

生存性条件约束下的软件定义光网络控制器部署算法

曾 帅^① 钱志华^① 赵天烽^{*②} 任 彦^① 王育杰^①

^①(重庆邮电大学未来网络研究中心 重庆 400065)

^②(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

摘 要: 软件定义光网络(SDON)作为智能光网络中最新一代网络架构,其控制平面承载着诸多核心功能,其中控制平面的生存性、控制冗余和控制时延等因素对网络整体性能起到至关重要的作用。该文提出一种以生存性条件为约束的软件定义光网络(SCD)控制器部署算法,在保证用户对网络生存性需求的前提下,利用最短路径和极小支配集等数学原理来降低控制时延和减少控制器部署个数,降低控制冗余,并利用联合判决条件选择管控中心部署节点,协调控制器间的工作。实验表明:首先,所提算法可以百分之百保证用户对网络的生存性要求;其次,所提算法相对于C-MPC算法至少降低了15%的网络故障告警概率,提高了网络生存性;同时,相对于以时延为约束的部署算法减少了约40%的控制器部署个数。特别是在生存性要求较高的场景中,所提算法表现出良好的适应性。此外,管控中心的部署算法在复杂的大规模网络中,可以动态地满足用户对网络生存性不同程度的需求。

关键词: 软件定义网络; 软件定义光网络; 生存性; 控制平面

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)10-2412-08

DOI: 10.11999/JEIT190395

Software Defined Optical Network Controller Deployment Algorithm Constrained by Survivability Conditions

ZENG Shuai^① QIAN Zhihua^① ZHAO Tianfeng^{*②} REN Yan^① WANG Yujie^①

^①(Future Network Research Center, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Software-Defined Optical Network (SDON) is the latest generation network architecture in intelligent optical networks. Its control plane carries many core functions. The survivability of control plane, control redundancy and control delay are crucial to the overall performance of the network. In this paper, a Survivability-Constrained software-Defined (SCD) optical network controller deployment algorithm is proposed. Under the premise of ensuring users' network survivability requirements, mathematical principles such as shortest path and minimum dominance set are used to reduce control delay, and reduce the number of controller deployments to reduce control redundancy. A joint judgment condition is used to select the control center deployment node to coordinate the work between the controllers. Experiments show that: Firstly, the proposed algorithm can guarantee the user's survivability requirements for the network 100%. Secondly, the proposed algorithm reduces the network failure alarm probability by at least 15% compared with the C-MPC algorithm, and improves the network survivability. At the same time, about 40% of the number of controller deployments is reduced relative to the deployment algorithm with latency constraints. Especially in the scenario where the survivability requirements are high, the proposed algorithm shows good adaptability. In addition,

收稿日期: 2019-06-03; 改回日期: 2019-12-28; 网络出版: 2020-07-18

*通信作者: 赵天烽 987794678@qq.com

基金项目: 重庆市科委基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjA0743), 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800640), 国家自然科学基金(61701058)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2018jcyjA0743), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN201800640), The National Natural Science Foundation of China (61701058)

the deployment algorithm of the control center can dynamically meet the different needs of users for network survivability in a complex large-scale network.

Key words: Software Defined Network (SDN); Software Defined Optical Network (SDON); Survivability; Control plane

1 引言

近年来,我国信息通信产业高速增长,互联网规模不断扩大且业务种类逐渐繁多,由于传统网络架构中具有带宽资源、传播范围和能耗等方面的瓶颈性技术问题^[1-3],使得大型光网络必须具有能够被灵活管控的特点。软件定义光网络(Software Defined Optical Networks, SDON)是一种对软件定义网络技术(Software Defined Networks, SDN)在智能光网络控制层面的具体应用^[4],它将光网络分为数据平面和控制平面,其中数据平面专门用于业务流量的转发。控制平面主要包括用软件编程的方式进行驱动的控制平面,为各种光层资源提供统一的调度和控制能力,以实现具有庞大数据流量的光网络的动态管控。

