doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.09.007

基于蝙蝠算法的 SDN 多控制器部署

杨耀通,汪　清,高丽蓉,李　萌
(天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072)

摘要:对于大型 SDN 网络,多控制器的部署和应用需求迫切。提出了一种基于蝙蝠算法的多控制器部署方法,同时优化了 3 个指标:最小化平均控制时延、最小化控制器负载差异度和去除孤立节点。通过在迭代时不断优化达到平均控制时延最小化;限制控制器负载利用率保证控制器间负载均衡,利用标签传递算法去除孤立节点保证域内通信。仿真结果表明该方法可以保证 SDN 网络在无孤立节点的情况下,获得最小时延以及负载均衡的多控制器部署方案。

关键词:软件定义网络;多控制器部署;蝙蝠算法
中图分类号:TP393　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-582X(2018)09-057-09

A bat inspired controller placement algorithm in software defined network

YANG Yaotong, WANG Qing, GAO Lirong, LI Meng
(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P.R.China)

Abstract: For large SDN networks, the placement and application of multiple controllers is in urgent need. A multi-controller placement approach based on bat algorithm was proposed, and three indexes were optimized, which minimized the average control delay and the controller's load difference, and remove the isolated nodes. The minimization of average control delay was realized when the average control was continuously optimized during one iteration, and the load balance was guaranteed by limiting the load utilization of the controller. At the same time, the tag delivery algorithm was used to remove the isolated nodes to ensure the intra-domain communication. The simulation results show that this approach can guarantee that SDN network achieves small delay and load balanced multi-controller placement without isolated nodes.

Keywords: software defined network; multi-controller placement; bat algorithm

随着通信技术的不断发展,互联网用户的数量在不断增长,越来越多的服务要求对延迟,丢包率和数据速率提出更高挑战,使传统网络架构暴露出越来越多的问题。在这种情况下,SDN 网络应运而生。SDN 从数据平面解耦出控制平面。控制平面由控制器组成,负责管理整个网络;而数据平面由简化的交换机组成,交换机负责数据包的转发,该架构使得网络易于管理和升级。

对于大型网络,单个控制器的管理难以满足所有交换机的需求,需要用多个控制器来分担整个系统通信

收稿日期:2017-11-29
基金项目:国家 863 资助项目(2015AA01A706)。
Supported by National 863 Projeet Foundation(2015AA01A706)
作者简介:汪清(1982—),女,天津大学副教授,博士生导师,主要从事软件定义网络方向研究,(Tel)13132218752;(E-mail)glr2016@tju.edu.cn
李萌(联系人),女,天津大学硕士研究生,主要从事软件工程方向研究,(E-mail)386265358@qq.com。

压力。但是,多个控制器的位置如何部署会影响整个网络时延以及负载均衡度。因此,合理地部署多个控制器变成SDN网络研究中的一个重要问题。

许多学者在研究SDN控制器部署问题,Heller B于2012年在文献[1]中首次提出该问题并提出了2个优化指标:平均时延和最大时延。Sallahi等[2]提出了受部署代价影响的控制器部署算法,但没有涉及数学证明和具体实现。

文献[3]对K-means算法进行了改进,然后用来解决控制器部署问题,该算法最初仅选择一个点作为聚类中心,之后逐渐增加分区的数量,可有效避免k-means结果随机的缺点,但其只考虑平均控制时延,并未考虑负载均衡和跨域通信问题。Tracy等[4]提出了改进的原始对偶、贪婪和分区算法来解决问题,同样未考虑负载均衡和跨域通信问题。文献[5]将控制器部署问题与粒子群思想结合,考虑平均控制时延和负载均衡,但没有解决跨域通信问题,且结果比较随机。Xiao等[6]将控制器部署问题与谱聚类思想相结合,虽然同时考虑了时延和负载均衡,未顾及跨域通信的问题。

文献[7]提出了一种改进的模拟退火算法解决控制器部署问题,该文献同时考虑了时延、负载均衡和跨域通信,但该算法复杂度比较高,且结果比较随机。

以上列举出的文献所提出的算法大部分只考虑了平均控制时延或最大时延,虽然有一些文献兼顾了时延和负载均衡2个指标,但很少有文献同时兼顾时延、负载均衡和跨域通信3个指标,这也是需要解决的问题。

研究提出基于蝙蝠算法的多控制器部署方法。该方法通过在迭代时不断优化平均控制时延达到最小化;通过限制控制器负载利用率达到负载均衡;并通过标签传递算法去除孤立节点以保证域内通信。

