

一种低时延虚拟网络功能映射及调度优化算法

刘光远^{1,2}, 曹晶仪^{1,2}, 庞紫园^{1,2}, 黄书翠^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学信息科学与技术学院, 050043, 石家庄;

2. 河北省电磁环境效应与信息处理重点实验室, 050043, 石家庄)

摘要: 针对传统虚拟网络功能映射及调度服务时间长、不稳定的问题,提出了一种新的虚拟网络功能映射及调度优化算法。以虚拟网络功能链路传输时延与实例化时延整体最小化为目标,建立虚拟网络功能映射及调度模型,通过设计一种低时延映射及调度算法(GABL),根据虚拟网络功能与虚拟机之间的映射集合,优化虚拟网络功能映射节点的选择问题及调度顺序问题,求解出最短时间的网络功能虚拟化映射及调度方案。GABL 算法采用两段式初始化技术,将虚拟网络功能和虚拟机分别进行初始化,提高初始解的质量;利用具有锦标赛策略的人工蜂群算法对问题进行求解,保留优秀基因与种群多样性,避免陷入局部最优;采用局部搜索算法在可行解附近进行寻优,加快求最优解的速度。仿真实验结果表明:GABL 算法具有稳定性强、收敛性快等特点,能够有效降低虚拟网络功能映射及调度服务时间;与 GATS 算法相比,GABL 算法的服务完成时间减少了 15%。

关键词: 虚拟网络功能;低时延;网络功能虚拟化;人工蜂群算法;局部搜索

中图分类号: TP393.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302013 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0121-10

An Optimized Algorithm with Low Latency for Virtual Network Function Mapping and Scheduling

LIU Guangyuan^{1,2}, CAO Jingyi^{1,2}, PANG Ziyuan^{1,2}, HUANG Shucui^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Electromagnetic Environmental Effects and Information Processing, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Traditional virtual network function mapping and scheduling services are usually time-consuming and unstable. To address this problem, an optimized new algorithm for virtual network function mapping and scheduling is proposed. Firstly, a virtual network function mapping and scheduling model is established to minimize the transmission latency and instantiation latency of virtual network function links as a whole. Then, a low-latency mapping and scheduling algorithm GABL, is designed. According to the mapping set between virtual network functions and virtual machines, the selection of virtual network function mapping nodes and scheduling sequence are optimized, and the virtual network function mapping and scheduling scheme with the least time consumption is concluded. GABL algorithm uses two-stage initialization technology to initialize virtual network functions and virtual machines separately to improve the quality of the

收稿日期: 2022-06-20。 作者简介: 刘光远(1981—),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62106157); 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1701403);河北省自然科学基金资助项目(F2017210118)。

网络出版时间: 2022-11-04

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221104.1455.005.html>

initial solution. The artificial bee swarm algorithm with championship strategy is used to solve the problem, preserving excellent gene and population diversity, and avoiding local optimum. Local search algorithm is adopted to search for optimization near the feasible solution, thus speeding up the location of optimal solution. The simulation results show that the GABL algorithm has good stability and fast convergence, and effectively reduces the time of virtual network function mapping and scheduling service. The service completion time of GABL algorithm is reduced by 15% compared with GATS algorithm.

Keywords: virtual network function; low latency; network function virtualization; artificial bee colony algorithm; local search

传统的网络形式是在现有的基础设施中,采用多种硬件设备来支持各种不同功能的网络,如果增加新的功能,就需要增设新的专用网络设备^[1];然而部署专用的网络设备成本高昂,灵活性较差,生命周期较短等问题给企业的管理人员带来很大的困难^[2]。在5G移动因特网技术发展的背景下,电信公司提出了网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)的概念^[3],NFV技术通过将网络功能和专用硬件分离,以软件的形式在商业服务器上实现多种网络功能^[4-6],实现了网络功能的高效配置和灵活部署,减少了网络功能部署产生的资金开销、操作开销、空间及能源消耗^[3]。

在NFV环境中,多个虚拟网络功能(virtual network function, VNF)按照一定的顺序,构建成特定网络业务的功能序列,即服务功能链(service function chain, SFC)^[7]。相同类型的VNF可以部署或者重新实例化在不同的通用服务器上,不需要重新购买硬件^[8]。针对一个特定的网络请求,VNF可以动态选择通用服务器进行实例化,从而实现端到端的网络服务。根据网络业务的不同,一般需要多条服务功能链同时进行网络服务。当多个服务请求同时到达物理网络时,通过优化虚拟网络功能映射节点的选择及调度顺序,执行实例化服务,减少网络服务完成时间的问题迫在眉睫^[9]。

目前,已有大量的工作对低时延虚拟网络功能映射及调度进行了研究。文献[10]在网格环境下采用了Min-Min遗传算法解决功能任务调度问题,虽然对小规模功能任务进行调度实验取得了不错的结果,但是该策略未在较大规模的功能任务调度环境下进行实验,无法完全说明其适用性。文献[11-12]提出将该问题抽象为作业车间调度问题,优化的目标为最小化调度完成时间,并提出使用禁忌搜索算法解决VNF中的资源分配与映射的问题,但未给出多项式时间内的合理化解方案。文献[13]提出

了一种考虑弹性约束的资源分配算法,并在映射阶段采用了虚拟网络功能与物理节点一一映射的方式,然而在这种方式下虚拟网络不能动态分配至物理节点,限制了可行域,影响解的效果。文献[14]将VNF调度划分为放置和请求调度两部分,对问题建立模型后,首先采用贪心算法和一种启发式PCKK算法解决请求调度问题,但该算法容易出现早熟的情况,易陷入局部最优,无法获得更好的调度方案。文献[15-16]将虚拟网络功能动态映射至虚拟机并进行调度,并提出采用多层编码的方法进行初始化,虽然多层编码的方法求初始解比较方便,但是易产生非法解。文献[17]在功能链路调度研究中,将虚拟网络功能动态映射至虚拟机并进行调度,并设计了一种混合蜂群算法,该算法先使用了随机方法进行初始化种群,然后使用蜂群算法进行求解,使用随机方法初始化种群,无法保证初始解的全局性,影响解的效果。文献[18]使用遗传算法对不同的资源进行分配,遗传算法易早熟,易陷入局部最优,无法保证解的全局性。