SDON控制平面承载着整个网络的核心业务,一旦控制平面与数据平面失去联系,数据平面将很可能无法正常转发数据,从而导致光网络大范围瘫痪,尤其对大数据、云计算等高度依赖网络资源的应用产生严重的影响^[5]。因此,保证SDON的控制平面处于用户所需生存性条件的约束下,对光网络的整体性能显得至关重要。同时,成本问题也是SDON控制平面部署时一个需要考量的重要因素^[6],而控制器的数量在部署成本中占有很大比重。因此,在保证控制平面生存性和控制时延的同时,尽可能少地部署控制器,减少控制冗余,可以减少SDON控制平面部署的开销并降低控制平面的复杂度。

目前,为提高控制平面的生存性和降低控制平面的控制冗余,存在多种关于控制器部署问题的研究方案。文献^[7]中提出了基于最小割的控制器分簇部署算法(Min Cut-Centroid, MCC)以保证同一簇内控制平面的生存性,但其无法保证不同簇之间的控制平面生存性。文献^[8]提出了SVVR(SurViVoR)算法来确定控制器的部署方案,但该算法中没有考虑控制链路长度的问题,有可能产生较大的控制时延。文献^[9]中提出了基于最小点覆盖的控制器部署方案,并将控制平面分层,既避免了对单一控制器的过度依赖,也避免了控制器之间的冲突问题,但该方法只适用于静态网络中,无法根据用户需求的改变而改变控制器部署方案。为解决这个问题,文献^[10]提出了一种以控制时延为约束的控制器部署方案,在保证控制时延满足用户需求的同时也有效

地提高了控制平面的生存性。但该方法不能保证控制平面的生存性满足用户的需求,且当用户时延要求较高时,该方案会增加控制器部署的个数来满足要求。

为保证软件定义光网络中用户对控制平面生存性的需求,并在进一步减少控制时延的同时,减少控制平面控制冗余和部署成本,本文提出了一种生存性条件约束下的软件定义光网络控制器部署(SCD)算法。依照该方法设计的网络能够百分之百保证控制平面的生存性指标达到满足用户给定的要求。此外,所提算法对控制平面进行有效分级,通过合理部署管控中心实现多个控制器之间的协同工作。该方法基于弗洛伊德最短路径算法和极小支配集等数学原理和算法生成控制器的部署方案,实现了控制器对普通Openflow交换机的最短距离覆盖,在减少控制时延的同时也降低了控制平面的冗余和部署成本。

2 控制平面生存性约束下控制器的基本部署模型和设计思想

SDON网络的控制平面分为带外控制和带内控制两种通信方式^[11,12]。本文根据并延续文献^[9-12]的设定,假设网络中节点故障可利用热备份的策略恢复,控制平面采用带内控制方式,即控制平面下发的控制信令与数据平面转发的业务数据共享物理层光链路。同时,文献^[13-18]指出,无论是SDN还是SDON,链路安全对网络生存性起到关键的作用,且在带内控制方式下,一根光纤链路的故障会同时影响两个平面的性能。因此本文控制平面的部署模型主要针对光纤链路故障对网络生存性的影响而建立。

本文算法以 P_1 表示网络故障告警概率。在光纤百公里故障概率 p 确定时, P_1 代表了控制平面生存性最直接的指标和依据,并随着光网络中的平均控制链路长度的增加而增加。由此,考虑到控制链路长度对网络生存性起到决定性的作用,本文的基本设计思想如下:当 p 值和用户给定的生存性需求确定时,设计部署算法使控制链路的长度均小于某一确定值,就能够使控制平面的生存性满足用户的需求。即控制平面生存性的约束条件可以转化为控制链路长度的约束条件,也即当软件定义光网络中的控制链路最长不超过某一个值时,就可以符合用户

给定的控制平面生存性条件。同时,所设计的算法在保障用户指定的生存性条件前提下,应尽量减少总的链路长度、控制时延和控制器个数。然后,在此基础上进一步完善算法,使得整个系统依赖的总链路长度和总控制器个数尽量降低。