主要贡献如下

1)定义控制器负载利用率,并通过优化该指标达到控制器间的负载均衡。

2)定义了孤立节点,该指标确保了无跨域通信的交换机出现。

3)提出了基于蝙蝠算法的控制器部署方法,优化了平均控制时延和控制器负载差异度。

4)提出标签传递算法去除孤立节点。

1 控制器部署模型

在SDN网络多控制器部署问题中,时延、负载均衡和跨域通信是3个重要指标。首先,在SDN网络中,存在着3种时延,分别为:交换机到交换机的时延;交换机到控制器的时延;控制器到控制器的时延。因为所有的交换机都需要与控制器频繁通信,故大多数情况下只关注交换机到控制器之间的时延。其次,在为控制器分配交换机时,应该尽量保证每个控制器控制的交换机数目大致相等,否则将会出现负载较高的控制器由于超负荷停止工作,而负载较低的控制器只发挥出小部分的性能导致能源浪费。除此之外,希望控制器之间负载均衡的同时,每个控制器的实际负载不超过其最大负载。因此,提出控制器负载利用率的概念,通过限制最大和最小的控制器负载利用率使得每个控制器既不超负荷工作,又可以使得交换机的资源得到有效利用。最后,在分配完成的网络拓扑中,不应该出现跨域通信的交换机。因此多控制器的部署问题等效于:给定一个SDN网络拓扑,如果需要部署K个控制器,这K个控制器应部署在哪些位置,以及每个交换机应分配到哪个控制器,才能保证网络的时延最小、控制器之间的负载最均衡以及没有跨域通信的交换机。

同时考虑到SDN控制器类似于服务器,需要与交换机进行通信,因此控制器的部署位置即为其直接相连交换机的位置。与控制器直接相连的交换机与控制器之间的延迟理想化为0,且不需要为控制器和直连的交换机之间铺设单独的物理链路。

将SDN网络拓扑建模为一个无向图:$G=(V,E)$,将网络中的交换机抽象为无向图中的节点,交换机和交换机之间的物理链路抽象为无向图中的边。其中V表示网络拓扑中所有节点的集合;E表示网络拓扑中所有边的集合。假设整个网络需要被划分成K个类,每个类中的交换机只由唯一的一个控制器控制,网络中交换机的个数为N,控制器的个数为K。因此,

交换机的集合表示为

$$V=\{v^1,v^2,\cdots,v^N\},s.t.v^i\in R^n,i=1,2,\cdots,N, \tag{1}$$

控制器的集合表示为

$$C=\{c^1,c^2,\cdots,c^K\},s.t.c^i\in R^n,i=1,2,\cdots,K, \tag{2}$$

交换机之间的延迟表示为

$$d(m,n),\text{s.t.}m,n\in V, \tag{3}$$

上式中(m,n)表示交换机 $m(m\in V)$到交换机 $n(n\in V)$的最短路径。

控制器 j 控制的交换机集合为 SV_j，控制器 j 控制的交换机个数为 N_j，交换机 i 属于的控制器表示为 $C(v_i)$，则

$$SV_j=\{v^i\in V:C(v^i)=c^j\}, \tag{4}$$

每个交换机所属的控制器(也叫做每个交换机的标签)构成集合 Tag，则

$$\text{Tag}=\{C(v^1),C(v^2),\cdots,C(v^N)\},\text{s.t.}v^i\in R^n,i=1,2,\cdots,N。 \tag{5}$$

根据 OpenFlow 协议，分别定义平均控制时延、控制器负载差异度、控制器负载利用率和跨域通信 4 个指标。

定义 1：平均控制时延

在 SDN 网络中，控制器负责处理交换机上传的新流。在 OpenFlow 协议中，当一条新流到达交换机时，交换机会从本身存储的流表项中查找是否有与新流匹配的流表项，若存在匹配的流表项，则按照对应规则进行操作；若不存在匹配的流表项，则该交换机将向控制器发送 packet_in 消息，需要控制器对新流做出响应。当控制器处理对新流处理完成后，向该交换机发送 packet_out 消息告知该交换机如何处理该新流，从而完成该新流的转发。从上述 OpenFlow 的工作机制中可以看出，交换机与控制器之间会进行频繁的通信，因此在该模型中，主要考虑交换机到控制器的查询时延，即 packet_in 消息与 packet_out 消息的时延。在仿真中只计算单程的时延。

定义控制器与交换机的平均控制时延为所有交换机到为其分配的控制器时延的平均值。公式表示如下

$$L=\frac{1}{N}\sum_{v^i\in V}d(v^i,C(v^i)),\text{s.t.}v^i\in R^n,i=1,2,\cdots,N, \tag{6}$$

