



一种 5G 网络切片的编排算法

周恒, 畅志贤, 杨武军, 郭娟

(西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 网络切片是基于 SDN/NFV 的 5G 网络架构实现按需组网的一种重要技术。通过分析 5G 主要场景, 提出了 SDN/NFV 架构下一种基于 GA-PSO 优化的网络切片编排算法。该算法利用粒子群算法能够快速收敛于全局最优解的特性, 设计网络切片性能的评价函数。并且利用遗传算法快速随机搜索的能力, 实现对网络切片的更新和优化, 利用粒子群追逐局部最优解与全局最优解得到最优网络切片。仿真实验结果表明, 该算法能够实现对多业务场景网络切片的个性化创建, 充分发挥 SDN 的集中控制方式的优点, 在降低网络能耗的同时, 提高网络资源利用率。

关键词: 5G; 网络切片; GA-PSO; 编排

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017218

An orchestration algorithm of 5G network slicing

ZHOU Heng, CHANG Zhixian, YANG Wujun, GUO Juan

School of Communications and Information Engineering,
Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract: The network slicing is an important technology for 5G to implement the on-demand networking based on SDN/NFV network architecture. According to the main scene of 5G, a network segmentation algorithm based on GA-PSO was proposed in SDN/NFV architecture. The merit of quick converging to the global optimal solution was used to design the evaluation function of the network slicing. Using the ability of the fast random search of genetic algorithm, the updating and optimization of the network slices could be realized by using the particle swarm to chase the local optimal solution and the global optimal solution. The simulation results show that the algorithm can realize the personalized creation of multi-service scene network slices, and give full play to the advantages of SDN centralized control mode. It can reduce the energy consumption of the network and improve the utilization rate of cyber source at the same time.

Key words: 5G, network slicing, genetic algorithm-particle swarm optimization, orchestration

收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-07-06

通讯作者: 畅志贤, changzhixian@xupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61501371); 陕西省科技厅工业攻关项目 (No.2014K09-14); 陕西省科技厅国际合作项目(No.2014KW02-02); 陕西省教育厅项目(No.16JK1685)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61501371), Industrial Research Project of Science and Technology Department of Shaanxi Province(No.2014K09-14), International Cooperation Project of Shaanxi Province Science and Technology Department(No.2014KW02-02), Education Department Foundation of Shaanxi Province (No.16JK1685)

1 引言

以用户为中心是未来 5G 网络架构设计的主要理念,这要求 5G 网络具有对各种业务场景进行按需组网和灵活部署的能力^[1],随着用户终端数量的增加、流量规模的增长和用户需求的多样化,当前的核心网 EPC (evolved packet core) 逐渐变得难以处理越来越多样化的服务要求。在 5G 时代,互联网服务对象和应用场景变得多样化,为每一个服务建设一个专用的物理网络,这既不现实也不高效,而网络切片 (network slicing, NS) 技术可以实现从 “one size fits all” 向 “one size per service” 的过渡,为现有网络提供了一个全新的解决方案^[2]。网络切片的先决条件是可以虚拟化各种不同的网络元素和 SDN 的集中控制^[3],随着网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV) 技术的成熟,实现了软硬件解耦、共享基础设施资源和按需调度^[4],同时软件定义网络 (software defined networking, SDN) 将数据平面与控制平面解耦合,简化了网络管理,灵活了路由的配置^[5],因此在 NFV 和 SDN 的网络架构下,对网络切片的编排和部署变得可行^[6]。

一个网络切片是 5G 网络中的一个端到端虚拟网络,是一组逻辑网络功能的集合。网络切片主要控制和操作服务层 (service layer) 和基础设施层 (infrastructure layer)。服务层描述系统的逻辑结构,包括网络的功能模块以及不同功能模块之间的连接方式,提供网络切片的定义、操作和部署方式的模板。基础设施层从物理层面描述维持一个网络切片运行所需要的网络元素和资源,包括计算资源和网络资源^[7]。

2 基于 NS 划分的路由模型

3GPP 将 5G 的主要应用场景分为三大类,分别是移动宽带增强 (enhanced mobile broadband,

eMBB)、大规模机器型通信 (massive machine-type communication, mMTC)、超高可靠超低时延通信 (ultra-reliable and low-latency communication, uRLLC)^[8,9]。mMTC 和 uRLLC 是人与机器、机器与机器之间的通信,是物联网的主要应用场景;而 eMBB 主要是改善人与人之间的通信体验,是在现有移动宽带业务场景的基础上,对于用户的体验等性能的进一步提升。3 种主要业务场景需求不同、性能要求指标也不同,因此在 NFV 和 SDN 的网络架构下,对切片的编排会直接影响网络的负载、资源利用率和能耗等。

