



专题：网络安全的智能化和高对抗性发展

一种域适配混合遗传算法及在 安全服务链编排中的验证

姚晓辉^{1,2}, 李青², 孙焜焜³

(1. 移动互联网系统与应用安全国家工程实验室, 上海 201315;

2. 中国电信股份有限公司研究院, 上海 200122;

3. 中国科学院信息工程研究所, 北京 100093)

摘要: 面对不断变化的网络需求, 用户对传统网络的要求也越来越高, 灵活性、扩展性、易用性等特征已成为现代网络的必备要素。提出了一种域适配混合遗传算法 (domain adaptive hybrid genetic algorithm, DAHGA), 可应用于云数据中心租户的安全服务链编排, 实现租户云安全服务与策略的自动加载与激活, 满足租户云安全“按需定制”需求。同时针对云安全服务链编排上各种提升 VNF 放置效率的算法进行了实验对比研究, 充分验证了本文算法的有效性, 为云业务无损安全服务链编排技术的实现提供了借鉴和参考。

关键词: 云安全; 安全域; 安全服务链; NFV; VNF; 遗传算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020144

A domain adaptive hybrid genetic algorithm and its verification in security service function chain orchestration

YAO Xiaohui^{1,2}, LI Qing², SUN Kunkun³

1. Mobile Internet System and Application Security National Engineering Laboratory, Shanghai 201315, China

2. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200122, China

3. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100093, China

Abstract: Faced with changeable network demands, users have increasingly higher requirements for traditional network. Features such as flexibility, scalability and ease of use have become essential elements of modern network. A domain adaptive hybrid genetic algorithm (DAHGA) was proposed, which could be applied to the security service chain arrangement of cloud data center tenants, to achieve automatic loading and activation of tenant cloud security services and policies, to meet tenant cloud security “customization on demand” requirements. And conducts experimental comparison research on the effective placement efficiency of each VNF on the cloud security service chain orchestration was carried out, which fully validated the proposed algorithm. Effectiveness provides a reference and reference for the realization of cloud business non-destructive security service chain orchestration technology.

Key words: cloud security, security domain, security service chain, NFV, VNF, genetic algorithm

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-04-20

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFB0801801)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFB0801801)

1 引言

目前,业界云数据中心安全防护能力重点部署在网络边界,为云数据中心各租户提供统一的安全策略与安全保障能力。随着“企业上云、IT上云、网络上云”,用户规模爆炸式发展,在运营商亿级用户量的云服务环境下,各租户的云业务、云网络安全需求差异大,安全资源动态调度与跨域管理复杂,租户个性化云安全防护需求与传统网络边界单一的云安全防护策略形成鲜明的矛盾。为此,期待提供一种面向租户的、易于理解和用户使用的个性化云网安全需求定义方法及系统。

同时,为满足特定安全需求运营商需要使用一系列专用设备来提供所需安全服务,如防火墙、深度分组检测、加密等。使用指定服务商提供的特定硬件平台提供的网络服务灵活程度较低,无法满足较高的可扩展性要求。这些特定硬件平台的设备必须使用专用的设备管理方案,运营成本及高耦合度都变得难以接受。为解决上述问题,满足用户对计算能力与网络部署的新需求,云计算与网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)技术得到空前的发展。云计算在大量计算设备构成的资源池中部署服务与任务,使用户可以根据所需获取计算能力、存储空间、平台环境以及各类软件服务。用户向云计算请求的各种资源与服务来自于云,而非实体物理设备。而 NFV 采用通用性硬件承载不同功能的软件为用户提供各种服务,能更加灵活地进行资源配置管理,实现软硬件的解耦。NFV 不仅能灵活地部署网络功能,及时快速地提供网络服务,还能配合软件定义网络(software defined network, SDN)实现集中控制与细粒度的流量管理,提供了高效节能的网络部署方案。