当前研究还存在两个方面的问题,一方面通过预定固定的参数将映射节点动态选择问题与调度问题转化为单一的静态调度问题,限制了优化求解的空间,在实际情况中并不适用,另一方面传统启发式的方法容易陷入局部最优。针对上述问题,首先建立虚拟网络功能映射及调度模型,定义多条SFC整体链路传输和实例化服务时延最小化为目标,然后设计GABL算法优化虚拟网络功能映射节点的选择问题及调度顺序问题,求解出低时延网络功能虚拟化映射及调度方案,该算法采用两段式初始化方法解决初始化质量差的问题,将交叉变异的遗传因子运用到具有锦标赛策略的人工蜂群算法中,解决易陷入局部与早熟的问题,采用局部搜索在可行解附近寻找最优解,加快求最优解的速度。实验证明GABL算法在该映射调度问题上的高效性,对比其他基准算法可以有效的减少映射及调度服务时间。

1 网络模型与问题描述

NFV 的出现极大的避免了传统网络形式的耦合问题,提升了网络的灵活性与可扩展性。在 NFV 环境中,网络服务一般需要经过 SFC 组链、SFC 映射和 VNF 调度 3 个阶段^[19],3 个阶段互相影响,相互依存。

1.1 问题描述

SFC 组链是网络服务的开始阶段,当客户发起网络服务请求,网络端将根据用户的功能需求、VNF 的属性、带宽约束、带宽依赖等组建 SFC^[20]。SFC 通常具有执行顺序的依赖性约束,SFC1 执行顺序 VNF101→VNF102→VNF103→VNF104,(从左到右执行),SFC2 执行顺序 VNF201→VNF202→VNF203→VNF204(从左到右执行)。

SFC 映射是在 SFC 组建完成的基础上进行的,SFC 映射阶段主要的一个作用是根据 VNF 约束条件,寻找 VNF 在物理网络中所有可进行实例化服务的节点位置,为调度服务阶段做准备。文献[13]在映射阶段将 VNF 与物理节点进行一一对应,这样解的可行域受到了限制,不利于求该类问题的最优解。为了避免上述问题,本文将 VNF 映射节点的结果形成集合列表,松弛 VNF 执行调度节点的位置,以便 SFC 调度阶段 VNF 可以动态的将虚拟网络功能映射到合适的虚拟机进行实例化,以期优化网络功能调度的传输时延以及在虚拟机实例化时延,得出更优的结果。

SFC 映射集合实例如图 1 所示,图中 6 个物理节点相互连通,VNF 与 VM 之间的虚线代表 VNF 可以在该 VM 上执行实例化,虚线上括号内数据分别代表 VNF 在 VM 上传输时延和执行功能所需的时间。VNF101 虚线箭头分别指向了 VM1 和 VM4,虚线上数据分别为 (2, 2)、(3, 3),则表示 VNF101 可以在 VM1 或者 VM4 上执行调度,VNF101 在 VM1 上执行调度服务两虚拟节点之间带宽传输时延为 2,在虚拟机上执行实例化时延为 2,VNF101 在 VM4 上执行调度服务两虚拟节点之间带宽传输时延为 3,虚拟机上执行的时延为 3。

SFC 调度服务主要功能是采用一些算法将 VNF 动态映射至 VM 的同时优化 VNF 调度顺序,以期链路带宽传输时延和虚拟机执行时延整体最小化。根据映射阶段 VNF 与 VM 的映射集合,采用算法将 VNF 映射到虚拟机进行调度服务,结果如图 2 所示,VNF202 被分配到了 VM5 上进行调度,图中蓝色方块代表 VNF 到节点的链路传输时延,米黄

色方块中 2-2 表示 VNF202 在 VM 上执行实例化所产生的时延,例如 VNF202 在 VM5 执行调度,链路传输时延为 4,实例化时延为 6,整体时延为 10。

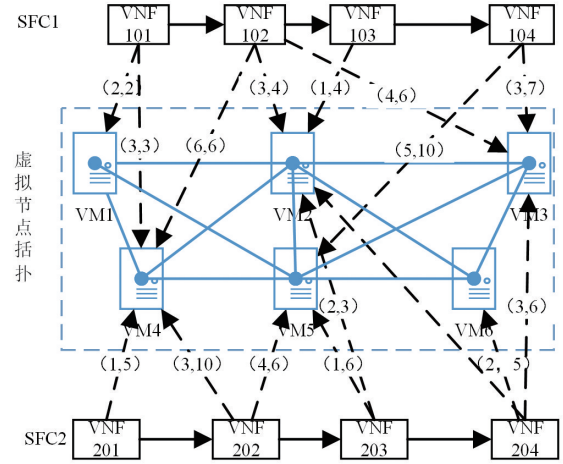


图 1 SFC 映射集合实例

Fig. 1 SFC Mapping set instance

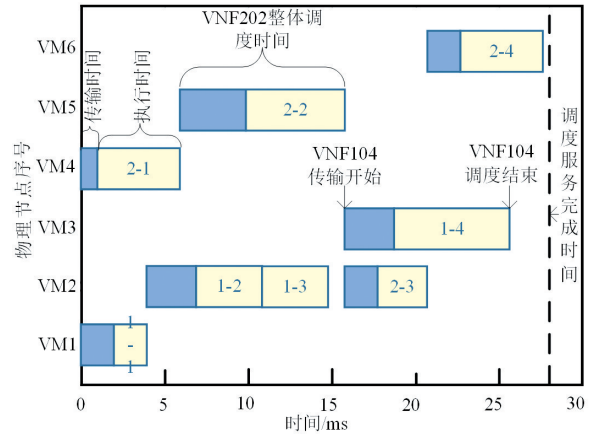


图 2 VNF 实例调度结果

Fig. 2 VNF Instance scheduling result

1.2 网络模型

虚拟网络功能调度问题一般可以被描述为： n 条服务功能链 $\{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ 在虚拟机 $k = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ 上进行调度；每个 SFC 上有多个不同的虚拟网络功能，VNF 需按照一定的顺序进行调度。每个 VNF 可以与虚拟机形成一对多的映射集合，每个 VNF 只能映射到一个虚拟机进行实例化，每个虚拟机在同一时刻只能执行一个 VNF 功能。VNF 调度模型具体约束如下，模型参数说明如表 1 所示。