其中 L 表示平均控制时延。

定义 2：控制器负载差异度

定义控制器负载差异度为每个控制器控制的交换机数量的方差，公式表示如下

$$T=\sigma^2=\sum_j^K\frac{(N_j-N_{\text{average}})^2}{K}, \tag{7}$$

$$N_{\text{average}}=\frac{N}{K}。 \tag{8}$$

其中 T 表示负载差异度。通过式(7)和式(8)可以看出，控制器负载差异度表现了各控制器控制交换机数量的差异，能够很好体现出控制器间负载均衡的思想。

定义 3：控制器负载利用率

该指标约束了控制器的负载利用率。假设所有控制器的性能均相同，即每个控制器的最大额定负载相同。定义 $C_{\max}$ 为控制器的最大额定负载，即每个控制器可以控制交换机的最大数目。则第 j 个控制器的实际负载利用率为

$$\text{ratio}_{\text{real}}^j=\frac{N_j}{C_{\max}},j=1,2,\cdots,K, \tag{9}$$

其中 $\text{ratio}_{\text{real}}^j$ 为第 j 个控制器的实际负载利用率。

则实际负载利用率需要满足

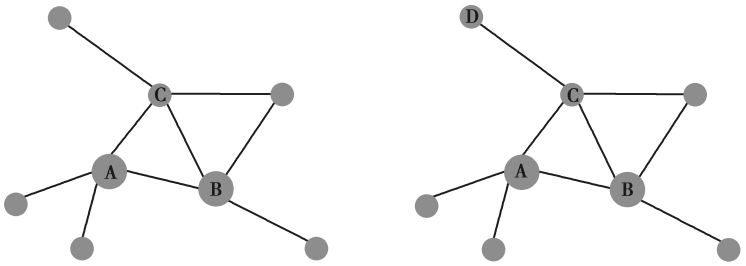
$$\text{ratio}_{\min}\leqslant\text{ratio}_{\text{real}}^j\leqslant\text{ratio}_{\max},\forall j\in K, \tag{10}$$

其中 $\text{ratio}_{\min}$ 和 $\text{ratio}_{\max}$ 分别为控制器的最大和最小负载利用率。

定义 4：孤立节点数

该指标定义了提及的跨域通信问题，可以抽象为图的连通性的问题。如图 1(a)所示，该网络被分成 2 个类，A 类和 B 类，中心点分别为 A 点和 B 点，即控制器的部署位置。从图中可以看出，A 类共有 5 台交换机，

B类共有3台交换机。根据定义2控制器负载差异度的需要,可以将A类中的一个点分配给B类。



(a)无孤立节点 (b)点D为孤立节点

图1 孤立节点示意图

Fig.1 The isolated nodes diagram

出于平均控制时延最小化的考虑,将C点分配给B类,分类后的结果如图1(b)所示。而此时由于将C点分配给B类,导致了D点与中心点A的不连通,A区域被隔离开来,使初始时D点与中心点A之间的域内通信改变为跨域通信。跨域通信有可能出现可靠性、稳定性、安全性等一系列的问题。

用孤立节点数来判断网络中是否有跨域通信的情况存在。如果网络中无跨域通信的交换机存在,则必须满足孤立节点数为0,即

$$IN=0, \tag{11}$$

其中 IN 为孤立节点数。

基于以上的3个定义,多控制器部署问题可以被建模为一个多目标优化问题[8]。目标函数及约束可表示为

$$\min \boldsymbol{F}(C(v^i),SV_j)=(L,T)^{\mathrm{T}}, \tag{12}$$

$$\text{s.t.}\,\text{ratio}_{\min}\leqslant \text{ratio}^{j}_{\text{real}}\leqslant \text{ratio}_{\max},\forall j\in K, \tag{13}$$

$$\text{s.t.}\,IN=0。 \tag{14}$$

以上即为多控制部署问题的数学模型,该多目标优化问题是一个NP-hard问题,无法在多项式时间内求出最优解。因此,提出一种基于蝙蝠算法的多控制器部署方法,来近似求得该问题的最优解。

2 基于蝙蝠算法的多控制器部署方法

研究提出了基于蝙蝠算法的多控制器部署方法(BACP, a bat inspired controller placement algorithm in software defined network)。蝙蝠算法[9]是一种启发式算法,它仿照自然界中蝙蝠的回声定位,利用脉冲响度和脉冲发射频率的适时改变来实现算法的全局搜索和局部搜索自动切换,从而平衡全局搜索和局部搜索对算法寻最优解的影响。

2.1 蝙蝠位置定义及初始化

每只蝙蝠的位置代表一种分类策略,每个交换机所属的控制器集合Tag可以看做一只蝙蝠的位置,即在网络 $G=(V,E)$ 中,所有交换机集合为 $V=\{v^1,v^2,\cdots,v^N\}$,交换机的个数为 N,一只蝙蝠的位置构成集合 $\text{Tag}=\{C(v^1),C(v^2),\cdots,C(v^N)\}$,对于网络中的任意2个交换机 i,j,若 $C(v^i)=C(v^j)$,则表示交换机 i,j 属于同一个控制器。可以看出,该问题的解空间是一个 N 维的向量。为了保证解空间的随机性,初始时随机选取每只蝙蝠的位置。