通常用户的服务请求需要经过多个服务功能

节点,流量按照一定顺序被服务功能节点进行相应处理。在网络功能虚拟化技术中,各种服务功能节点被称为虚拟网络功能(virtual network function, VNF)。VNF 是特定网络功能在虚拟资源上的软件实现,一个 VNF 可能在一个虚拟机上具体实现,也可能由多个虚拟机共同构成。从一个节点向另一个节点通信,之间需要经过若干个 VNF 的处理,若干个 VNF 有序组合形成的虚拟链路称为服务功能链(service function chaining, SFC)。实际场景中, SFC 能有效实现业务流量按实际需求有序经过不同网络功能处理。

服务功能链上的 VNF 组件如何放置到具体的底层物理网络是一个不可回避的重要问题。需要结合底层物理网络的具体情况和用户对服务功能链的资源需求,并在保证网络开销尽可能优化的情况下,对 VNF 进行有效放置。本文主要提出一种针对安全服务链编排系统的域适配混合遗传算法(domain adaptive hybrid genetic algorithm, DAHGA),可提升云安全服务链编排上各 VNF 的有效放置效率,并进行了多种算法的实验对比研究。

2 实现安全服务链编排的关键技术

实现安全服务链编排的关键技术主要包括:安全服务链拓扑描述与解析、物理拓扑信息获取与处理、云环境下安全服务链编排、安全服务功能链创建部署等关键技术。

- 安全服务链拓扑描述与解析技术,主要用于解决资源编排模块与 Web 门户模块对接时,对用户提出的云环境下安全服务链的意图做出精确描绘。
- 物理拓扑信息获取与处理技术,主要解决在系统收集云平台底层物理拓扑详细信息时,为之后使用 VNF 放置算法进行服务功能链的映射编排提供必要数据支持,包括安全服务链请求数据和物理拓扑详细信息。



- 云环境下安全服务链编排技术，主要解决资源分配管理问题，运用 VNF 放置算法对服务功能链进行映射编排。
- 安全服务功能链创建部署技术，主要解决在下层 OpenStack 云管理平台上实施安全服务链的自动化部署。

其中，云环境下安全服务链编排技术是核心。本文介绍了服务链映射编排过程中使用的 VNF 放置算法基于遗传算法进行相关改进，接下来会进行初始化种群、计算个体适应度、选择、交叉、变异等关键步骤。逻辑安全服务功能链拓扑示例如图 1 所示，安全服务链映射编排模块流程如图 2 所示。

3 域适配混合遗传算法研究及对比试验

在实现安全服务链创建过程中，本文提出了算法 DAHGA，该算法针对云环境下服务功能链编排系统中服务链两端是节点集合而非传统单一

节点的场景，对服务功能链上各 VNF 进行有效放置，并进行对比实验。实验结果表明，较未改进的遗传算法，DAHGA 可以快速提高遗传后代质量，加快收敛速度，有效减少总带宽消耗(total bandwidth consumption, TBC)，并提高请求成功率。

3.1 算法说明

DAHGA 在经典的启发式算法遗传算法^[16]的基础上进行了以下改进：

- 对服务功能链两端是节点集合的场景进行适配；
- 优化初始化种群的产生，采取选举策略快速提高个体质量；
- 使用自适应变异算子，防止收敛时间过长。

用户依据自身需求所描述的服务功能链是虚拟拓扑，最终需要借助 OpenStack 云平台将其映射到底层物理网络中。需要结合底层物理网络的具体情况和用户对服务功能链的需求描述，并保