基于 SDN 技术,研究人员在优化网络切片编排、提高资源利用率方面做了很多研究。Koerner M 等^[10]提出利用 SDN 技术为每个服务建立自己的虚拟网络,在网络内部实现负载均衡。Google 则基于自己的数据中心,提出 B4 架构,实现了基于 SDN 的数据中心间的流量工程,链路利用率提高到接近 100%^[11]。吴一娜^[12]提出基于切片划分的网络资源控制机制,通过贪婪策略对网络需求进行排序,再逐一编排。这些研究方法都是建立在网络状态较为简单的数据中心进行的网络资源的优化,没有考虑到应用服务在带宽、时延和可靠性方面的复杂需求,并且大多仅针对网络资源利用率或 QoS 等单个目标,关于 NS 的编排算法也多从网络局部的信息针对单一目标进行算法的优化,缺少对网络整体考虑。

为了解决以上问题,提出一种基于 GA-PSO 的网络切片算法。具体地,本文将网络的优化转化为对网络切片的编排,通过对用户流量的统计分析,知道整网的流量分布特征,预先构造好基本切片,然后再对实时的流量分析负载和需求,构造切片并将构造的结果通过 OpenFlow 协议流表的形式部署在交换节点上。

基于该算法的网络资源控制模型具有以下特征:根据第 3.2.2 节中带宽和时延分类阈值将需求



相近的归为一类，为同一种切片；NFV 实现对物理资源的虚拟化，SDN 控制器根据网络负载和流量的情况生成路由策略；部署路由策略。

3 GA-PSO 切片生成算法

在基于网络切片划分的路由模型中，切片划分的优劣直接决定了网络的负载情况和资源利用率，因此切片的生成对基于 NFV/SDN 的网络切片架构系统来说至关重要。另外，现有的切片划分算法一般是采用贪心策略，对网络中的需求逐个进行资源的划分和路由的选择，缺少全局优化，没有将 SDN 掌握全局信息，集中控制的优点发挥出来，并且当网络负载非常大的时候，逐个划分的时间复杂度太大，很难满足实时性需求。

3.1 PSO 算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)，是由 Kennedy J 和 Eberhart R C 等人^[13]于 1995 年开发的一种群智能算法。在 PSO 算法中每个优化问题的解都是搜索空间的一只鸟，被抽象为没有质量和体积的粒子，粒子的位置代表被优化空间在搜索空间中的潜在解，所有粒子都有一个评价函数决定的适应值。每个粒子根据自身和周围粒子的经验在搜索空间中调整自己的位置和速度。基础的 PSO 算法定义了两个非常重要的参数：某一代种群中，粒子适应度最高的称为 p_{best} ；所有种群的粒子至今为止发现的全局最优解称为 g_{best} 。并且将其所找到的位置保存下来，用于引导和更新粒子的位置和速度。位置 $x_{i,j}(t+1)$ 和速度 $v_{i,j}(t+1)$ 更新方程如下：

$$\begin{aligned} & v_{i,j}(t+1) \\ &= wv_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[g_{i,j} - x_{i,j}(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), j=1,2,\dots,d \quad (2)$$

其中， w 为惯性权重， c_1 和 c_2 为正的学习因

子， r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

3.2 GA-PSO 算法

3.2.1 算法的基本思想

PSO 最初被用于函数优化方面，而 5G 中网络切片的划分问题本身是为所有用户的流量需求计算出一个合理的路由方案，属于网络路由问题，因此需要重新设计评价函数和粒子更新算法。针对以上问题，本文借鉴 GA (genetic algorithm, 遗传算法)^[14]中的杂交和变异的思想，首次将杂交和变异的思想应用于切片优化，一个切片本身作为一个子图代表一个可行解，因此种群的进化和粒子的迁徙就转化为子图杂交的过程。