2.2 蝙蝠速度定义及初始化

在多控制器部署问题中,每只蝙蝠的位置每一维解(每只蝙蝠共有 N 维解),即每个交换机所属的控制器,只有更新和不更新2种方式,因此定义第 i 只蝙蝠的速度:$V_i=\{v_1,v_2,\cdots,v_N\}$,$(v_j\in[0,1])$。若某速度分量为1,则该位置元素进行更新;若某速度分量为0,则该位置元素不进行更新。初始时,假设所有速度分量均为1,即每个位置元素都有可能进行更新。

2.3　蝙蝠速度及位置更新规则

假设每只蝙蝠可以记住自己的历史最优位置，且每只蝙蝠可以知道所有蝙蝠的全局最优位置。结合蝙蝠算法的基本原理和多控制器部署问题，定义蝙蝠速度及位置更新规则如下

$$V_i^{t+1}=\boldsymbol{F}(V_i^t+(\mathrm{Tag}_i^t\oplus\mathrm{Tag}_{\mathrm{best}})\times f_i),\tag{15}$$

$$\mathrm{Tag}_i^{t+1}=\mathrm{Tag}_i^t\otimes V_i^{t+1},\tag{16}$$

$$f_i=f_{\min}+(f_{\max}-f_{\min})\times\beta。\tag{17}$$

其中 V_i^t 和 V_i^{t+1} 分别表示蝙蝠个体 i 在 t 时刻和 $t+1$ 时刻的速度；Tag_i^t 和 Tag_i^{t+1} 分别表示蝙蝠个体 i 在 t 时刻和 $t+1$ 时刻的位置；$\mathrm{Tag}_{\mathrm{best}}$ 表示所有蝙蝠个体的全局最优位置。f_i 表示蝙蝠个体 i 的搜索频率；$f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别表示蝙蝠发射脉冲频率的最小和最大值；β 是 0～1 之间的随机数。

2.3.1　蝙蝠速度更新规则：

式(15)、(17)表示蝙蝠的速度更新。⊕为异或操作。

如图 2 所示，由于初始化时，每个蝙蝠的位置都是随机的，因此不同蝙蝠个体之间无法直接进行异或操作，首先要将不同蝙蝠个体之间的聚类编号统一，然后蝙蝠个体 1 和蝙蝠个体 2 将进行异或操作。蝙蝠个体 1 中的聚类编号共有 3 种，分别为 8，3，4。以编号 8 为例，蝙蝠个体 1 中共有 4 个位置编号为 8，找到蝙蝠个体 2 中相对应的位置，图中用蓝色箭头标出。蝙蝠个体 2 中对应位置的聚类编号分别为 1，3，1，1。因为编号 1 居多，因此将蝙蝠个体 1 中编号为 8 的位置全部改为 1；若以此类推。经过统一聚类编号的操作后，蝙蝠个体 1 的聚类编号变为个体 3。此时再将蝙蝠个体 2 和蝙蝠个体 3 做异或操作。异或操作的规则为：聚类编号相同为 0，聚类编号不同为 1。个体 4 为蝙蝠个体 2 和 3 做异或操作之后的结果。

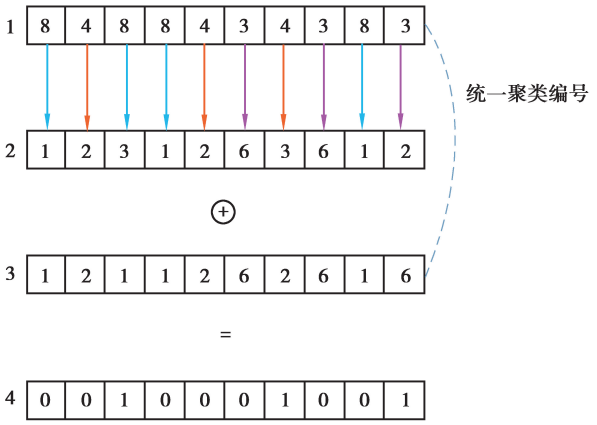


图 2　统一聚类编号和异或操作

Fig.2　The operation of uniform clustering number and xor

下面给出函数 $Y=\boldsymbol{F}(x)$ 的定义

$$\begin{cases}Y=0,\mathrm{rand}(0,1)\geqslant f(x)\\ Y=1,\mathrm{rand}(0,1)<f(x),\end{cases}\tag{18}$$

$$f(x)=\frac{1}{1+e^{-x}}。\tag{19}$$

其中 rand(0,1)是 0 到 1 之间的随机数，从式(18)和式(19)可以看出，当随机数 rand(0,1)$\geqslant f(x)$时，该维度的速度为 1，该维度的位置需要进行更新；当随机数 rand(0,1)$<f(x)$，该维度的速度为 0，该维度的位置不需要进行更新。