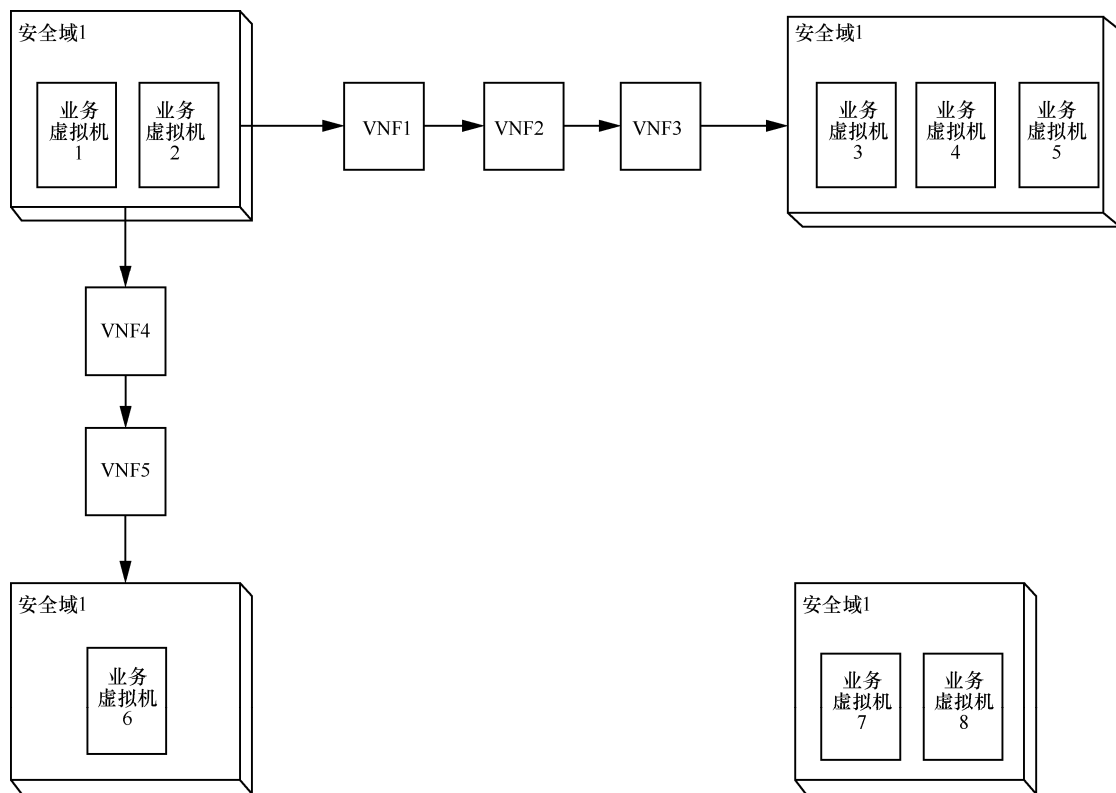


图 1 逻辑安全服务功能链拓扑示例

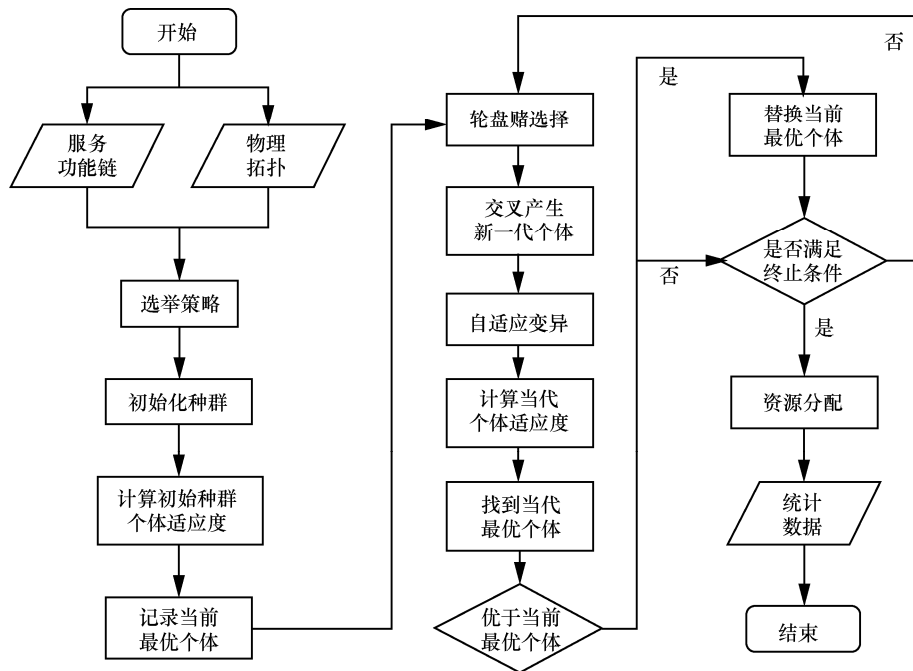


图2 安全服务链映射编排模块流程

证网络开销尽可能优化的情况下,对 VNF 进行有效放置。VNF 放置算法可以针对不同的优化目标,如减少节点资源与链路资源开销、保证负载均衡、提高请求成功率、减少能源消耗等,从而实现服务功能链的映射。安全服务链两端是节点集合而非传统的单一节点,需要对于这种特定场景进行服务功能链的 VNF 放置。该场景下服务功能链上