算法的基本思想是根据 3GPP 提出的 3 种主要应用场景得到两类原始粒子，再由这两类原始基本粒子进一步初始化得到一定数量的基本粒子，形成初始的种群。每个粒子代表一个拓扑子图，评价每个粒子的适应度，存储当前个体最优的粒子和全局最优粒子，按照杂交和变异的思想对子图进行更新优化，产生新的拓扑子图。粒子群追随当前最优粒子在解空间中搜索，即通过迭代找到最优子图作为最终的路由方案。

3.2.2 基本粒子初始化

根据 3GPP 提出的 3 种主要应用场景，本文给出如下定义。

定义 1 (QoS 流量类) 有相同或相近 QoS 需求的用户流量集合。设用户 x 的流量 (flow) 用 f_x 表示，则流量类集合 $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$ 为一种 QoS 流量类型，其中：

- 每个流量 f_i 的时延 (delay) 要求 $D \in [d_l, d_h]$ ，其中 d_l 和 d_h 是根据 3GPP 提出的 3 种主要应用场景在时延需求方面的分类阈值；
- 每个流量 f_i 的带宽 (bandwidth) 要求 $B \in [b_l, b_h]$ ，其中 b_l 和 b_h 是根据 3GPP 提出的 3 种主要应用场景在带宽需求方面的分类阈值。

定义 2 (点到点流量矩阵^[15,16]) 流量矩阵表

示网络中源—目的 (original-destination, OD) 节点之间每个流的分布情况, 流量矩阵的维数等于网络中所有 OD 流的数目, 它从全局的观点来描述整个网络的数据流动情况, 是网络决策的重要依据。点到点流量矩阵 (point-to-point traffic matrix) 表示源 (O) 节点和目的 (D) 节点之间的流量 $V(O, D)$, 它表示网络中所有 OD 节点对间的流量, 描述了网络流量在各个 OD 节点对间的分布情况。

定义 3 (低时延网络切片) 能够为特定的 QoS 流量类提供最小时延保障的一个虚拟逻辑网络, 由一系列网络功能、运行这些网络功能的资源以及这些网络功能特定的配置所组成。

定义 4 (高带宽网络切片) 能够为特定的 QoS 流量类提供最小带宽保障的一个虚拟逻辑网络。

依上述定义, 本文根据 QoS 流量需求使用最短路径算法, 生成两个基类 NS: 低时延类切片、高带宽类切片, 组成杂交池, 按照第 3.2.4 节所述子图杂交和子图变异方法进行两两随机杂交, 产生 N 个基本粒子, 构成初始化种群。一个子图粒子 G 是一个 $N \times N$ 的邻接矩阵, 代表一个潜在的解, 即一个可选的路由方案, 也就是一个潜在的网络切片, 其中, N 为网络拓扑中的节点的个数。

3.2.3 基本粒子适应度评价函数

《5G 白皮书》^[9]中将未来移动互联网和物联网的主要应用场景分为连续广域覆盖、热点大容量、低功耗大连接和低时延高可靠, 各场景需要的关键能力指标为高带宽的体验速率、超高的流量密度、超高的连接密度、低时延高可靠。

综合这 4 种关键能力指标, 本文选用时延、带宽两个参数来刻画未来 5G 应用场景的性能指标。

网络切片的性能由不同的性能参数表征。但不同的参数具有不同的取值范围和单位, 因此无法进行量化比较与分析, 本文采用 0 均值归一化方法将不同的传输参数归一化 (normalization),

归一化计算式为:

$$v^{\text{nor}} = \frac{v - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

其中, v^{nor} 为性能参数归一化值; v 为性能参数; μ 为性能参数的均值; σ 为性能参数的方差。

评价一个粒子的适应度是根据它所代表的切片的传输参数做出的, 也就是说粒子的适应度即 NS 的适应度。基于上述性能参数归一化, 使得对 NS 的量化分析变得可行, 同时考虑到 5G 应用场景的分类和传输参数的选择以及对微小变化的反映, 本文以指数函数为基础设计的粒子适应度评价函数如下:

$$\text{Fitness}(\alpha, \beta, D, B) = -\alpha e^D + \beta e^B \quad (4)$$

其中, D 为归一化后的一个子图中时延最大的路径时延值; B 为归一化后的一个子图中链路的最小带宽; α 为低时延需求类切片占有所有切片的比例; β 为高带宽需求类切片占有所有切片的比例。

3.2.4 基本粒子更新

标准 PSO 算法中的粒子通过式 (1)、式 (2) 跟踪粒子本身所找到的最优解和整个种群目前找到的最优解更新自己。本文中, 根据网络切片的实际问题特点对传统的方法进行改进, 借鉴 GA 中的杂交和变异的思想, 将杂交和变异的思想应用于子图优化。