围绕上述设计思想,本文提出的以生存性条件为约束的控制平面部署算法的大体流程为:首先在部署控制器之前,利用文献[18]中所提的SPARC控制平面结构,将软件定义光网络分为控制器和管控中心两级,以提高控制平面的灵活性。根据与用户协商的可接受最大光网络故障概率 P_1 ,求出最大控制链路长度 W 。接着,将网络中的Openflow交换机分为不同的域,其中,同一域内的Openflow交换机之间满足控制链路长度的要求。最后,在域内选择控制器部署节点时,要尽可能做到在降低部署成本的同时增加控制冗余。

当软件定义光网络中部署了多个控制器时,为了使控制器之间协同工作,需要在网络中部署管控中心实现跨域、跨层的网络信息收集与控制平面资源调配功能。在部署管控中心时,以平均控制时延和可达链路数为联合判决条件,选取得分最高的节点位置来部署管控中心,以满足用户对网络生存性的不同需求。

如图1所示为该部署模型下的结构示意图,部署在不同域内的控制器负责控制自身域内的Openflow交换机,提高了软件定义光网络域内的生存性;各个域内的控制器由具有全局属性的管控中心负责,不仅增加了不同网络域之间的连通性,同时也提高了控制平面的域间生存性。

3 生存性约束下的部署算法

3.1 部署要求和符号定义

由前文可知,SDON中控制平面的生存性为本文部署所必须满足的前提条件。因此,在部署控制器时,必须要使控制链路长度不能超过根据用户需求所求出的长度 W 。

将SDON网络转化成无向图 $G(V, E)$,且 $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 为网络中所有节点的集合,其中 n 为网络中节点的个数; $\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ 为网络中所有边的

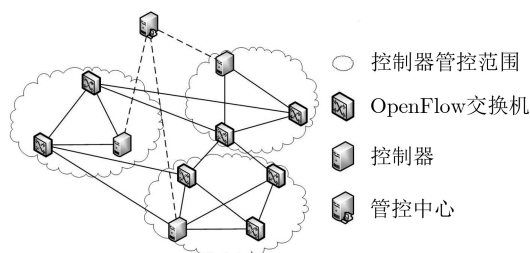


图1 控制器部署模型

集合,其中 m 为所有边的条数;设 V_{pc}^i 表示控制器部署节点中的第 i 个控制器, V_{cc} 为管控中心节点, $\{Link_1, Link_2, \dots, Link_k\}$ 为网络中所有控制链路的长度,则当 $Link_i < W, i \in (0, k)$ 时,光网络满足控制平面的生存性约束条件。

为了进一步降低控制平面的控制时延和部署成本,并在此基础上提高控制冗余,在设计部署算法时需尽量满足以下约束条件:(1)最小化SDON网络中所有Openflow交换机的控制链路长度之和,以此来降低网络中的控制时延;(2)当控制器部署节点可以通过控制链路覆盖整个网络时,选取控制器部署节点个数最小的节点集合,以此来降低控制平面的部署成本;(3)当满足条件(2)后,选取出度数最多的节点集作为控制器的部署节点,实现在保证部署成本的情况下提高控制平面的控制冗余的目的。

3.2 控制器部署步骤

生存性约束条件下的部署算法为离线静态算法,在控制平面部署之前利用该方法计算控制器和管控中心部署方案。选取控制器部署节点的具体步骤为:

步骤1 利用Floyd最短路算法,寻找 V_i 到 V_j 的最短路径及其长度,其中 $i \in (1, n), j \in (1, n)$ 。(注:当 $i = j$ 时,记该最短路径长度为0。)若出现 V_i 与 V_j 之间无可达路径的情况,则设 V_i 与 V_j 之间的最短路径长度为无穷大。

步骤2 将SDON中的Openflow交换机抽象成完全二分图 G' ,并设 V_i 与 V_j 之间连线的权值为步骤1中求出的 V_i 与 V_j 之间的最短路径长度(如图2所示)。在图2中, $L_{i,j}$ 即为步骤1中求出的 V_i 到 V_j 之间的最短路径长度。