VNF 放置的示例如图 3 所示。

3.2 公式化描述

VNF 放置算法的目标是最小化总带宽消耗。

式 (1) 体现了最小化总带宽消耗的目标:

$$\min \sum_{l_i \in L} u(l_i) \quad (1)$$

其中, L 是物理链路集合, l_i 是某段物理链路, $u(l_i)$

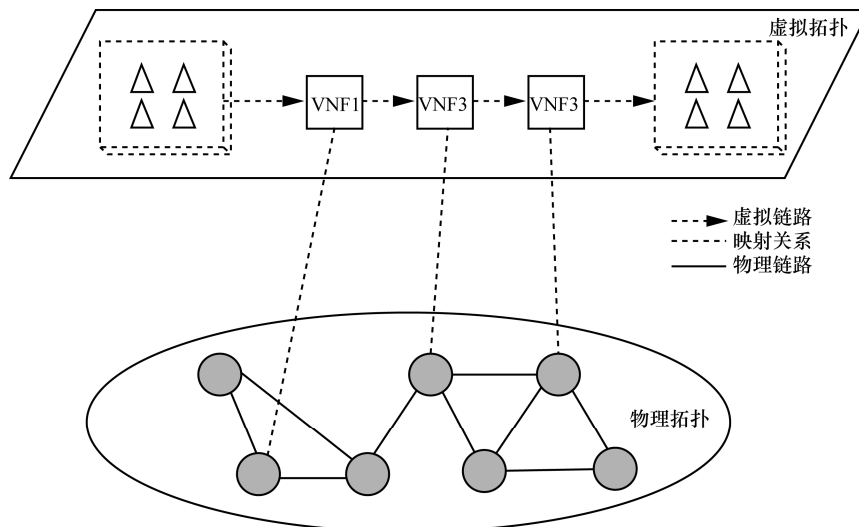


图3 服务功能链两端是节点集合场景的 VNF 放置示例



是这段物理链路上的带宽消耗量。在 VNF 放置过程中, 需要考虑各类约束条件: 服务功能链上各 VNF 所需的虚拟 CPU、内存、磁盘请求量必须小于或等于其所放置物理节点的资源提供量; 服务功能链每段虚拟链路上的带宽资源请求量必须小于或等于其映射的物理链路的带宽提供量; 一个 VNF 只能放置在一个物理节点上, 而每个物理节点在资源足够的情况下可以放置多个 VNF; 每段虚拟链路只能映射一段确定的物理路径。只有符合所有约束条件的 VNF 放置方案才是有效的。下面将公式化表述 VNF 放置过程中的各类约束条件。

3.2.1 节点约束

节点约束是 VNF 放置过程中需要遵循的约束之一, 它保证了服务功能链上各 VNF 所需的虚拟 CPU、内存、磁盘请求量必须小于或等于其所放置物理节点的资源提供量。与节点约束相关的计算式如式 (2) 和式 (3) 所示:

$$\forall n_i \in N, \forall r \in R \sum_{m_j \in M_{n_i}} m_j^{d_r} \leq n_i^{f_r} \quad (2)$$

$$M_{n_i} = V_{n_i} + A_{n_i} \quad (3)$$

其中, N 是底层网络拓扑中物理节点集合, n_i 是某一物理节点。 M_{n_i} 是 n_i 物理节点上已放置的所有虚拟机实例集合, 由放置在该物理节点的服务功能链上各 VNF 集合 V_{n_i} 与服务功能链两端所有业务虚拟机组成的集合 A_n 构成。 m_j 是 n_i 物理节点上已放置的所有虚拟机实例集合中的一个单位元素。 R 是 VNF 请求的资源类型集合, r 是某一资源类型。 $m_j^{d_r}$ 是 m_j 对于 r 资源类型的请求量, 而 $n_i^{f_r}$ 是 n_i 对于 r 资源类型的提供量。

