.3 VNE-CGA 算法

基于元胞遗传算法的虚拟网络映射算法(Virtual Network Embedding-Cellular Genetic Algorithm, VNE-CGA)使用演化规则 B4567/S1234 来取代传统遗传算法中基因组之间的交叉行为。在 VNE-CGA 算法中,交叉操作不再局限于匹配的两条染色体链上,而是对每个不在边界上的元胞(这里,单个元胞被视为个体的基因)进行扫描,统计其邻居的状态,从而确定其下一时刻的状态。交叉操作如图 4 所示,其中行为个体,列为基因;白色代表状态为 0,黑色代表状态为 1。



(a)交叉前的染色体序列

(b)交叉后的染色体序列

图 4 元胞遗传算法中交叉算子的实现

Fig. 4 Implementation of cross operator in cellular genetic algorithm

如图 4(a)所示, R2 染色体的 G2 基因位本身的状态为“白色”,它周围的 8 个邻居中有 4 个白色和 4 个黑色,则  $S_i^t = 0, \sum S_N^t = 4$ ,因此  $S_i^{t+1} = 1$ 。VNE-CGA 算法的具体描述如下。

#### 算法 1 VNE-CGA 算法

输入:物理网络  $G_S = (N_S, E_S)$ , VN 请求  $G_V = (N_V, E_V)$

输出:VN 请求映射方案 Result

1. 接受到达的虚拟网络请求。
2. 初始化:随机产生初始种群  $P(0)$ ,规模为  $N$ ,最大迭代次数为  $MG$ ;交叉概率为  $P_c$ ,变异概率为  $P_m$ ;  $fit_{max} = 0, M_{best} = \emptyset, B_{best} = \emptyset, Result = \emptyset$ 。

3. 选择操作:计算每个个体的适应度  $F(x)$ 。

for 每条染色体  $chr \in A$  do

用 ILOG CPLEX 求解优化问题式(6)一式(10),得到适应度  $fit(chr)$ 以及对应的虚拟网络链路带宽资源供给方案。

if  $fit(chr) > fit_{max}$ , then  $fit_{max} = fit(chr)$ ;

记录 VN 节点映射方案:  $M_{best} \leftarrow chr$ ;

记录 VN 链路资源供给方案:  $B_{best} \leftarrow b(chr)$ ;

end if

end for

4. 下一代种群的生成:

1)将根据适应度选择出的  $N$  条染色体按行排列,所有的基因组成元胞空间,对个体按照 Moore 邻居创建种群的邻居矩阵。

2)以概率  $P_c$ ,按照 B4567/S1234 规则对父代种群进行交叉操作。

3)以概率  $P_m$  对新生成的子代群体进行变异。

4)对新生成子代种群进行可行解检查。

群体  $p(t)$ 经过上述步骤之后,得到下一代群体  $p(t+1)$ 。

5. if  $t = T$  或者连续  $n$  次迭代适应值的变化率不超过  $q$

输出映射方案  $Result = M_{best} \cup B_{best}$ ;

else

跳转到步骤 3 继续执行。

6. 结束程序。

## 4 实验及结果分析

本文的实验环境及实验参数的设定与文献[8-9]类似。网络拓扑结构通过利用 GT-ITM 工具随机生成,包含 100 个物理节点和约 500 条物理链路,可用资源服从  $[50, 100]$  的均匀分布。每次仿真实验约运行 50000 个时间单位,含有 2500 个虚拟网络请求,其中每 100 个时间单位内的请求服从均值为 5 的泊松分布,生命周期服从指数分布;每个虚拟网络请求中虚拟节点之间以 0.5 的概率相连,节点个数与资源需求分别满足  $[2, 20]$  和  $[0, 50]$  的均匀分布。种群初始规模  $N$  设为 16,最大迭代次数  $MG$  设为 10,交叉概率  $P_c$  设为 0.5,变异概率  $P_m$  设为 0.01。