2.3.2　蝙蝠位置更新规则：

式(16)表示蝙蝠位置的更新。将⊗定义为位置更新操作，位置更新操作的具体规则如下所示

$$\begin{cases}\mathrm{Tag}_i^{t+1}=\mathrm{Tag}_i^t,v_i^{t+1}=0,\\ \mathrm{Tag}_i^{t+1}=\mathrm{Position}(\mathrm{Tag}_i^t),v_i^{t+1}=1,\end{cases}\tag{20}$$

其中 v_i^{t+1} 为某一蝙蝠个体在 $t+1$ 时刻的第 i 维的速度分量；Tag_i^t 和 Tag_i^{t+1} 分别表示 t 时刻和 $t+1$ 时刻该

蝙蝠个体在第 i 维的位置分量。

式(20)表示,若某一维的速度分量为 0,则该维的位置分量不进行更新;若某一维的速度分量为 1,则该维的位置分量通过 Position 操作进行更新。Position 操作如下:

如图 3 所示,以节点 1 为例,假设此时节点 1 的位置分量为 1,即节点 1 需要进行 Position 操作。此时节点 1 的邻居节点为 2,3,7。节点 2,3 的中心点为 4,节点 7 的中心点为 12。因此节点 1 分配给中心点 4 的概率为 2/3,分配给中心点 12 的概率为 1/3。

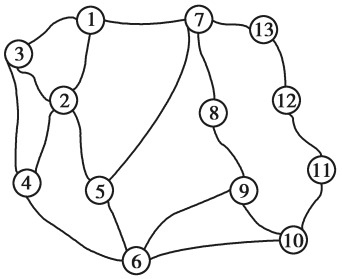


图 3 Position 操作示意图

Fig.3 The position operation

2.4 BACP 算法流程

Algorithm 1: BACP 算法

1)输入:初始化算法所需的参数,包括蝙蝠个体数量,衰减系数,最大迭代次数,最大额定负载,最大最小负载利用率等;

2)根据方法,随机初始化蝙蝠种群位置 $\mathrm{Tag}_i^0=\{C(v^1),C(v^2),\cdots,C(v^N)\}$,初始化蝙蝠种群的速度 $V_i^0=\{v_1,v_2,\cdots,v_N\}$,$(v_j=1)$,初始化蝙蝠种群的脉冲频度 r_i^0 和脉冲响度 A_i^0。初始时每只蝙蝠的最优位置 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best}}$ 即为其初始位置 Tag_i^0。

3)根据式(6)和式(10)计算每只蝙蝠个体的平均控制时延以及控制器实际负载利用率。在这里,只以最大控制器负载利用率最小化为评价指标,从中选出最优个体(即控制器负载差异度最小的个体),作为当前的全局最优解。

4)根据提出的更新规则,更新每只蝙蝠个体的位置 Tag_i^t。根据平均时延最小化的原则,重新选择每个类的中心点,并更新 Tag_i^t。

5)由于每只蝙蝠个体的位置初始化时是随机的,因此极有可能出现孤立节点,在此利用提到的标签传递算法对 Tag_i^t 去除孤立节点。有关标签传递算法的内容在下节中详细介绍。

6)根据更新后的 Tag_i^t,计算平均控制时延和最大控制器负载利用率。若 2 项指标中有一个减小,则更新蝙蝠个体 i 的最优解 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best}}$;否则不进行更新。

7)对于每只蝙蝠个体,计算每只蝙蝠个体的脉冲频度 r_i^t,并产生 0~1 之间的随机数 rand1,若 rand1$>r_i^t$,则在该个体最优解 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best}}$ 附近产生扰动。扰动方式如下

首先计算所有蝙蝠个体的平均脉冲响度 $\overline{A}^t$。对于每只蝙蝠个体最优解 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best}}$ 的每一个位置分量,若 $\mathrm{rand}(0,1)>\frac{1}{e^{\overline{A}^t}}$,则按照提出的位置扰动方式更新该位置分量的值,扰动后的分类结果记为 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best\_temp}}$;否则不进行扰动。

8)对于每只蝙蝠个体,计算每只蝙蝠个体的脉冲响度 A_i^t,并产生 0~1 之间的随机数 rand2。若 rand2$<A_i^t$ 且 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best\_temp}}$ 的平均控制时延和控制器负载差异度均比 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best}}$ 小,则 $\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best}}=\mathrm{Tag}_i^{\mathrm{best\_temp}}$。