3.2.2 链路约束

VNF 放置问题中, 链路包含两类: 一类是服务功能链上相邻 VNF 之间构成的虚拟链路, 另一类是底层网络拓扑中的物理链路。链路约束是 VNF 放置过程中需要遵循的约束之一, 它保证了服务功能链每段虚拟链路上的带宽资源请求量小于或等于其映射的物理链路的带宽提供量。与链

路约束相关的计算式如式 (4) 和式 (5) 所示:

$$\forall l_i \in L: u(l_i) \leq S(l_i) \quad (4)$$

$$\forall l_i \in L: u(l_i) = \sum_{P \in C} \sum_{p_j \in P} x(w(p_j), l_i) p_j^b \quad (5)$$

其中, L 是物理链路集合, l_i 是某段物理链路。 $u(l_i)$ 是这段物理链路上的带宽消耗量, $S(l_i)$ 是这段物理链路上的带宽提供总量。对于任意一段物理链路, $u(l_i)$ 必须小于或等于 $S(l_i)$ 才能满足链路约束。 C 是需要映射的服务功能链请求集合, P 是该服务功能链请求集合中的某个服务功能链请求。 p_j 是这个请求中服务功能链上一段虚拟链路。 $w(p_j)$ 是 p_j 这段虚拟链路所映射的物理路径集合。 $x(w(p_j), l_i)$ 是一个布尔类型的值, 如果 l_i 这段物理链路包含在 $w(p_j)$ 所代表的物理路径集合中, 那么它的值为 1; 如果 $w(p_j)$ 物理路径集合中没有包含 l_i , 那么它的值取 0。 p_j^b 是 p_j 虚拟链路的带宽资源请求量。

3.2.3 映射约束

在 VNF 放置过程中映射约束也是需要遵循的约束之一。一个 VNF 只能放置在一个物理节点上, 而每个物理节点在资源足够的情况下可以放置多个 VNF。与节点映射约束相关的计算式如式 (6) 和式 (7) 所示:

$$\bigcup_{n_i \in N} V_{n_i} = V \quad (6)$$

$$V_{n_i} \cap V_{n_j} = \emptyset \quad (7)$$

其中, N 是物理节点集合, n_i 是某个物理节点。 V_{n_i} 是 n_i 物理节点上所放置的 VNF 集合。 V 是服务功能链请求中所有 VNF 的集合。全部物理节点上放置的 VNF 集合的并集需要等同于服务功能链请求中所有 VNF 的集合, 才能保证请求中所有的 VNF 均进行了放置。 V_{n_i} 是另一个物理节点 n_j 上放置的 VNF 集合, 它与 V_{n_i} 的交集需要是空集, 保证每个 VNF 只能放置在一个物理节点上。由以上计算式可以看出, VNF 放置问题属于 NP-hard 问题, 难

以在多项式时间内获取最优解，通常采用启发式算法解决此类问题。

3.3 算法实现

3.3.1 编码方案

域适配混合遗传算法的种群中的每个个体代表了一种 VNF 放置方案。每个个体由一条染色体上的全部基因组成，基因的个数取决于请求的服务功能链上 VNF 的总数，每个基因代表一个 VNF。

个体编码方案的一个示例如图 4 所示。其中，物理节点 Node0 上放置了 3 个 VNF：VNF1、VNF4、VNF5；物理节点 Node1 上放置了两个 VNF：VNF2、VNF6；物理节点 Node2 上放置了 3 个 VNF：VNF3、VNF7、VNF8。所以，个体的基因为 01200122，分别代表 VNF1~VNF8 所放置的物理节点的编号。

3.3.2 初始化种群优化

域适配混合遗传算法在初始化种群时，采用选举策略进行优化，快速提高个体质量，很大程度上避免不可行解对结果的影响，有效地减少遗传算法在取得最优解时种群的代数。根据服务功能链两端集合中业务虚拟机所在的位置，对网络拓扑中物理节点进行打分，离业务虚拟机越近的物理节点可以获得越高的分数，离业务虚拟机较远的物理节点获得较低的分数或不得分。之后根据物理节点的分数对物理节点进行排序，并划分为不同分数层次的集合中供个体初始化时挑选。种群中个体初始化时，有较大概率去分数层次高的集合中随机挑选初始值，有较小概率去分数层