每一条服务链上的虚拟网络功能具有先后顺序，同一条服务链上的一个虚拟网络功能结束后才能开始下一个虚拟网络功能

$$\begin{aligned} t_{s,(i,j)} + x_{i,j,k}(t_{l,(i,j,k)} + t_{p,(i,j,k)}) &\leq \\ t_{e,(i,j)} &\leq t_{s,(i,j+1)} \end{aligned} \quad (1)$$

每个虚拟机在同一时间只能执行一个虚拟网络功能

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^l x_{i,j,k} = 1 \quad (2)$$

表1 模型参数说明

Table 1 Model parameter Description

符号	物理意义
n	服务功能链条数 $n \in D$
m	虚拟机个数 $m \in D$
i	服务功能链索引, $i = (1, 2, 3, \dots, n)$
k	虚拟机设备索引, $k = (1, 2, 3, \dots, m)$
j	虚拟网络功能索引, $j = (1, 2, \dots, l), l \in D$
$O_{i,j}$	服务功能链 i 上的第 j 虚拟网络功能
$t_{s,(i,j)}$	虚拟网络功能 $O_{i,j}$ 的调度开始时间
$t_{e,(i,j)}$	虚拟网络功能 $O_{i,j}$ 的调度结束时间
$t_{l,(i,j,k)}$	虚拟网络功能 $O_{i,j}$ 链路传输时间
$t_{p,(i,j,k)}$	虚拟网络功能 $O_{i,j}$ 在虚拟机 k 执行时间
$t_{\min}$	整体调度服务最小完成时间
$x_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & \text{虚拟网络功能 } O_{i,j} \text{ 在虚拟机 } k \text{ 上执行为 } 1, \\ 0 & \text{不执行为 } 0 \end{cases}$	

每个虚拟网络功能只能选择一个映射节点执行调度

$$x_{i,j,k} x_{i,j,k+1} (t_{e,(i,j,k)} - t_{s,(i,j,k+1)}) \cdot (t_{s,(i,j,k)} - t_{e,(i,j,k+1)}) \geq 0 \quad (3)$$

低时延虚拟网络功能映射及调度问题是一个组合优化问题,属于 NP 难范畴^[21],其目标是通过服务功能链上所有的 VNF 动态选择一个合适的映射

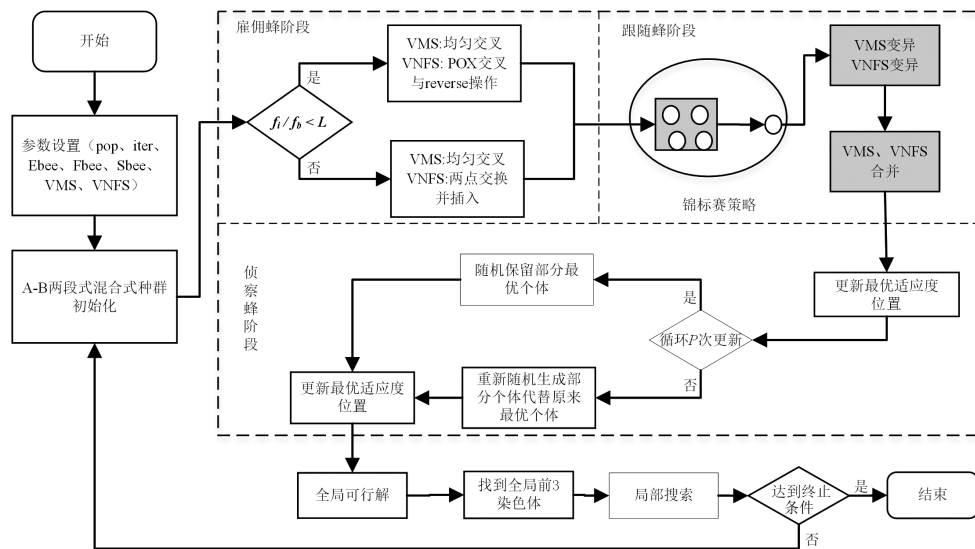
节点后进行调度服务,降低链路的传输时延和在虚拟机上的执行时延,提高网络服务的效率。时延是指多条服务功能链上虚拟网络功能映射及调度服务产生的传输时延和实例化完成的整体时延^[22],调度服务完成时间最小化

$$t_{\min} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l x_{i,j,k} (t_{l,(i,j,k)} + t_{p,(i,j,k)}) \quad (4)$$

2 GABL 映射及调度算法

根据上述问题描述与网络模型,低时延虚拟网络功能映射及调度问题可以看作柔性车间调度的另一种形式,属于 NP 难问题^[16-17],针对该多项式 NP 难题常常采用传统的单一启发式算法进行优化求解,然而该问题的动态化进一步加剧了该问题的复杂性,采用传统的方法难于求得最优解。为了更加有效地对虚拟网络功能映射节点选择问题及调度顺序问题求解,本文联合多种方法设计了一种混合启发式算法 GABL,该算法平衡全局搜索与局部搜索的能力,能够提高解的质量,可以得到更优的方案。