步骤3 根据式(1)所示的网络故障概率 P_1 的计算公式,可以反推出式(2),并根据式(2)求得满足用户需求的最长控制链路长度 W 。

$$P_1 = \text{avg}_{i,j} \left[1 - (1-p)^{W(V_i, V_{pc}^j)} \right] \quad (1)$$

$$W = \frac{\ln(1-P_1)}{\ln(1-p)} \quad (2)$$

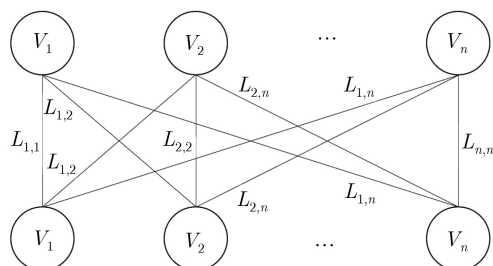


图2 Openflow交换机转换成完全二分图

其中, 式(1)中 $W(V_i, V_{pc}^j)$ 为控制器 V_{pc}^j 与其所负责的Openflow交换机 V_i 之间的控制链路长度, p 表示光纤百公里故障概率, 该值与SDON中所使用的光纤材质有关。

步骤4 以步骤3中求出的最大控制链路长度 W 为约束条件, 将 G' 中不符合 $L_{i,j} < W$ 条件的节点之间的连线删除, 形成一个新的二分图 G'' 。即在 G'' 中, 所有可达路径的长度均小于 W , 且这些路径均为节点与节点之间的最短路径。

步骤5 将 G'' 中的相同节点之间的连线删除并合并成同一个节点, 以此形成了新的网络拓扑图, 如图3所示。在新的网络拓扑中, 形成了新的抽象链路。此时, 若 V_i 与 V_j 之间具有可达路径, 则将其划分为同一区域下的节点, 反之, 则划分为不同区域下的节点。

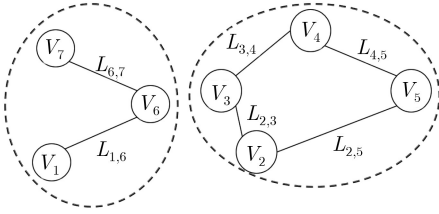


图3 新形成的网络拓扑图

步骤6 (1) 在步骤5中划分的 q 个网络域中分别寻找各自区域下极小支配集, 构成集合 $\{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_q\}$, 其中 $\psi_i = \{\phi_{i1}, \phi_{i2}, \dots, \phi_{ir}\}$ 表示第 i 个区域内共有 r 个极小支配集;

(2) 分别在 q 个区域中判断 r 的大小, 若 $r = 1$, 则该极小支配集为其所在区域控制器的部署节点位置; 若 $r > 1$, 则在 $\{\phi_{i1}, \phi_{i2}, \dots, \phi_{ir}\}$ 中选取节点数最少的极小支配集组成集合 $\{\phi'_{i1}, \phi'_{i2}, \dots, \phi'_{it}\}$, 以此来降低控制平面的部署成本;

(3) 继续在各个区域中判断 t 的大小, 若 $t = 1$, 则该极小支配集为其所在区域控制器的部署节点位置; 若 $t > 1$, 则在 $\{\phi'_{i1}, \phi'_{i2}, \dots, \phi'_{it}\}$ 中计算每个 ϕ'_{ij} 中所有节点的出度数, 并选取总的出度数最大的 ϕ'_{ij} 作为控制器的部署节点集, 以此来提高在部署成本最小化时控制平面的控制冗余。

3.3 管控中心部署步骤

在软件定义光网络中, 管控中心对控制器下发信令时必须具有实时性, 否则会造成网络拥塞, 资源分配错误等问题, 导致网络性能下降。同时, 为了节约部署成本, 在多控制器情况下, 本文只部署一个管控中心, 因此管控中心与控制器之间应该存在一定的控制冗余, 以减低控制器与管控中心失联的概率。

综上所述, 本文在部署管控中心时, 将平均往

返时延和可达路径数同时作为判决条件, 部署步骤如下:

步骤1 当控制器部署完成后, 设控制器部署节点为 $\{V_{pc}^1, V_{pc}^2, \dots, V_{pc}^u\}$ 。根据之前求得的最短路径, 分别计算 V_{pc}^i 到其他控制器节点的平均链路长度 $\bar{D}_i = \text{avg} \sum_{j=1}^u D_{ij}$, 其中 D_{ij} 为节点 V_{pc}^i 到节点 V_{pc}^j 的最短路径长度。并记录 $D_{\max} = \max(\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_u)$, $D_{\min} = \min(\bar{D}_1, \bar{D}_2, \dots, \bar{D}_u)$ 。

步骤2 计算节点 V_{pc}^i 到其他控制器节点的无环路数之和(若两条可达路径中含有重复链路, 则记为同一条路径) $N_i = \sum_{j=1}^u N_{ij}$, 其中 N_{ij} 为节点 V_{pc}^i 到节点 V_{pc}^j 的无环路径数, 并记录 $N_{\max} = \max(N_1, N_2, \dots, N_u)$ 。

步骤3 以式(3)为判决依据, 分别计算每个节点的得分值 S_i 。其中, 式(3)中 $(\bar{D}_{\max} - \bar{D}_i)/(\bar{D}_{\max} - \bar{D}_{\min})$ 为时延的判决依据, 当 \bar{D}_i 越小时(即控制时延越小时), 该值越高。 N_i/N_{\max} 为控制冗余的判决依据, 当 N_i 越大时(即控制冗余越多时), 该值越高。由于 P_1 为用户所给的能够接受网络出现故障概率的最大值, 因此, 当 P_1 越小时, 代表用户能接受网络出现故障的概率越小, 意味着用户对网络生存性的重视程度越高, 则需要的控制冗余越多。所以在进行联合判决时, 控制冗余所采用的比重系数为 $(1 - P_1)$, 时延部分采用的比重系数为 P_1 。接着利用式(4)选取得分最高的节点作为部署管控中心的节点。

$$S_i = P_1 \frac{\bar{D}_{\max} - \bar{D}_i}{\bar{D}_{\max} - \bar{D}_{\min}} + (1 - P_1) \frac{N_i}{N_{\max}} \quad (3)$$

$$\arg \max(S_1, S_2, \dots, S_u) \quad (4)$$

3.4 算法复杂性分析及优势分析

本文提出的以生存性为约束条件的软件定义光网络控制器部署算法(SCD算法)属于离线算法, 需要在控制器部署之前, 将SDON网络拓扑的实际信息代入本算法中, 计算出控制器所需要部署的节点、每个控制器所负责的相应Openflow交换机、控制链路、管控中心部署节点以及管控中心与控制器之间的控制链路等信息。

如下对控制器的主要部署算法进行时间复杂性分析: 在控制器部署算法中, 步骤1主要采用弗洛伊德最短路径算法计算任意两点间最短路径及其长度, 因此这一步与弗洛伊德最短路径算法的时间复杂度相同, 为 $O(n^3)$ 。步骤2将所有节点转化为完全二分图并标记其路径所需要的算法复杂度最高为 $O(n^2)$ 。步骤3中利用式(1)计算网络故障概率 P_1 需要遍历所有的节点两两之间的最短路径的长度, 以及步骤4中需要判断每条链路是否满足长度要求,

复杂度均为 $O(n^2)$ 。步骤5中形成新的网络拓扑的同时需要遍历所有抽象链路并划分区域。因为抽象链路的数目明显小于实际链路的数目,所以复杂度小于 $O(n^2)$ 。步骤6中为确定最佳的控制器部署位置,需要首先求解出 q 个区域的极小支配集集合,然后遍历每个区域的结果并选取其中最符合部署要求的解。其中 $q \leq n$,且每个区域中的节点数小于 n ,所以在求解极小支配集时的算法复杂度小于 $O(n^2)$,同时 $t \leq r \leq n$,因此在遍历选取最优解时的算法复杂度 $O(q \times r \times t) < O(n^3)$ 。