图 5 和图 6 表明,与传统 GA, VNE-PSO-GA 和 VNE-M-GA 相比, VNE-CGA 算法的底层物理网络的长久收益分别提高了 26%, 12% 与 6%, 而虚拟网络接受率分别提高了 8%, 5% 和 3%。主要原因是传统 GA 和 VNE-PSO-GA 容易得到局部极值, VNE-M-GA 在传统 GA 的基础上引入了单纯形法来解决局部最优问题,但单纯形法本身的局限性又使得其收敛性能下降。本文根据虚拟网络映射本身的特点,引入了元胞自动机模型,使个体之间的交互全方位、动态化,保证了种群之间的多样性,从而有效地改善了局部极值的缺点,避免了早熟收敛。本文方法在降低底层网络运营成本的同时,接受更多的虚拟网络请求,从而提高长期运营收益。如图 7 所示,与传统 GA, VNE-PSO-GA 和 VNE-M-GA 相比, VNE-CGA 算法的底层网络收益开销比分别提高了 27%, 10% 与 4%。根据上述分析,在底层网络长期运营收益、虚拟网络请求接受率以及收益开销比方面, VNE-CGA 算法均比传统 GA 有了极大的提升,与经过改进后的 VNE-PSO-GA 和 VNE-M-GA 相比,也有一定程度的提高。

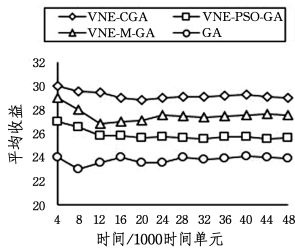


图5 底层网络的长期平均运营收益

Fig. 5 Long-term average operating income of underlying physical network

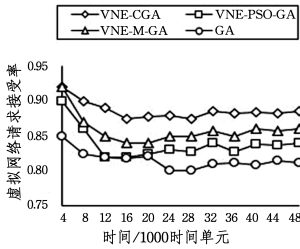


图6 虚拟网络的请求接受率

Fig. 6 Request acceptance rate of virtual network

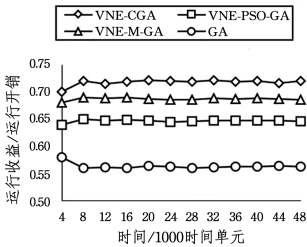


图7 底层网络的收益开销比

Fig. 7 Income-cost ratio of underlying physical network

图8表明,与传统GA算法相比,VNE-CGA,VNE-PSO-GA和VNE-M-GA的运行时间都有所增加。因为这3种算法都是在传统GA算法的基础上进行改进,从而导致计算量增加。VNE-CGA相比其他算法的耗时均有所增加,这是因为较为广阔的元胞空间及有限的邻居范围同时决定了寻优信息在元胞空间内传递需要一定的时间,这间接地影响了收敛速度。

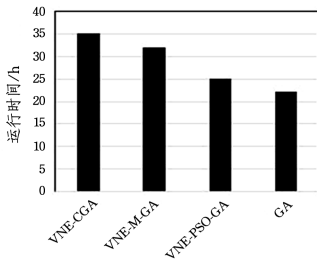


图8 算法的运行时间

Fig. 8 Running time of algorithms

**结束语** 本文以最大化底层物理网络的长期运营收益为目标,建立了优化虚拟网络映射的整数线性规划模型,并根据虚拟网络映射的特点建立了元胞自动机模型,首次使用元胞遗传算法来求解虚拟网络映射优化问题。该算法利用元胞自动机的演化规则重新定义了交叉操作,提高了算法的寻优能

力。仿真实验结果表明,该算法在一定程度上改善了早熟收敛问题,降低了底层物理网络的开销,提高了虚拟网络请求接受率与底层物理网络的长期运营收益。在大规模实际应用中,虚拟网络的映射情况比较复杂,下一步可以研究自适应的动态邻居模型,从而使算法适用于不同的场景。