次低的集合中随机挑选初始值。

初始化种群优化算法的输入是物理拓扑、服务功能链上各 VNF 以及链两端的业务虚拟机集合。算法的输出是生成个体组成的初代种群。首先，对服务功能链两端的所有业务虚拟机进行遍历，每个业务虚拟机和链上相邻 VNF 之间链路的带宽需求作为打分的基础值。对业务虚拟机所在的物理节点进行打分。然后，依次找到该物理节点的边缘层交换机、聚合层交换机的所有下行物理节点并对其进行打分。之后，根据所有物理节点的分数对物理节点进行降序排序。在随机初始化种群时，有较大概率选择分数较高的物理节点承载 VNF，有小概率会选择分数较低的物理节点。

3.3.3 适应度函数

域适配混合遗传算法中的适应度函数决定了种群中个体的适应度，为之后选择算子、变异算子对个体的操作提供数据基础。域适配混合遗传算法的目标是最小化总带宽消耗，所以适应度函数如式 (8) 所示：

$$\text{fitness}(x) = \begin{cases} T^{\max} / T(x), & x \text{ 为可行解} \\ T^{\max} / (T(x) + T^{\max}), & x \text{ 为不可行解} \end{cases} \quad (8)$$

其中， x 是种群中某个个体， $T(x)$ 是该个体所对应的 VNF 放置方案的总带宽消耗量， $T^{\max}$ 是总带宽消耗量的上限。当 x 满足前面提到的各类约束时，例如节点约束、链路约束、映射约束，则被认为是可行解；否则被视为不可行解。该适应度函数会对违反这些约束的不可行解进行惩罚，使这些

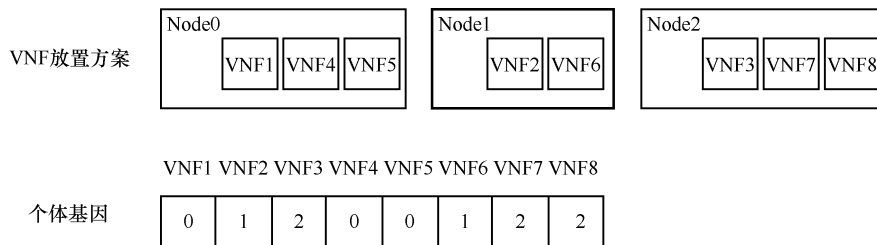


图4 个体编码方案示例



个体的适应度小于可行解个体的适应度。而且 VNF 放置方案的总带宽消耗量越小, 个体的适应度越高。

域适配混合遗传算法的选择算子采用轮盘赌选择, 为每代种群中个体选择需要配对的对象。个体适应度越高, 被选中的概率越大, 从而保证了遗传算法中种群个体向适应度高的方向发展。

由于安全服务功能链上 VNF 数量可能很多, 故域适配混合遗传算法的交叉算子采用均匀交叉。

3.4 实验评估

为了直观地说明 DAHGA 在 VNF 放置问题上的效果, 本文进行了几组对比实验。首先, 随机生成较大规模的物理拓扑以及大量服务功能链请求, 分别使用随机算法、遗传算法和本文算法处理生成的服务功能链映射请求, 对平均总带宽消耗、请求成功率、平均遗传代数等指标进行对比与评估; 并且考虑了服务功能链上 VNF 数量对遗传算法和本文算法 (DAHGA) 的平均遗传代数的影响。

3.4.1 参数设置

物理拓扑中共设置了 1 个核心层交换机、5 个聚合层交换机、40 个边缘层交换机以及 240 个主机节点。核心层交换机与聚合层交换机间的带宽提供量在 6 000~12 000 Mbit/s 随机产生; 聚合层交换机与边缘层交换机间的带宽提供量在 1 200~4 200 Mbit/s 间随机产生; 边缘层交换机与主机节点间的带宽提供量在 300~3 300 Mbit/s 随机产生。每个主机节点的各类虚拟资源提供量在 40~440 个单位中随机产生。