(1) 子图杂交

将当前的粒子所代表的子图依次与局部最优子图和全局最优子图杂交, 然后对杂交后的子图进行优化。杂交步骤如下。

步骤 1 找出当前粒子与局部最优子图、全局最优子图相同的节点。

步骤 2 如果当前粒子与局部最优子图相同节点数小于 4 个并且与全局最优子图相同节点数也小于 4 个, 则进入第 3.2.4 节的子图变异。

步骤 3 如果当前粒子与局部最优子图相同节点数大于 3 个, 则随机在相同的节点中选择两个节点, 交换这两个节点之间的路由, 并保持连通



性, 否则进入步骤 4。

步骤 4 如果当前粒子与全局最优子图相同节点数大于 3 个, 则随机在相同的节点中选择两个节点, 交换这两个节点之间的路由, 并保持连通性。

步骤 5 删除所有既不是源节点也不是目标节点的叶子节点。

步骤 6 输出这个杂交后的新子图。

(2) 子图变异

根据变异概率, 随机选择一个不在切片路由内的点, 就近接入路由内。变异本身是一种局部随机搜索, 与杂交算子结合在一起, 保证了种群更新的有效性, 增强了粒子群的局部随机搜索能力; 同时使得粒子群能够保持多样性, 防止局部过早收敛。因为设置的变异概率 P_m 非常小, 所以可以避免算法退化为随机搜索。变异步骤如下。

步骤 1 初始化一个随机值。

步骤 2 比较这个值与变异概率 P_m 的大小, 如果大于 P_m , 则进入步骤 3; 否则, 转入步骤 4。

步骤 3 随机选择不在路由路径中的一个点, 选择适应度最高的两条路接入子图。

步骤 4 输出切片。

3.2.5 算法实施步骤

本文基于 GA-PSO 优化的网络切片编排算法具体步骤如下。

步骤 1 归一化表征网络切片性能的传输参数, 归一化方法按照式 (3)。

步骤 2 使用最短路径算法生成 3 个基类 NS: 低时延类切片、高带宽类切片和高可靠类切片, 组成杂交池, 池内切片按照第 3.2.4 节的杂交和变异算法随机两两杂交, 初始化 $2n$ 个粒子, 每个粒子即一个 NS, 代表一个拓扑子图 G 。

步骤 3 每类切片, 选择合适的参数, 按照 $Fitness(\alpha, \beta, D, B)$ 计算种群粒子的适应度, 并进行排序, 选择适应度最高的 n 个粒子组成初始化

种群。

步骤 4 记录步骤 3 适应度最高的切片, 为局部最优粒子 G_{pb} , 同时也是全局最优粒子 G_{gb} 。

步骤 5 设置迭代次数 m 和描述最优解稳定性的最优解控制阈值 $threshold$ 。

步骤 6 按照第 3.2.4 节的算法, 根据局部最优 NS 和全局最优 NS, 采用杂交、变异的方式更新粒子群中的所有粒子。

步骤 7 按照 $Fitness(\alpha, \beta, D, B)$ 计算种群粒子的适应度, 更新局部最优粒子 G_{pb} , 如果当前的局部最优粒子 G_{pb} 的适应值高于当前的全局最优粒子 G_{gb} , 则更新全局最优粒子; 否则最优解控制计数器加 1。

步骤 8 检查迭代终止条件, 如果迭代次数达到 m 次或者最优解控制计数器的值大于最优解控制阈值 $threshold$, 则进入步骤 9, 否则进入返回步骤 6。

步骤 9 输出最优子图 G_{gb} 。

4 实验分析

4.1 实验环境

为了验证本文所提出的基于 GA-PSO 优化的网络切片编排算法的性能, 设计了实验环境, 拓扑结构如图 1 所示。网络环境中源 (O) 节点 O_1 、 O_2 、...、 O_n 为接纳用户流量的节点, 负责接纳用户的流量, D_1 、 D_2 、...、 D_n 为目的 (D) 节点; S_1 、 S_2 、 S_3 、...、 S_m 为运行 OpenFlow 协议的交换机; 控制器为整个 SDN 的控制器。本文通过在相同环境下实现基于网络切片的 GA-PSO 和贪心策略算法以及不使用网络切片而选择优先级较高路径转发的传统 OSPF 算法, 比较不同网络规模下, 网络路由生成所用时间, 并将每种算法的路由策略部署于实验网络, 根据源节点接入业务流量的不同, 测量不同负载时整个网络的资源利用率, 以验证本文算法的稳定性和高效性。