## 参考文献

- [1] INFÜHR J,RAIDL G. A memetic algorithm for the virtual network mapping problem[J]. *Journal of Heuristics*,2016,22(4): 475-505.
- [2] FISCHER A,BOTERO J F,BECK M T,et al. Virtual network embedding: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*,2013,15(4):1888-1906.
- [3] CHOWDHURY N M M K,BOUTABA R. A survey of network virtualization[J]. *Computer Networks*,2010,54(5):862-876.
- [4] AMALDI E,CONIGLIO S,KOSTER A M C A,et al. On the computational complexity of the virtual network embedding problem[J]. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*,2016, 52:213-220.
- [5] HUANG B B,LIN R H,PENG K,et al. Load-balancing Based on Particle Swarm Optimization in Virtual Network Mapping [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*,2013, 35(7):1753-1759. (in Chinese)  
黄彬彬,林荣恒,彭凯,等. 基于粒子群优化的负载均衡的虚拟网络映射[J]. *电子与信息学报*,2013,35(7):1753-1759.
- [6] LIU X,ZHANG Z B,LI X M,et al. Optimal virtual network embedding based on artificial bee colony [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*,2016,2016(1):273.
- [7] SUN G. Virtual network mapping technology research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2012. (in Chinese)  
孙罡. 虚拟网络的映射技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [8] WANG W Z,WANG B Q,WANG Z M,et al. Virtual network embedding algorithm based on a hybrid swarm intelligence optimization[J]. *Journal of Computer Applications*,2014,34(4): 930-934. (in Chinese)  
王文钊,汪斌强,王志明,等. 基于混合群智能优化的虚拟网络映射算法[J]. *计算机应用*,2014,34(4):930-934.
- [9] LIU J,SONG T,HU Y,et al. Research on Virtual Network Mapping Based on Mixed Genetic Algorithm[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*,2016,37(4):773-777. (in Chinese)  
刘佳,宋涛,胡颖,等. 基于混合遗传算法的虚拟网络映射方法研究[J]. *小型微型计算机系统*,2016,37(4):773-777.
- [10] CISSÉ B,EL YACOUBI S,GOURBIÈRE S. The basic reproduction number for Chagas disease transmission using cellular automata[C] // *International Conference on Cellular Automata*. Springer,Cham,2014:278-287.
- [11] BAKHSHANDEH A,ESLAMI Z. An authenticated image encryption scheme based on chaotic maps and memory cellular automata[J]. *Optics and Lasers in Engineering*,2013,51(6):665-673.