GABL 算法将两段式初始化技术、人工蜂群算法、交叉遗传的方式以及局部搜索算法进行融合设计求解。两段式初始化技术提高了初始解的质量,交叉变异的遗传因子运用到具有锦标赛策略的人工蜂群算法中将有效基因进行了保留,局部搜索算法加速寻找优秀染色体中的基因因子,减少了求解时间,GABL 算法整体具有全局收敛性和求解的高效性。GABL 算法的流程如图 3 所示。



f_i/f_b —蜂群相似度; L —蜂群分群比例; P —侦察蜂蜂群循环迭代次数。

图3 GABL 算法流程

Fig. 3 GABL Algorithm flow framework

2.1 初始化阶段

在初始化求解阶段,一些学者常常采用虚拟机编码或者虚拟网络功能编码的集成编码方式,虽然这种编码方式易于表达,但是基因位置中信息过多,在进行交叉变异时极易产生非法解,影响整体解的正确性。GABL 算法采用 A-B 型两段式混合编码。该编码使用 A-B 两部分染色体的分段编码,将虚拟机信息和虚拟网络功能信息分开,分成同等长度为 T 的两部分染色体,A 代表虚拟机选择部分 VMS,B 代表虚拟网络功能部分 VNFS。

GABL 算法初始化方法 A 部分考虑到虚拟机选择中的负载问题,使得各个虚拟机尽量保持平衡,采用了 GL(global selection, local selection)混合编码的方式,在充分提高虚拟机器使用率的前提下又使初始种群分散于整个空间,有利于提高解的全局化和解的质量。

GABL 算法初始化方法 B 部分考虑到虚拟网络功能选取的全面性,采用了 SPT 排序方法和随机序列方法的混合方式,通过染色体选取的随机性与加工时间最短最优先的方法来提升 B 部分全局最优解选取的全面性。两段式混合初始化方法适用性广,解的质量高。A-B 两段式初始化方法如图 4 所示。

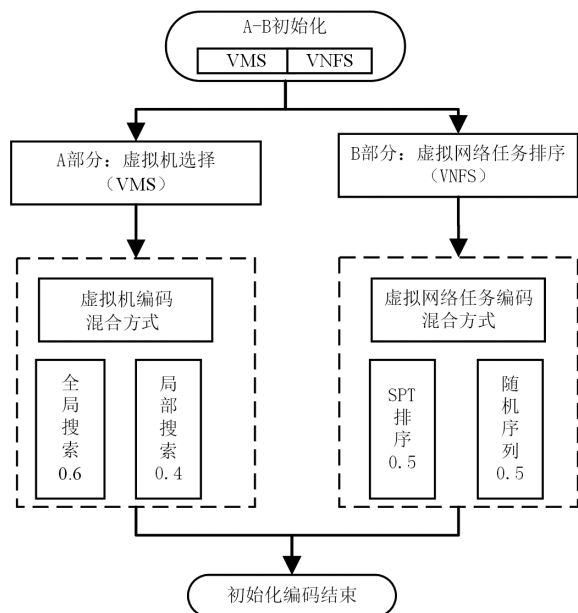


图 4 A-B 初始化方法流程

Fig. 4 A-B Initialization method flow

2.2 改进的人工蜂群算法

人工蜂群算法(ABC)是由雇佣蜂、跟随蜂、侦查蜂 3 个部分组成^[23]。整体问题为蜜蜂追逐的蜜

源,被选取的概率随着适应度的增高而变大,适应度逐步选取到最优,问题的解也变的最优。

为了避免基础人工蜂群算法陷入局部最优,GABL 算法在人工蜂群算法阶段中整体使用交叉变异的遗传因子保持了种群多样性,在跟随蜂阶段采用锦标赛策略代替轮盘赌的方法避免了局部选取。

2.2.1 雇佣蜂阶段

雇佣蜂阶段是人工蜂群的开始阶段也是 GABL 算法的主要阶段之一,将雇佣蜂的数量设定为种群数量。为了获取优质的基因,将混合初始化的染色体进行交叉操作后更新。一般情况下,算法进行搜索操作时,较好适应度的种群通过缩小搜索范围提高局部搜索的能力,较差适应度的种群通过扩大搜索范围并保留父代优良特性提高解的质量,为此本文将种群划分为两部分,相似度设定为当前个体适应度 f_i /适应度列表中的最优适应度个体 f_b ,雇佣蜂阶段执行的步骤如下。

步骤 1 当相似度大于定义的分群比例 L

$$\frac{f_i}{f_b} \geq L \quad (5)$$

即被划分为较优适应度群体,根据虚拟机编码每个基因先后顺序不变的特点,VMS 部分进行均匀交叉,而虚拟机部分为提高局部搜索的能力对 VNFS 部分进行两点交换,如图 5 所示。

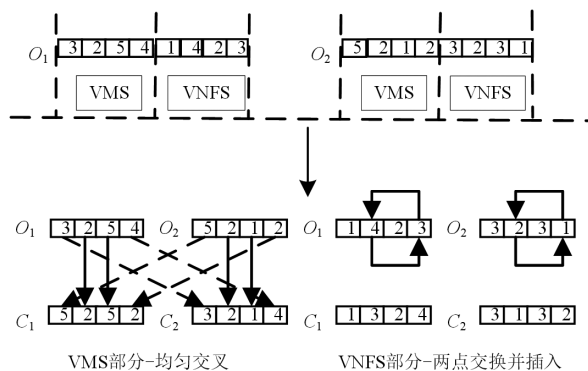


图 5 VMS 均匀交叉-VNFS 两点交换示意

Fig. 5 VMS Evenly interlaced-VNFS Two-point switching scheme

(1) VMS 部分采用均匀交叉的方式,首先将 VMS 部分中父代染色体 O_1 和 O_2 中相应位置的基因复制到子代染色体 VMS 部分的 C_1 和 C_2 中,并将其位置和顺序保持不变^[24],其次是将 O_1 和 O_2 余下基因依次复制到虚拟机部分 C_2 和 C_1 中,保持其位置和顺序实现均匀交叉。

(2) VNFS 采用两点交换的方式,在 VNFS 部分将父代中的染色体 O_1 和 O_2 分别任取了两个点进行交换,将其余基因依次复制到 C_1 和 C_2 中。

步骤 2 当相似度小于定义的分群比例 L

$$\frac{f_i}{f_b} < L \quad (6)$$

即被划分为低适应度群体,根据虚拟机编码每个基因的先后顺序不变的特点,VMS 部分进行均匀交叉,而虚拟机部分为保留父代的优良特性,VNFS 部分执行 PoX 交叉与 Reverse 反转操作,如图 6 所示。