在请求次数与平均总带宽消耗、请求次数与请求成功率 2 个实验中, 设置服务功能链请求总数为 500 次。服务功能链上 VNF 数量在 1~13 随机产生。VNF 对各类资源的请求量在 1~10 个单位中随机产生。服务功能链两端业务虚拟机集合的元素个数在 1~5 随机产生, 其带宽消耗量在

1~50 Mbit/s 随机产生。在 VNF 数量与平均遗传代数实验中, 共进行 20 次测试, 服务功能链上 VNF 数量由 1 增至 20, 每次测试设置的服务功能链请求数为 20。

DAHGA 中每代种群的个体总数设置为 80。初始化种群采取的选举策略中, baseRatio1、baseRatio2、baseRatio3 均设置为 1。自适应变异算子中 fitRatic 设置为 2、increRatio 设置为 4、mutProLower 设置为 0.35、mutProBigger 设置为 0.8。种群繁衍的终止条件设置为最年轻的 80 代种群中没有产生更高适应度的个体。作为实验对比的遗传算法的相关参数设置与 DAHGA 相同。

3.4.2 平均总带宽消耗

在请求次数与平均总带宽消耗实验中, 输入相同的物理拓扑与服务功能链请求, 对比了随机算法 (random)、遗传算法 (GA) 和本文算法 (DAHGA) 的平均总带宽消耗, 这 3 种算法的平均总带宽消耗如图 5 所示。虽然随机算法实现简单、计算效率很高, 但它的平均总带宽消耗远远大于遗传算法和本文算法。随着服务功能链请求数量增多, 本文算法对于遗传算法在平均总带宽消耗指标上的提升率稳定在 13.1%左右。

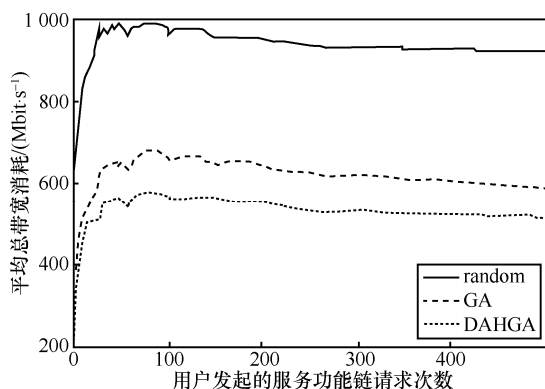


图 5 3 种算法的平均总带宽消耗

3.4.3 请求成功率

在请求次数与请求成功率实验中, 输入相同的物理拓扑与服务功能链请求, 对比了随机算法、遗传算法和本文算法的请求成功率。这 3 种算法

的请求成功率如图6所示。从图6中可以看出,随机算法的请求成功率远远低于遗传算法和本文算法。对比遗传算法和本文算法可以发现,随着服务功能链请求数量增多,在请求成功率指标上本文算法要高于遗传算法约16.3%,这是由于总带宽消耗上的开销减少可以在一定程度上提高用户的请求成功率。

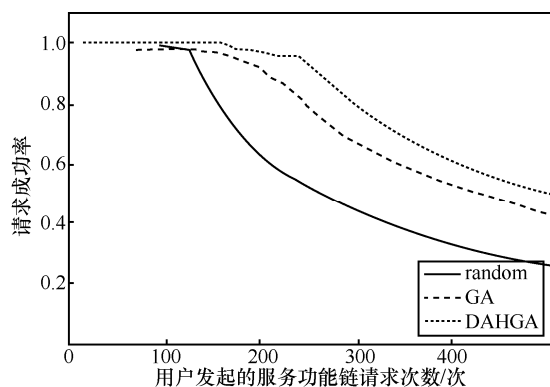


图6 3种算法的请求成功率

3.4.4 评估结论

本文算法针对云环境下服务功能链编排系统提出的服务功能链两端是节点集合而非传统单一节点的场景,在遗传算法的基础上进行场景适配,采取选举策略优化初始化种群的产生,使用自适应变异算子。由上述对比实验结果可知,较未改进的遗传算法,DAHGA可以有效减少总带宽消耗约13.1%,提高请求成功率约16.3%。