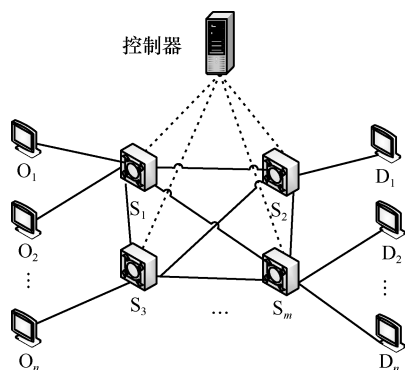


图1 实验环境拓扑示意

4.2 实验设计与结果分析

本文选择两种算法与提出的 GA-PSO 进行对比。方法一为 OSPF 算法：它是数据链路状态路由协议，采用最小生成树算法。即在传统网络不使用网络切片，按最短路径转发，不考虑负载均衡；方法二为贪心策略：在使用网络切片情形下，采用贪心策略进行 QoS 需求（切片）排序，再针对每个切片进行路由选择^[12]。在下面的实验分析过程中，首先保持流量需求即切片总量不变，通过增加网络的节点（网络规模变化）来比较 3 种算法在生成路由策略所用时间和部署路由之后的能耗；然后又使用相同的网络拓扑（网络规模不变），针对不断变化的各类流量需求，对 3 种算法在能耗和资源利用率方面的性能进行分析。

4.2.1 不同网络规模的影响

在流量需求数目相同的情况（本文取流量数目为 30）下，本文比较不同的网络规模下，3 种方法的性能。

（1）时间复杂度

在未来 5G 网络中，无论是热点大容量还是低时延高可靠的业务场景，对于大量新到来的流量需求，控制器必须尽可能快地部署路由策略，否则会严重影响服务质量，因此算法的时间复杂度是一个非常重要的指标，它标志着算法在实际部署环境下能否达到预期效果。从图 2 可以看出，OSPF 算法仅基于链路状态进行最短路径路由转

发，不考虑各链路间负载均衡，相对时间复杂度较低，但是当实际中进行网络部署时网络规模增大带来的整体负载不均衡将影响网络性能。采用贪心策略的算法在网络规模较小时，与 GA-PSO 时间复杂度相近甚至优于 GA-PSO，但随着网络规模所用时间也迅速增加，性能恶化，这主要由于采用贪心策略的算法，对到来的流量先进行排序操作，再逐个求解，这大量重复了路由的计算和选择，浪费大量时间。GA-PSO 算法虽然在网络规模较小所用时间并不是特别少，但随着网络规模的增大其所用时间增长缓慢，具有良好的针对不同规模网络的耗时稳定性，明显优于基于贪心策略的排队算法。

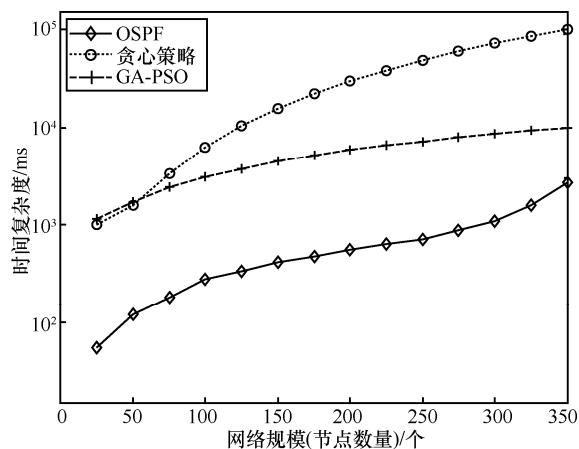


图2 不同的网络规模下3种算法的时间复杂度

（2）能耗

随着未来移动互联网和物联网的发展，大量网络设备接入网络，节能问题成为不可避免的重要问题。因此，通过对比 3 种算法在不同网络规模下的能耗，进一步证明本文算法的有效性和实用性。从图 3 可以看出，随着网络规模的扩大，能耗都在持续增加。传统的 OSPF 算法，随着网络规模的扩大，能耗急剧上升。同时，基于贪心策略的排序优化算法，能耗虽然也在持续升高但明显低于 OSPF 算法，但又比 GA-PSO 算法的能耗高很多，这主要因为基于贪心策略的排序优化算法缺少全局的考虑，只是局部选择最优路径，