在管控中心的部署算法中,由于控制器个数小于网络节点个数 n ,所以步骤1、步骤2中寻找两两节点间的最短路径长度和无环路径数的时间复杂度均小于 $O(n^3)$ 。

此外,本文所提算法的步骤之间为串行关系,即每一步利用上一步运行完成后产生的结果进行计算。综上所述,控制器部署的最高时间复杂度为 $O(n^3)$ 。虽然本算法时间复杂度较高,但离线算法的性质大大减轻了SDON网络在运行过程中的计算压力,为网络中的其他业务节约了更多资源。

如前所述,本算法能够百分之百满足用户对控制平面生存性需求。证明如下:假设用户选取了 k 条控制链路,再假设利用上述 k 条链路对网络生存性进行评估求得的网络故障概率为 $P_1' = \text{avg}[1 - (1 - p)^{\text{Link}_i}]$ 。由于 W 由式(1)反推得出,因此 $P_1 = 1 - (1 - p)^W$ 。由控制器部署算法步骤5可知, $\{\text{Link}_1 < W, \text{Link}_2 < W, \dots, \text{Link}_k < W\}$, 因此 $1 - (1 - p)^{\text{Link}_i} < 1 - (1 - p)^W, i \in (1, k)$, 得出 $P_1' < P_1$, 即证明所提算法可以百分之百满足用户对生存性的需求。

综上,本算法具有以下优势:(1)百分之百满足用户对SDON网络中控制平面的生存性要求,这点是其他算法所不具有的。即用户只需给定可接受的系统故障概率,算法即可自动生成满足要求的整体控制器部署方案。(2)利用二分图和最短路径算法在控制链路长度的约束下将原始网络拓扑划分为不同的网络域,有效地降低了控制平面的控制时延。(3)利用优化路径的极小支配集方法,一方面,控制了控制器数量,降低了部署成本;另一方面,在各网络域中分别确定控制器部署位置,扩充了控制平面的保护冗余,降低了故障概率。并且,也为日后扩展为分布式计算框架预留了接口,有利于在大规模网络场景下实施算法。

4 仿真结果及分析

本文使用北美NSF网络拓扑(14个节点,21条边)和泛欧COST239网络拓扑(11个节点,26条

边)作为仿真环境。并与文献[9]中所提出的基于最小点覆盖的C-MPC算法和文献[10]中提出的以控制时延为约束条件的控制器部署算法(DCD)作对比,将着重在SDON网络生存性和控制器部署成本两个方面进行比较。

由于本文所提算法以控制平面的生存性为约束条件,而该条件可以转化为控制链路长度的约束条件。在DCD算法中,以控制时延为约束条件同样可以转化为以最长控制链路长度为算法的约束条件。本文在上述内容的基础上,根据光纤百公里故障概率 p 和用户提供的网络最大故障概率 P_1 而求得最长控制链路长度 W 作为本文算法的约束条件,并将 W 同时作为以时延为约束的部署算法的约束条件。

如图4所示,为DCD算法和本文所提的SCD算法在相同最长控制链路长度的约束下,在不同网络中的控制器部署个数的比较。分析图4可知,控制器的部署个数随着用户对网络生存性的需求下降(P_1 升高)而减少,且在不同参数和不同网络拓扑中SCD算法的控制器个数的部署情况均要优于DCD算法。由此可见在常规场景下,本文算法可以降低40%的控制器部署个数。同时,可以观察到,在COST239网络中,随着用户的需求降低,DCD算法中控制器的个数减少得较快,甚至有时与本文算法持平,这是由COST239网络相对于NSF网络连通度较高且链路长度相对较短导致的。

根据式(1)所示的计算网络故障概率的公式,图5所示的分别是在COST239网络和NSF网络中,在不同参数值的约束下,生成部署方案后,利用式(1)对采取这些部署方案的网络随着光纤百公里故障概率从0至0.1重新进行的可靠性的评估。其中DCD算法中最长控制链路约束条件与本文算法相同。