4 结束语

近年来,云服务规模呈现爆发式增长趋势。对运营商而言,随着“业务上云、IT上云、网络上云”工作的持续深入开展,租户对满足不同应用场景下的个性化云安全需求越来越迫切,但现有云安全服务提供能力,相对于计算、存储、网络等云资源提供能力的灵活性明显不足。

本文针对云环境下安全服务链两端是节点集合而非传统单一节点的场景,提出了域适配混合遗传算法(DAHGA),经验证,相比未改进的遗

传算法,其能显著提升安全服务功能链上各VNF进行放置的效率。未来将重点研究安全服务链上,基于动态安全风险感知和自适应防护策略实现机制,以进一步提升云服务安全链的稳健性和主动防御能力。

该算法在安全服务链编排系统中的应用,提供了一种灵活、直观的租户级云安全需求定制和实现手段,可广泛应用于运营商对外公有云服务以及内部业务云、IT云和网络云环境,可显著地改善现有云安全服务的效率和能力,提供运营商云服务用户体验,在垂直行业政企云、5G网络切片等领域有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 荆继武, 云晓春, 杨义先, 等. “网络空间安全重点专项”2017年度项目申报指南[Z]. 2017.
JING J W, YUN X C, YANG Y X, et al. 2017 Project application guide for “Key projects of Cyberspace Security” [Z]. 2017.
- [2] ETSI. ETSI group specification: network management and orchestration[Z]. 2014.
- [3] 汪来富, 沈军, 金华敏. 电信级云计算平台安全策略研究[J]. 电信科学, 2011, 27(10): 19-23.
WANG L F, SHEN J, JIN H M. Research on security policies of carrier-class cloud computing platform[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(10): 19-23.
- [4] 李小玲, 王怀民, 丁博, 等. 虚拟网络映射问题研究及其进展[J]. 软件学报, 2012, 23(11): 3009-3028.
LI X L, WANG H M, DING B, et al. Research and development of virtual network mapping problem[J]. Journal of Software, 2012, 23(11): 3009-3028.
- [5] 张晨. 基于OpenFlow的服务链研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
ZHANG C. Research and design of service chain based on OpenFlow[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [6] 邵维专, 吕光宏. 网络功能虚拟化资源配置及优化研究综述[J]. 计算机应用研究, 2018(2): 321-326.
SHAO W Z, LV G H. Survey on NFV resource allocation and optimization[J]. Application Research of Computers, 2018(2): 321-326.
- [7] DILLON T, WU C, CHANG E. Cloud computing: issues and challenges[C]//Proceedings of 2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2010.



- [8] HALPERN J, PIGNATARO C. Service function chaining (SFC) architecture: RFC 7665[S]. 2015.
- [9] LAGHRISSI A, TALEB T. A survey on the placement of virtual resources and virtual network functions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018(3): 1.
- [10] BECK M T, BOTERO J F. Scalable and coordinated allocation of service function chains[J]. Computer Communications, 2017, 102: 78-88.
- [11] LUIZELLI M C, BAYS L R, BURIOL L S, et al. Piecing together the nfv provisioning puzzle: efficient placement and chaining of virtual network functions[C]//Proceedings of IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [12] FAN J, GUAN C, ZHAO Y, et al. Availability-aware mapping of service function chains[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [13] ZHU A. Algorithms for assigning substrate network resources to virtual network components[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2007.
- [14] WU G, TANG M, TIAN Y C, et al. Energy-efficient virtual

machine placement in data centers by genetic algorithm[C]//Proceedings of International Conference on Neural Information Processing. Heidelberg: Springer, 2012: 315-323.

[作者简介]



姚晓辉（1979—），男，移动互联网系统与应用安全国家工程实验室、中国电信股份有限公司研究院高级工程师，主要从事企业信息系统规划、建设、实施及关键技术研究工作。

李青（1973—），男，中国电信股份有限公司研究院高级工程师，主要从事电信增值业务平台、云资源池集约化运营等技术研究及支撑工作。

孙焜焜（1995—），男，中国科学院信息工程研究所硕士生，主要研究方向为网络功能虚拟化、网络体系结构。