因此无法从整体上优化网络的能耗。GA-PSO 利用粒子的不断变迁,通过群智能从整体上优化网络路由,从而降低网络能耗,从图 3 可以看出,网络规模越大,GA-PSO 算法较另外两种算法的能耗优势越明显,同时随着网络规模的增大,GA-PSO 算法的网络能耗增长缓慢,表现出对良好的均衡能力,能耗具有稳定性。虽然从图 2 上看,在网络规模为 350 时,GA-PSO 的耗时比 OSPF 多 14%左右,但图 3 所示节能 32%左右。

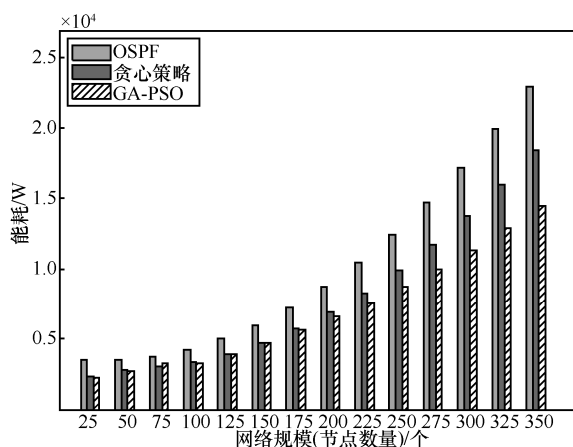


图 3 不同网络规模下 3 种算法的能耗

4.2.2 不同网络需求的影响

为了进一步评价算法性能,本文在 200 个网络节点的前提下,考虑不同网络负载时的能耗和链路平均利用率。

(1) 能耗

从图 4 可以看出,随着网络负载的增加,OSPF 算法的能耗在持续增加,并且明显高于另外两种算法。基于贪心策略的算法,虽然能耗也在增加,但增长速度较 OSPF 明显放缓。GA-PSO 算法在负载不大时,并不明显优于基于贪心策略的算法,但负载越高,GA-PSO 的优势越明显,这主要还是由于基于贪心策略的算法缺少整体观,在负载较小时缺点不明显,但一旦负载变大,则将十分严重地影响整个网络的能耗。

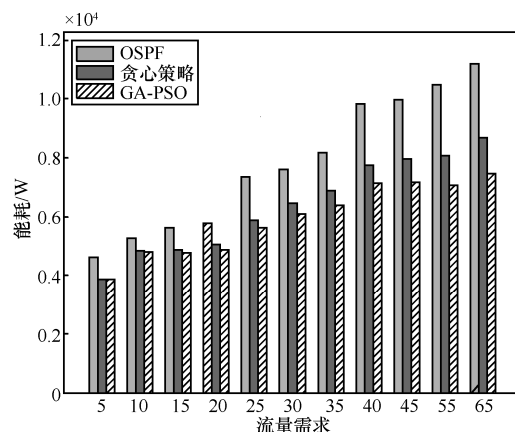


图 4 不同网络负载下 3 种算法的能耗

(2) 网络资源利用率

从图 5 可以看出,本文算法使得链路平均利用率保持在 70%左右,并且随着负载的增加链路平均利用率波动不大,说明有较好的负载均衡效果和稳定性。OSPF 算法尽量选择最短路径,会使得个别路径负载过高,链路平均利用率偏低。基于贪心策略的算法,比传统 OSPF 有了显著提高,但在全局负载均衡方面仍然逊色于 GA-PSO 算法。

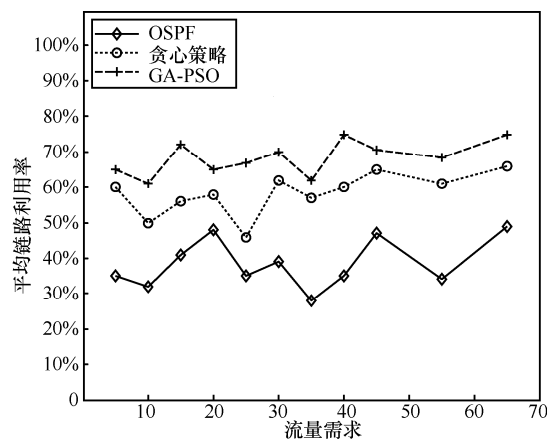


图 5 不同网络负载下 3 种算法的网络资源利用率

5 结束语

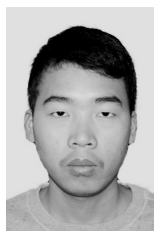
本文通过对当前主要应用场景的分析和对网络切片的算法研究,提出基于 GA-PSO 优化的网络切片编排算法,该算法的特点是:借鉴 GA 算法中杂交和变异的思想,对传统的 PSO 算法进行了改进,将 PSO 的群智能特点应用于网络子图的