分析图5可以得知,本文部署算法在网络生存性方面相对于C-MPC算法大约降低了15%的故障概率,且与DCD算法相差无几,但这是因为DCD算法在设计时牺牲了高生存性要求网络下的控制器部署成本,并以此来提高网络的生存性。进一步分析图5(d)可以看出,当生存性要求达到某一界限后,DCD的算法在每个Openflow交换机节点都部署1台控制器,使得网络故障概率为零。而SCD算法在较高生存性要求的网络中,不仅满足了用户对网络生存性的要求,而且依然能够有效地降低部署成本。

如图6所示为部署相同控制器个数时,应用3种部署算法的网络故障概率变化图。由图6(a)可以看出,3种算法在网络的可靠性方面基本持平,这是因为在COST239网络拓扑中,节点个数较少,边数较多,且节点之间的距离较短,因此不能较明显

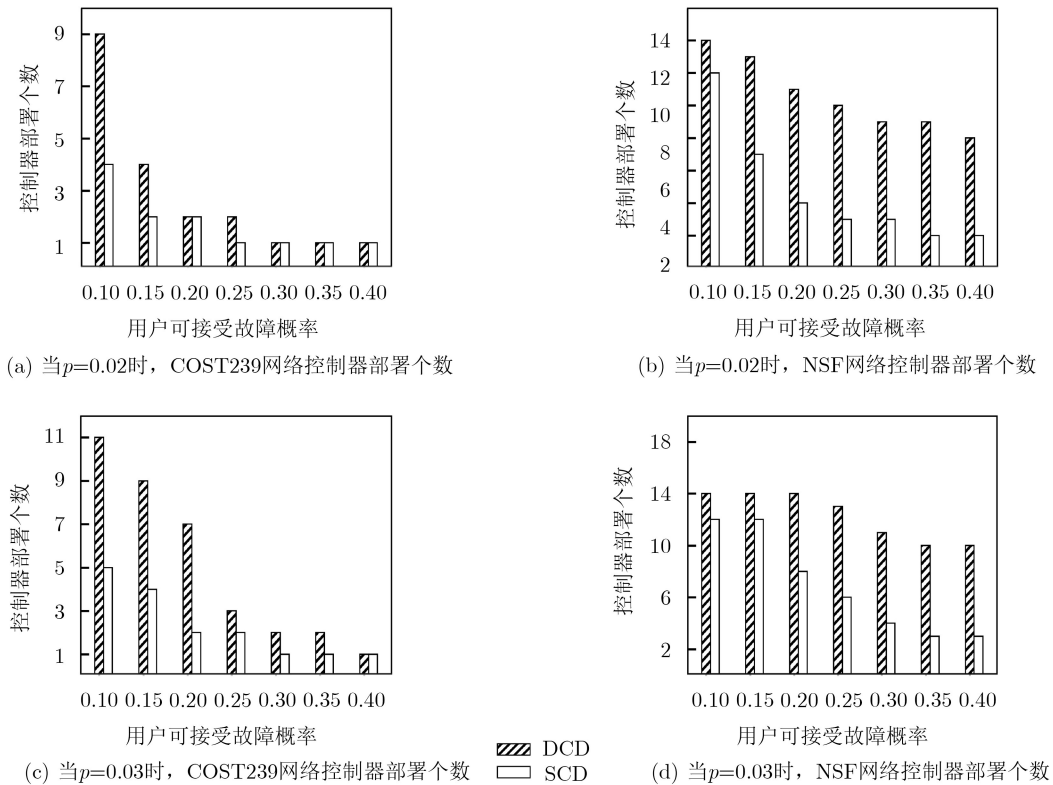