(1) PoX 交叉。首先将虚拟网络功能集合划分为 w_1 和 w_2 功能集合,然后将父代染色体 O_1 和 O_2 中的 w_1/w_2 复制到 C_1/C_2 ,依次保持其位置和顺序不变^[25];其次将 O_1 和 O_2 中不包含在 w_1/w_2 中的功能复制到 C_2/C_1 ,保持他们的顺序。

(2) Reverse 反转操作。反转操作是将第一个位置的基因设为 b_1 ,隔开两个位置的基因设为 b_2 ,如果 $b_2 > b_1 + 1$ 则 $b_1 \rightarrow b_2$ 进行逆序排列,这样依次对基因进行操作。

雇佣蜂在更新染色体后,经过虚拟机部分和虚拟网络功能部分的交叉变异操作后得到新的适应度,将适应度存储在适应度列表中为下一阶段做准备。

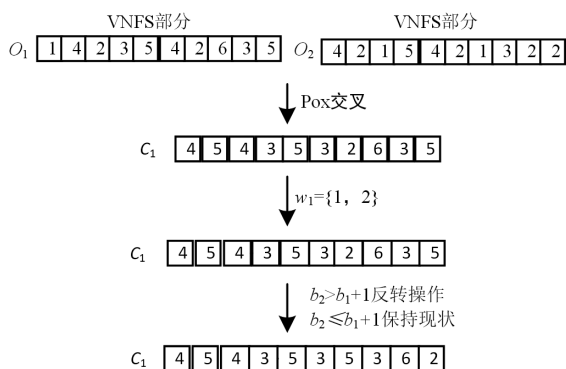


图 6 POX 交叉与 Reverse 操作示意

Fig. 6 POX Crosses with Reverse operation scheme

2.2.2 跟随蜂阶段

在雇佣蜂引领传递信息之后,跟随蜂在适应度列表中搜索最优的适应度,在此阶段一般采用轮盘赌的搜索策略,而轮盘赌策略是根据概率选取最优适应度,并不是每个个体都能被选中。锦标赛策略是从个体中随机选取数量为 n 的个体,最优的个体将被保留进入下一代,该策略选取个体具有全局性。在跟随蜂阶段使用锦标赛选择的策略,锦标赛策略

选择最优适应度的选取方法是从初始适应度列表 f_{list} 中随机选取 n 个体得到 f_n ,再从 f_n 中选取最优的适应度得到 f_{best} ,其中 n 的取值越小,算法的效率越高,在本文,为了其高效性,采用常见的二元锦标赛策略即 $n=2$ 。跟随蜂阶段操作步骤如下。

步骤 1 对虚拟网络功能部分采用 PoX 基因交叉、对虚拟机部分采用随机选择点进行变异;根据该基因点可加工机器的数量;如果只有一台可用的虚拟机,就选择这台可用的虚拟机;如果有其他可加工的虚拟机,将可选择的虚拟机形成列表,去掉正在被别的虚拟网络功能所占用的虚拟机,再随机选取剩余可加工的虚拟机顺序号。

步骤 2 将 VMS、VNFS 两部分合并形成一条基因链,最后跟随蜂保存好的最优适应度即当前可行解。

2.2.3 侦察蜂阶段

首先判断经过 p 次迭代后适应度是否被更新到最优适应度,如果适应度更新到最优适应度,则随机保留部分最优个体,否则侦察蜂通过随机搜索产生的个体代替种群中相应的适应度个体。主要步骤如下。

步骤 1 设置迭代最大值 p ,通过迭代保存当前可行最优解 f_{best} 到列表中。

步骤 2 当 f_{best} 循环达到 p 次后发生改变,保留当前的最优适应度并查看具有多少个。如果存在多个,则随机保留部分该种群适应度最优的个体。

步骤 3 如果经过 p 次没有被更新,则随机生成个体代替原始个体。

步骤 4 将最优适应度保存到适应度列表。

2.3 局部搜索

在改进的人工蜂群搜索下通过适应度列表找到所有全局的最优适应度列表;根据染色体的排名,将前 3 名的所有染色体通过局部搜索算法在最优解附近进行搜索,采用移动工序的方案加快求最优解的速度,局部求解如图 7 所示。局部搜索求最优解表达式为

$$z(s^*) \leq z(s), Z = z(s), \forall s \in N(s^*) \cap Z \quad (7)$$

式中: z 为目标函数; Z 为解的可行域; s^* 表示在 z 、 Z 上的局部最优解。

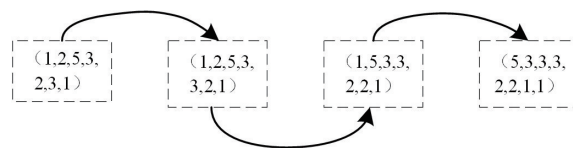


图 7 局部求解示意

Fig. 7 Partial solution scheme

3 模拟实验与数据分析

为测试验证 GABL 算法求解虚拟网络功能映射及调度的高效性、稳定性,对文献[10]中的 Min-Min 遗传算法 (Min-Min GA)、文献[16]中的遗传禁忌算法 (GATS) 以及文献[23]中的改进人工蜂群算法 (BAABC) 在同一平台进行模拟实验对比,实验算法的种群规模均设定为 100,迭代次数设置为 50。本实验在 Windows10 系统、i5 处理器的运行环境下,使用 PyCharm 编译工具,Python3 语言进行模拟仿真。

在模拟实验中,本文采用了文献[16]的网络结构。首先设置服务功能链的最大值为 100 条,每条服务功能链上的不同虚拟网络功能最多设定为 10,最大物理虚拟节点数量为 20,每个虚拟网络功能可选实例化节点范围为 0~4。虚拟网络功能在链路传输中具有随机性,设定范围 1~10 ms 的随机时延,网络节点采用全联通的方式,为方便查看该部分实验命名为 VM20。其次为了进一步验证算法的高效性和稳定性,模拟物理资源紧张的情况,在 VM20 实验的基础上,减少物理虚拟机数量,设置物理虚拟机最大值为 10,其他参数不变,该部分实验命名为 VM10。