9)根据更新过后的每只蝙蝠个体最优解,以平均控制时延和最大控制器负载利用率最小化为标准,且需要满足式(11)的控制器负载利用率的约束,更新全局最优解。

10)分别按照以下 2 个公式更新 r_i^t 和 A_i^t

$$r_i^{t+1}=r_i^0\times[1-\exp(-\gamma t)], \tag{21}$$

$$A_i^{t+1}=\alpha\times A_i^t。 \tag{22}$$

其中 γ 通常取 1;α 为衰减系数,通常取值为 0.99 或 0.98。

11)若达到最大迭代次数或全局最优解连续几次不再改变,则终止并输出全局最优解;否则,转至第 4 步;

3 标签传递算法

通过多控制器部属方法能实现最小化延迟和负载均衡,但无法保证连通性。因此,引入标签传递算法保证节点与中心点之间的连通性,保障域内通信。标签传递算法首先利用广度优先算法的思想找到网络中的

孤立节点，并按照规则重新分配这些孤立节点。

Algorithm 2：标签传递算法

1）输入：网络拓扑 $G=(V,E)$，中心点集合 C、所有点标签集合 Tag。

2）输出：中心点集合 C、所有点标签集合 Tag。

3）第一步：选取其中的一个类，该类中心点的标签为黑色标签，该类其余节点的标签为白色。

4）第二步：基于广度优先算法的思想，将与黑色标签节点相邻的白色节点的标签改变为黑色，以此类推，直到所有的黑色标签节点不再有相邻的白色标签节点。

5）第三步：遍历所有类，对每个类重复第一步和第二步。此时标签为白色的节点即为孤立节点，将所有标签为白色的节点放置于集合 isolated_nodes 中。

6）第四步：遍历 isolated_nodes 中所有元素，即所有孤立节点。

若孤立节点的相邻节点不是孤立节点：则将该孤立节点的中心点改为其相邻节点的中心点，若该孤立节点有多个相邻节点，则说明该孤立节点可以属于多个类，此时将该孤立节点的中心点更改为距离该孤立节点最近的中心点；

若孤立节点的相邻节点是孤立节点：则暂时不分配该孤立节点。

7）第五步：重复第 1，2，3 步。

若 isolation_nodes=ø，则返回 C 和 Tag。

若 isolation_nodes≠ø，则回到第 4 步。

4　实验与分析

4.1　仿真参数及指标

仿真使用拓扑为 AL2S(america internet2 network advanced layer2 services topology)[8]。该网络拓扑共有 39 个节点，49 条边，是目前较为标准的实际 SDN 网络。许多关于 SDN 控制器部署的文献都使用该拓扑进行方法验证[1,11]。

仿真中使用到的参数如表 1 所示

表 1　仿真参数表

Table 1　Simulation parameters

仿真参数	数值
蝙蝠数量	20
最大迭代次数	100
最小最大脉冲频率 $f_{\min}$，$f_{\max}$	1，4
脉冲频度、响度 r_i，A_i	rand(0.9，1)
衰减系数 γ，α	1，0.99