## 参 考 文 献

- [1] Information Technology-Guidelines for the Management of It Security -Part 2: Managing and Planning IT Security; ISO/IEC TR 13335-2 (1997) [S]. New York: Information Technology Task Force, 1998.
- [2] China National Standardization Administration Commission. Information Security Technology Information Security Risk Assessment Standard; GB/T20984-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2007. (in Chinese)  
中国国家标准化管理委员会. 信息安全技术信息安全风险评估规范; GB/T20984-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [3] STEVEN N, SUSHIL J, LINGYU W, et al. Measuring Security Risk of Networks Using Attack Graphs[J]. International Journal of Next-Generation Computing, 2010, 1(1): 135-147.
- [4] MOHAMMED A, MARTIN R. Attack Graph-Based Risk Assessment and Optimisation Approach[J]. International Journal of Network Security & Its Applications, 2014, 6(3): 31-43.
- [5] LI X, WANG C Y, WANG S J, et al. Construct Principles and Assessment Method of Index System[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(20): 69-74.
- [6] FU Y, WU X P, YE Q. Approach for information systems security situation evaluation using improved FAHP and Bayesian network[J]. Journal on Communications, 2009, 30(9): 135-140. (in Chinese)  
付钰, 吴晓平, 叶清. 基于改进 FAHP-BN 的信息系统安全态势评估方法[J]. 通信学报, 2009, 30(9): 135-140.
- [7] WU Z B, XU J P. Possibility distribution - based approach for MAGDM with hesitant fuzzy linguistic information [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(3): 694-705.
- [8] DUBOIS D, PRADE H. Bridging gaps between several forms of granular computing[J]. Granular Computing, 2016, 1(2): 115-126.
- [9] MENDEL J M. A comparison of three approaches for estimating (synthesizing) an interval type-2 fuzzy set model of a linguistic term for computing with words[J]. Granular Computing, 2016, 1(1): 59-69.
- [10] WANG D C, XU Y, LI B, et al. Mixed-index information system security evaluation[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2016, 56(5): 517-521, 529. (in Chinese)  
王丹琛, 徐扬, 李彬, 等. 基于业务效能的信息系统安全态势指标[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(5): 517-521, 529.
- [11] WANG J D, ZHANG H W, WANG N, et al. Information System Security Risk Assessment and Defense Decision-making[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 139-161. (in Chinese)  
王晋东, 张恒巍, 王娜, 等. 信息系统安全风险评估与防御决策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 139-161.
- [12] LEE K C, HSIEH C H, WEI L J, et al. Sec-Buzzer: cyber security emerging topic mining with open threat intelligence retrieval and timeline event annotation (Soft Comput) [EB/OL]. https://doi.org/10.1007/s00500-016-2265-0.
- [13] LIU A Y, WEI F J. The Study on the Method of Weight Determination of the Experts on the Evaluation of Language[J]. Chinese Journal of Management Science, 2011, 19(6): 149-155. (in Chinese)  
刘安英, 魏法杰. 基于改进语言评估标度的专家后验权重确定方法研究[J]. 中国管理科学, 2011, 19(6): 149-155.
- [14] TIAN X H. Research on Extended Model for Multiple Attribute Decision Making Based on Fuzzy Information[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015. (in Chinese)  
田晓娟. 基于模糊信息的多属性决策扩展模型研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [15] WANG Y M, XU N R. The Optimal Transitive Matrix Method of Group Comparison Matrices and Weight Vectors[J]. System Engineering Theory and Practice, 1991, 11(4): 70-74. (in Chinese)  
王应明, 徐南荣. 群体判断矩阵及权向量的最优传递矩阵求法[J]. 系统工程理论与实践, 1991, 11(4): 70-74.
- [16] XU Z S, WEI C P. A consistency improving method in the Analytic Hierarchy Poress[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116(2): 443-449.
- [17] GAO Y, LUO X X, HU Y. Research on methods for deriving experts' weights based on judgment matrix and cluster analysis [J]. System Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 593-596. (in Chinese)  
高阳, 罗贤新, 胡颖. 基于判断矩阵的专家聚类赋权研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 593-596.
- [18] LI L, LIU Y Q, LI S G. New Method for Determining the Objective Weight of Decision Makers in Group Decision Based on Judgment Matrix and Cluster Analysis[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(4): 77-81. (in Chinese)  
李琳, 刘雅奇, 李双刚. 一种群决策专家客观权重确定的改进方法[J]. 运筹与管理, 2011, 20(4): 77-81.
- [12] ZHENG B J, LI Y X, WU M C. A function optimization algorithm based on cellular automata [J]. Computer Engineering, 2003, 29(19): 66-67. (in Chinese)  
郑波尽, 李元香, 吴漫川. 细胞自动机函数优化算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(19): 66-67.
- [13] WAS J, SIRAKOULIS G C. Special issue on Simulation with Cellular Automata [J]. Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International, 2016, 92(2): 99-100.
- [14] ALBA E, DORONSORO B. The exploration/exploitation tradeoff in dynamic cellular genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2005, 9(2): 126-142.
- [15] KARTHIKEYAN S, SARAVANAN M, RAJKUMAR M. Optimization of worker assignment in dynamic cellular manufacturing system using genetic algorithm [J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2016, 15(1): 35-42.
- [16] KARI J. Cellular Automata and Discrete Complex System [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2017, 412(30): 3798-3799.
- [17] YU J J, WU C M. Randomized Algorithm for Virtual Network Mapping Problem Based on Load Balancing [J]. Computer Science, 2014, 41(6): 69-74. (in Chinese)  
余建军, 吴春明. 基于负载均衡的虚拟网映射随机算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 69-74.

(上接第 70 页)