本实验是在安全可靠部署的基础上进行的,每条服务链上的虚拟网络功能均可全部完成调度服务。在模拟实验环境中,首先设置了 4 条服务功能链,每条服务功能链上随机产生 3~5 个虚拟网络功能,虚拟网络功能映射在 6 个全联通的虚拟机物理网络中。

图 8~11 分别为 Min-Min GA、BAABC、GATS 以及 GABL 算法执行虚拟网络功能映射及调度控

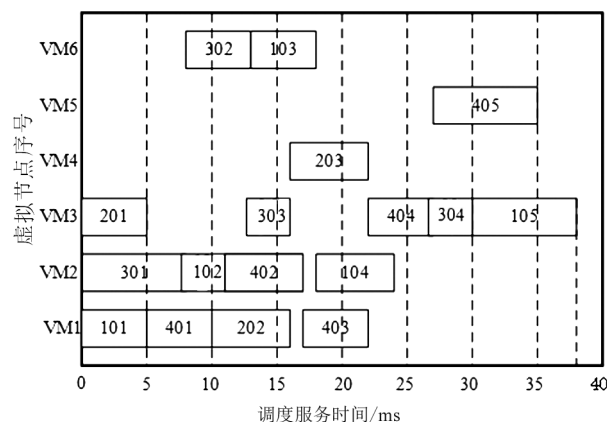


图 8 Min-Min GA 算法映射及调度服务可视化表达

Fig. 8 Visualization of Min-Min GA mapping and scheduling services

制面板输出图示,图中每个 VNF 模块产生的时间是该 VNF 映射至该 VM 上,在该 VM 上执行调度功能的链路传输时延和实例化的执行时延,即该 VNF 映射及调度服务的整体时延。

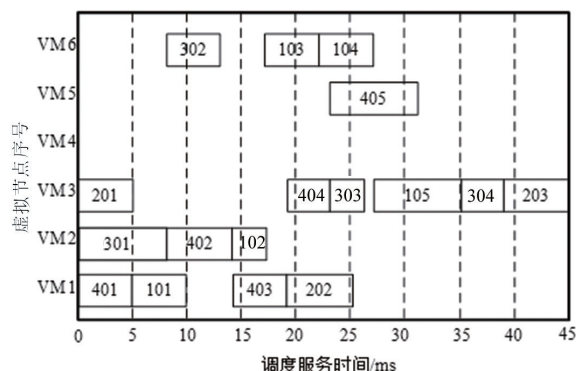


图 9 BAABC 算法映射及调度服务可视化表达

Fig. 9 Visualization of BAABC mapping and scheduling services

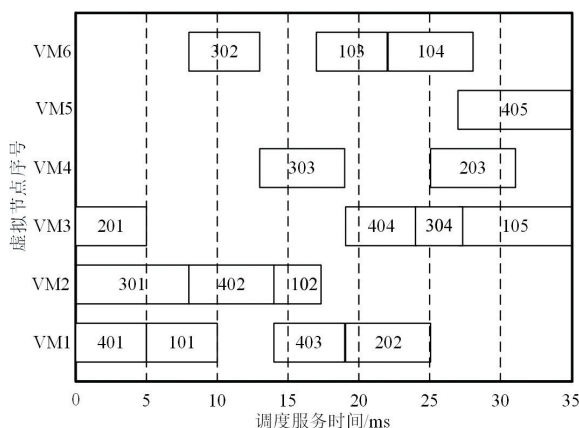


图 10 GATS 算法映射及调度服务可视化表达

Fig. 10 Visualization of GATS mapping and scheduling services

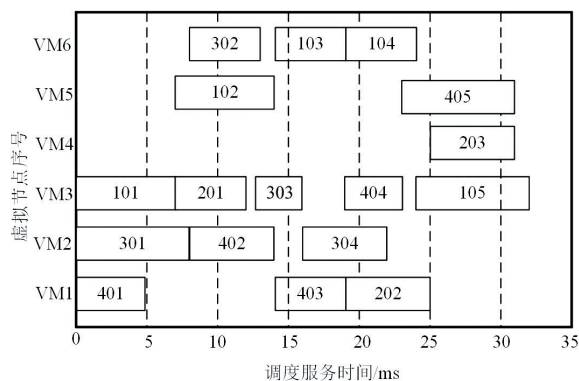


图 11 GABL 算法映射及调度服务可视化表达

Fig. 11 Visualization of GABL mapping and scheduling services

由图 8~11 可以看出,本文采用算法最低时延为 32 ms,BAABC 最低时延为 45 ms,Min-Min GA 算法最低时延为 38 ms,GATS 算法最低时延为 35 ms,GABL 算法比 BAABC 算法在时延上优化了 29%,表明了 GABL 算法在解决该映射及调度问题时更加高效。A-B 算法采用混合方法求初始解,提高了初始解的同时尽量将虚拟机负荷均衡,可知 BAABC 算法实验中没有 VNF 映射到 VM4 执行实例化服务,浪费了虚拟机资源,Min-Min GA 算法中 VM4、VM5、VM6 执行虚拟网络功能数量也偏少,浪费了虚拟机资源,而 GATS 算法虽然在机器负荷方面也较均衡,但在本实验映射及调度服务时间上仍与本文算法有 9.3% 的差距。GABL 算法在实现高效映射及调度的同时,较均衡的使用虚拟机,表明 GABL 两段式初始化使得虚拟机负荷均衡。但是,由于多方法的融合使得算法的复杂度升高,由表 2 可以看出,GABL 算法服务时间最短,调度结果最优,因多方法融合提升了复杂度,CPU 执行的时间较长。