假设信号在物理链路中的传播速度是光速的$\frac{2}{3}$，因此 2 点之间的时延可以表示为

$$\text{latency}=\frac{\text{distance}(m)}{2\times10^8(\text{m/s})},\tag{23}$$

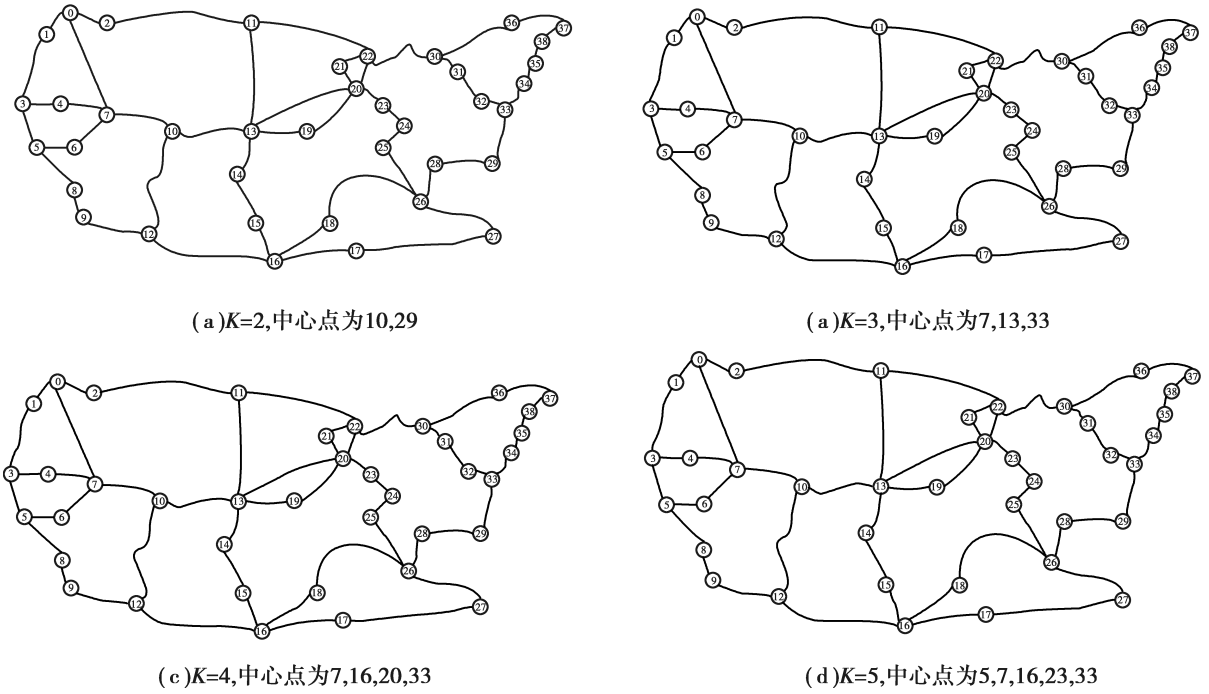
仿真指标使用前面的平均控制时延、控制器负载差异度和孤立节点数。

4.2　实验结果与分析

将 BACP 算法与经典 K-means 算法和文献[5]中提出的 NCPSO 算法进行比较，文献[5]基于粒子群算法提出了 NCPSO 算法解决 SDN 网络中的多控制器部署问题。

4.2.1　AL2S 拓扑分类结果

将 AL2S 拓扑中的 39 个节点分别进行标号，0～38。图 4 是 AL2S 拓扑分成 2，3，4，5 类的结果图，不同颜色表示不同的分区。划分结果较为均匀，表明提出的 BACP 算法具有保证负载均衡和最小时延的有效性。



(a)K=2,中心点为10,29　　(a)K=3,中心点为7,13,33

(c)K=4,中心点为7,16,20,33　　(d)K=5,中心点为5,7,16,23,33

图4　AL2S拓扑分类结果

Fig.4　The clustering results of AL2S topology

4.2.2　孤立节点数分析

图5是3种算法随着分类数不断增加的孤立节点数。从图5中可以看出,经典K-means算法和BACP算法没有出现孤立节点。由于K-means算法只根据距离来分配节点,因此不会出现孤立节点。BACP算法通过标签传递算法去除了孤立节点。而NCPSO算法由于存在大量随机因素,因此会出现孤立节点。

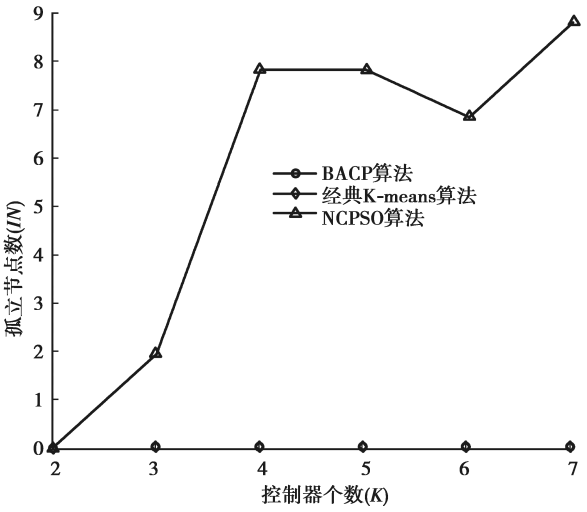


图5　孤立节点数变化

Fig.5　The change trend of isolated nodes numbers

4.2.3　平均控制时延和控制器负载差异度分析

图6是3种算法随着控制器个数不断增加的平均控制时延。其中$\text{ratio}_{\min}=50\%$。从图6中可以看出,随着控制器个数的不断增加,平均控制时延逐渐减小,这与平均控制时延的定义相符。NCPSO算法的平均控制时延基本和经典K-means相当,略高于经典的K-means。总的来说,BACP算法通过多次迭代,平均控制时延基本比NCPSO和经典K-means算法的平均控制时延略小。只有在$K=5$和7时,BACP的平均控制时延略高于经典K-means的时延,但与NCPSO相比,BACP的时延一直都较小。

图7是3种随着分类数不断增加的控制器负载差异度图。从图中可以看出,BACP算法在该性能的表现大体上优于NCPSO和经典K-means算法。$K=5$时,优于NCPSO算法67%,优于经典K-means算法67%;$K=6$时,优于NCPSO算法42%,优于经典K-means算法51%;$K=7$时,优于NCPSO算法16%,优于经典K-means算法62%;只有在$K=4$时表现略差,低于NCPSO算法73%。