优化问题,使得算法的全局搜索性能得到了实质的提高,充分发挥了SDN架构的集中控制优越性。实验数据表明,该算法对于大规模网络的高负载流量的优化有着良好的效果。

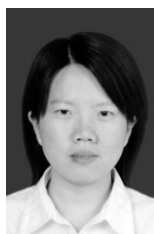
参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2014(5): 551-563.
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2014(5): 551-563.
- [2] SAMA M R, AN X, WEI Q, et al. Reshaping the mobile core network via function decomposition and network slicing for the 5G era[C]//2016 Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), April 3-6, 2016, Doha, Qatar. New Jersey: IEEE Press, 2016: 90-96.
- [3] PRIES R, MORPER H J, GALAMBOSI N, et al. Network as a service-a demo on 5G Network slicing[C]//2016 28th International Teletraffic Congress (ITC 28), Sept 12-16, 2016, Würzburg, Germany. New Jersey: IEEE Press, 2016: 209-211.
- [4] GIANNOULAKIS I, KAFETZAKIS E, XYLOURIS G, et al. On the applications of efficient NFV management towards 5G networking[C]//2014 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), Nov 26-28, 2014, Akaslompolo, Finland. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [5] KSENTINI A, BAGAA M, TALEB T. On using SDN in 5G: the controller placement problem[C]//GLOBECOM 2016, IEEE Global Communications Conference, Exhibition and Industry Forum, December 4-8, 2016, Washington, USA. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1.
- [6] ZHANG J, XIE W, YANG F. An architecture for 5G mobile network based on SDN and NFV[C]//6th International Conference on Wireless, Mobile and Multi-Media (ICWMMN 2015), Nov 20-23, 2015, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2015: 87-92.
- [7] DEMESTICHAS P, GEORGAKOPOULOS A, KARVOUNAS D, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2013, 8(3): 47-53.
- [8] NAKAO A, DU P, KIRIHA Y, et al. End-to-end network slicing for 5G mobile networks[J]. Journal of Information Processing, 2017(25): 153-163.
- [9] NGMN. 5G white paper[R]. 2015.
- [10] KOERNER M, KAO O. Multiple service load-balancing with OpenFlow[C]//2012 IEEE 13th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR), June 24-27, 2012, Belgrade, Serbia. New Jersey: IEEE Press, 2012: 210-214.
- [11] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: Experience with a globally-deployed software defined WAN[J]. Computer Communication Review, 2013, 43(4): 3-14.
- [12] 吴一娜. 基于切片划分的网络资源控制机制的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2016.
WU Y N. Research and implementation on resource control mechanism based on network slicing[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [13] KENNEDY J. Particle swarm optimization[M]//Encyclopedia of machine learning. New York: Springer US, 2011: 760-766.
- [14] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [15] MEDINA A, TAFT N, SALAMATIAN K, et al. Traffic matrix estimation: existing techniques and new directions[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(4): 161-174.
- [16] SOULE A, LAKHINA A, TAFT N, et al. Traffic matrices: balancing measurements, inference and modeling[C]//ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, June 6-10, 2005, Banff, Alberta, Canada. New York: ACM Press, 2005: 362-373.

[作者简介]



周恒(1996-), 男, 西安邮电大学通信与信息工程学院在读, 主要研究方向为宽带无线通信和 SDN。



畅志贤(1981-), 女, 博士, 西安邮电大学通信与信息工程学院讲师, 主要研究方向为宽带无线通信与 SDN 技术。



杨武军(1969-), 男, 西安邮电大学通信与信息工程学院通信工程系主任、副教授, 主要研究方向为移动互联网与 SDN。

郭娟(1973-), 女, 西安邮电大学通信与信息工程学院通信工程系副主任、副教授, 主要研究方向为宽带通信网与 SDN。