表 2 不同算法映射及调度服务时间

Table 2 Different algorithms mapping and schedule service times

算法	服务时间/ms	CPU 执行时间/s
Min-Min GA	38	1.6
BAABC	45	2.2
GATS	35	3.3
GABL	32	4.6

图 12 为 4 种算法在实验中的迭代过程,可知 BAABC 算法的初始解最差,GATS 算法比 Min-

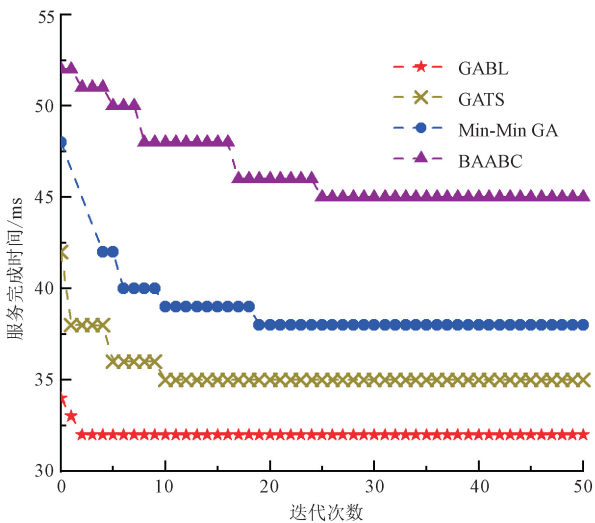


图 12 4 种算法的收敛过程比较

Fig. 12 Comparison of convergence process of four algorithms

Min GA、BAABC 算法初始解的质量高,但 GABL 算法在该问题上初始解接近最优解,可以表明两段式初始化的质量高,GABL 算法以最少的迭代次数进行快速的收敛,表明局部算法加快了收敛速度,GABL 映射及调度服务完成时间最短为 37,表明 GABL 在求解该问题整体具有高效性。GABL 算法与 Min-Min GA、BAABC、GATS 算法相比具有初始解的质量高、收敛速度快等特点。

VM20 实验结果如图 13 所示,VM20 采用 100 条服务功能链在 20 个虚拟机上进行映射及调度实验,横坐标是服务功能链安全到达完成服务的条数,纵坐标代表完成服务所需的时间。10 条服务功能链执行映射及调度功能时,数据量较小,整体求解的复杂度较低,4 个算法调度服务完成时间差距虽然并不明显,但仍旧可以看出 GABL 算法在该映射及调度服务上完成的时间最短。随着服务功能的增多,问题求解更加的复杂,4 个算法的差异逐步明显,而 GABL 在服务功能从 10 到 100 条的每个阶段都能保持时间最短,其完成时间比 BAABC 提高了 35%,GABL 在求解该问题时展现了其高效低时延以及稳定性。

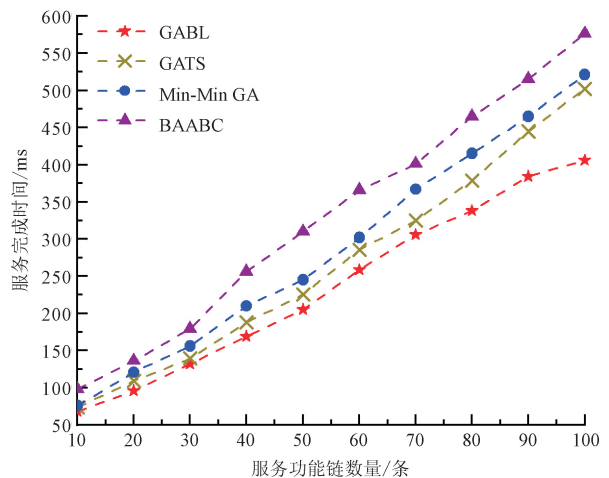


图 13 VM20 不同服务功能链请求强度下 4 种算法的服务完成时间比较

Fig. 13 VM20 Comparison of service completion time of four algorithms under different service function chain request intensities

VM10 实验结果如图 14 所示,VM10 采用了 100 条服务功能链在 10 个虚拟机上,模拟物理资源紧张的情况下进行功能调度服务实验,在物理资源紧张有限的情况下,BAABC、Min-Min GA、GATS 算法随着服务功能链数量的不断增加,映射及调度

服务时间剧烈震荡,且所需时间较长,而 GABL 算法相较于其他 3 个算法,不仅服务功能链映射及调度服务所用时间最短,而且趋势较平稳。

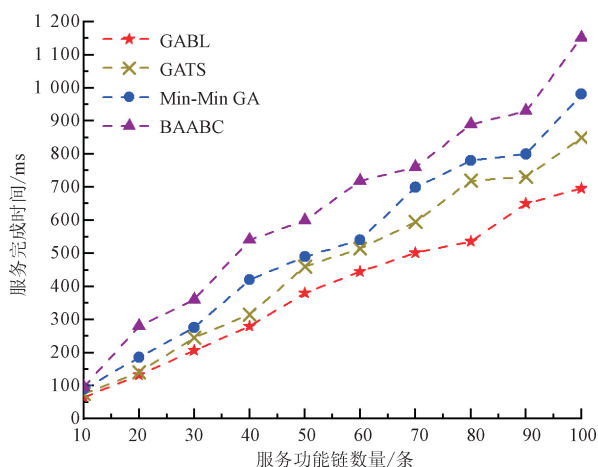


图 14 VM10 不同服务功能链请求强度下 4 种算法的服务完成时间比较

Fig. 14 VM10 Comparison of service completion time of four algorithms under different service function chain request intensities

综上所述,通过两种不同网络规模下的模拟实验,验证了本文所提的算法具有良好的通用性。GABL 算法相比其他 3 个算法,服务功能链映射及调度完成时间最短,且随着服务功能链数量的不断增加,调度服务时间趋势较为平稳。

4 结 论

针对传统虚拟网络功能映射及调度服务时间长,不稳定的问题,提出一种以最小化虚拟网络功能映射及调度服务整体完成时间为目标的 GABL 算法。GABL 算法运用两段式混合初始化方法,可以得到高质量的初始解;将 VNF 映射到合适的虚拟机上的同时,优化了虚拟网络功能调度顺序;将全局机制、交叉变异操作引入到具有锦标赛机制的人工蜂群算法中,增加了人工蜂群全局最优解的搜索能力;最后通过局部搜索提高了算法的收敛速度。实验结果表明,相较于其他算法,本文 GABL 算法展示出高效性和稳定性,能够有效降低映射及调度服务时间,为解决低时延虚拟网络功能映射及调度问题提供了一种新的思路。

参考文献:

[1] LI Biyi, CHENG Bo, LIU Xuan, et al. Joint resource optimization and delay-aware virtual network function

migration in data center networks [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18 (3): 2960-2974.