综合图6和图7,尽管在允许的范围内,BACP算法在平均控制时延上偶尔表现略差,但是在控制器负载差异度上表现优异。BACP算法可以在牺牲较小平均控制时延的情况下,大幅度降低控制器负载差异度和孤立节点数,证明了BACP算法的有效性。

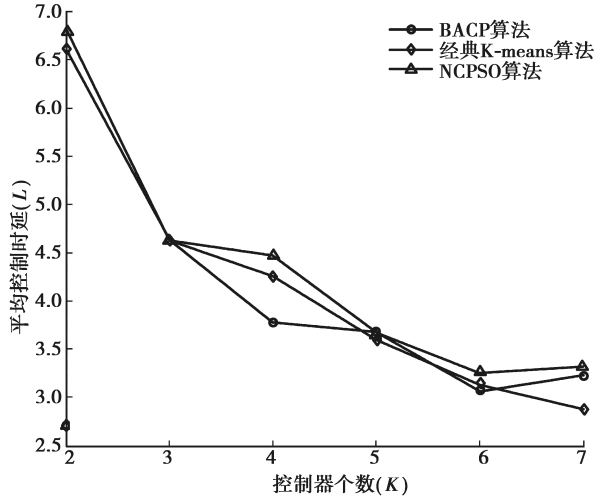


图 6　平均控制时延变化

Fig.6　Comparison of the AL2S topology partition in terms of arerage latency

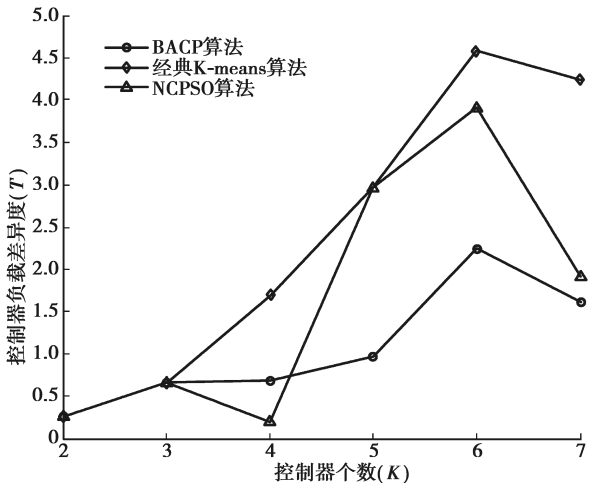


图 7　控制器负载差异度变化

Fig.7　Comparison of the AL2S topolagy partition in terms of controller load balamce index

5　结　论

提出了基于蝙蝠算法的多控制器部署方法。该方法利用蝙蝠算法的思想，通过在迭代时不断优化平均控制时延达到平均控制时延最小化；通过限制控制器负载利用率保证更控制器间负载均衡；同时，利用标签传递算法去除孤立节点保证域内通信。仿真结果表明该方法在 3 个指标上均有良好的性能，可获得合理的 SDN 多控制器部署方案。

参考文献：

[1] Heller B, Sherwood R, Mckeown N. The controller placement problem [J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review. 2012, 42(4):473-478.

[2] Sallahi A, St-hilaire M. Optimal model for the controller placement problem in software defined network [J]. IEEE Communications Letters. 2015, 19(1):30-33.

[3] Wang G, Zhao Y, Huang J, et al. A k-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala,Malaysia: IEEE,2016: 1-6.

[4] Cheng T Y, Wang M, Jia X. QoS-guaranteed controller placement in SDN[C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). London UK: IEEE 2015: 1-6.

[5] Liu S, Wang H, Yi S, et al. NCPSO: a solution of the controller placement problem in software defined networks[C]// International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing. China: Springer International Publishing, 2015: 213-225.

[6] Xiao P, Qu W, Qi H, et al. The SDN controller placement problem for WAN[C]// Communications in China (ICCC), 2014 IEEE/CIC International Conference, 2014. Qingdao, China: IEEE,220-224.

[7] 覃匡宇，黄传河，王才华，等.SDN 网络中受时延和容量限制的多控制器均衡部署[J].通信学报，2016，37(11)：90-103.
QIN Kuangyu, HUANG Chuanhe, WANG Caihua, et al. SDN networks are subject to delay and capacity constrained multi controller deployment [J]. Journal of Communications, 2016,37 (11): 90-103.

[8] Hillermeier C. Nonlinear multi-objective optimization [M].Basel: Birkhaüser Verlag, 2001.

[9] Yang X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm [J]. Computer Knowledge & Technology, 2010(284):65-74.

[10] AL2S Topology [EB/OL], Internet2 Network NOC https://noc.net.internet2.edu/i2network/advanced-layer-2-service/maps-documentation/al2s-topology.html.

[11] Yao G, Bi J, Li Y, et al. On the capacitated controller placement problem in software defined network [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(8): 1339-1342.

（编辑　侯　湘）