[2] HAKIRI A, GOKHALE A, BERTHOUS P, et al. Software-defined networking: challenges and research opportunities for future internet [J]. Computer Networks, 2014, 75: 453-471.

[3] 王进文, 张晓丽, 李琦, 等. 网络功能虚拟化技术研究进展 [J]. 计算机学报, 2019, 42(2): 415-436.

WANG Jinwen, ZHANG Xiaoli, LI Qi, et al. Network function virtualization technology: a survey [J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(2): 415-436.

[4] JOSHI K, BENSON T. Network function virtualization [J]. IEEE Internet Computing, 2016, 20(6): 7-9.

[5] 孙士清, 彭建华, 游伟, 等. 5G 网络下资源感知的服务功能链协同构建和映射算法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(8): 140-148.

SUN Shiqing, PENG Jianhua, YOU Wei, et al. A co-ordinating composition and mapping algorithm for a service function chain with resource-aware [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(8): 140-148.

[6] ZHANG Dong, ZHENG Zhifan, LIN Xiang, et al. Dynamic backup sharing scheme of service function chains in NFV [J]. China Communications, 2022, 19 (5): 178-190.

[7] 王珂, 曲桦, 赵季红. 多域 SFC 部署中基于强化学习的多目标优化方法 [J]. 计算机科学, 2021, 48(12): 324-330.

WANG Ke, QU Hua, ZHAO Jihong. Multi-objective optimization method based on reinforcement learning in multi-domain SFC deployment [J]. Computer Science, 2021, 48(12): 324-330.

[8] 唐伦, 贺兰钦, 连沁怡, 等. 基于改进深度强化学习的虚拟网络功能部署优化算法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43(6): 1724-1732.

TANG Lun, HE Lanqin, LIAN Qinyi, et al. Virtual network function placement optimization algorithm based on improve deep reinforcement learning [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(6): 1724-1732.

[9] GIL HERRERA J, BOTERO J F. Resource allocation in NFV: a comprehensive survey [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13 (3): 518-532.

[10] 马景奕, 隋兵, 舒万能. 基于 Min-Min 遗传算法的网络任务调度方法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44

- (23): 102-104.
- MA Jingyi, SUI Bing, SHU Wanneng. Task scheduling based on Min-Min genetic algorithm in grid [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(23): 102-104.
- [11] RIERA J F, HESSELBACH X, ESCALONA E, et al. On the complex scheduling formulation of virtual network functions over optical networks [C]//2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [12] RIERA J F, ESCALONA E, BATALLÉ J, et al. Virtual network function scheduling: concept and challenges [C]//2014 International Conference on Smart Communications in Network Technologies. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [13] BECK M T, BOTERO J F. Coordinated allocation of service function chains [C]//2015 IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [14] ZHANG Qixia, XIAO Yikai, LIU Fangming, et al. Joint optimization of chain placement and request scheduling for network function virtualization [C]//2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 731-741.
- [15] 王琛, 游伟, 袁泉, 等. 一种基于多层编码遗传算法的虚拟网络功能调度方法 [J]. *信息工程大学学报*, 2018, 19(3): 275-281.
- WANG Chen, YOU Wei, YUAN Quan, et al. Virtualized network function scheduling method based on multi-layer encoding genetic algorithm [J]. *Journal of Information Engineering University*, 2018, 19(3): 275-281.
- [16] 王琛, 汤红波, 游伟, 等. 一种 5G 网络低时延资源调度算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(4): 117-124.
- WANG Chen, TANG Hongbo, YOU Wei, et al. A resource scheduling algorithm with low latency for 5G networks based on effective hybrid genetic algorithm and Tabu search [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(4): 117-124.
- [17] 黄睿, 张红旗. 安全服务链中虚拟网络功能分配与调度算法研究 [J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(3): 890-895.
- HUANG Rui, ZHANG Hongqi. Research on algorithm of VNF allocation and scheduling problems in security service chain [J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(3): 890-895.
- [18] 史久根, 张径, 徐皓, 等. 一种面向运营成本优化的虚拟网络功能部署和路由分配策略 [J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 973-979.
- SHI Jiugen, ZHANG Jing, XU Hao, et al. Joint optimization of virtualized network function placement and routing allocation for operational expenditure [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 973-979.
- [19] 祖家琛, 胡谷雨, 严佳洁, 等. 网络功能虚拟化下服务功能链的资源管理研究综述 [J]. *计算机研究与发展*, 2021, 58(1): 137-152.
- ZU Jiachen, HU Guyu, YAN Jiajie, et al. Resource management of service function chain in NFV enabled network: a survey [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2021, 58(1): 137-152.
- [20] YAO Hong, XIONG Muzhou, LI Hui, et al. Joint optimization of function mapping and preemptive scheduling for service chains in network function virtualization [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 108: 1112-1118.
- [21] KANG Rui, HE Fujun, SATO T, et al. Virtual network function allocation to maximize continuous available time of service function chains with availability schedule [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, 18(2): 1556-1570.
- [22] GIANNOULAKIS I, KAFETZAKIS E, XYLOURIS G, et al. On the applications of efficient NFV management towards 5G networking [C]//1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [23] 贺桂娇, 周树亮, 冯冬青. 求解高维复杂优化问题的改进人工蜂群算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(12): 126-132.
- HE Guijiao, ZHOU Shuliang, FENG Dongqing. Improved artificial bee algorithm for high dimensional complex optimization problems [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(12): 126-132.
- [24] 黄歆雨. 基于混合遗传算法的柔性作业车间动态调度问题研究 [D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [25] 季少梅. 柔性路径下基于混合粒子群算法的跨单元调度方法 [D]. 北京: 北京理工大学, 2011.

(编辑 赵炜 刘杨)