图4 最长控制链路约束同时, 两种算法的部署成本比较

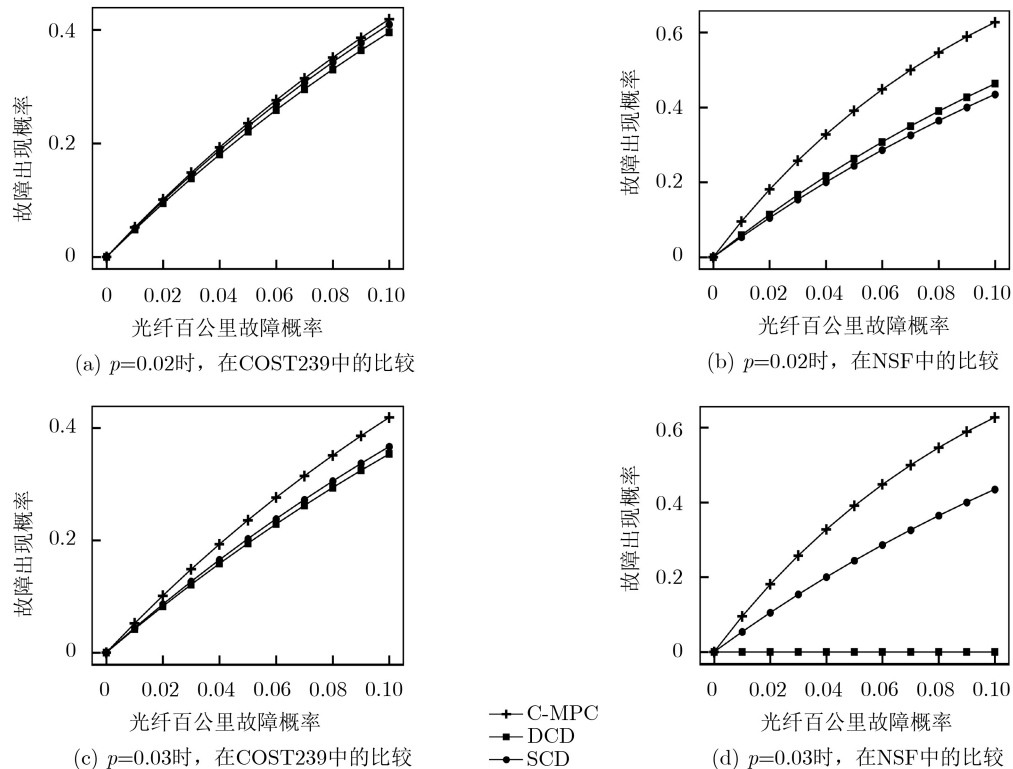


图5 相同路径长度约束下, 3种部署算法的可靠性比较

地区分算法之间的优劣。而在连通度较低, 且链路长度较长的NSF网络中(图6(b)所示), 本文算法明显优于前两种算法, 使网络具有良好的性能。

本文随机生成了10个网络拓扑, 且每个拓扑中

均含有30~50个网络节点, 以更好地体现该算法动态满足用户需求的特点, 并在这些拓扑中将本文算法与文献[10]中所提的只以时延为判决条件的管控中心部署算法进行了比较。如图7所示是在一个包

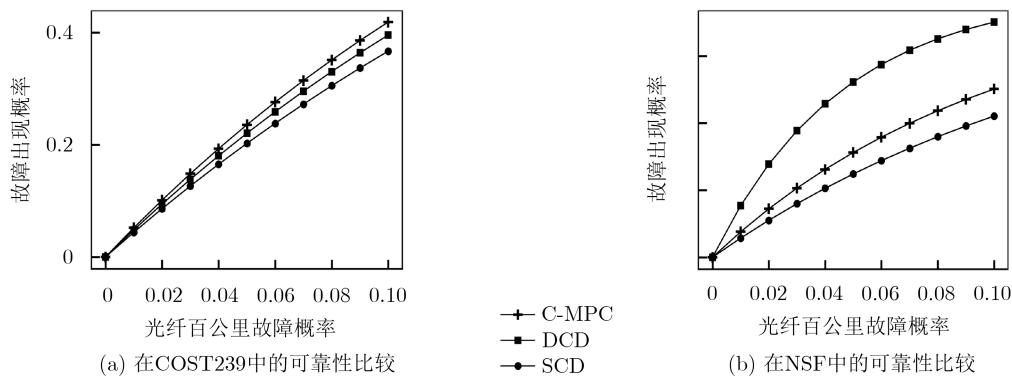


图6 相同控制器个数下, 3种部署算法的可靠性比较

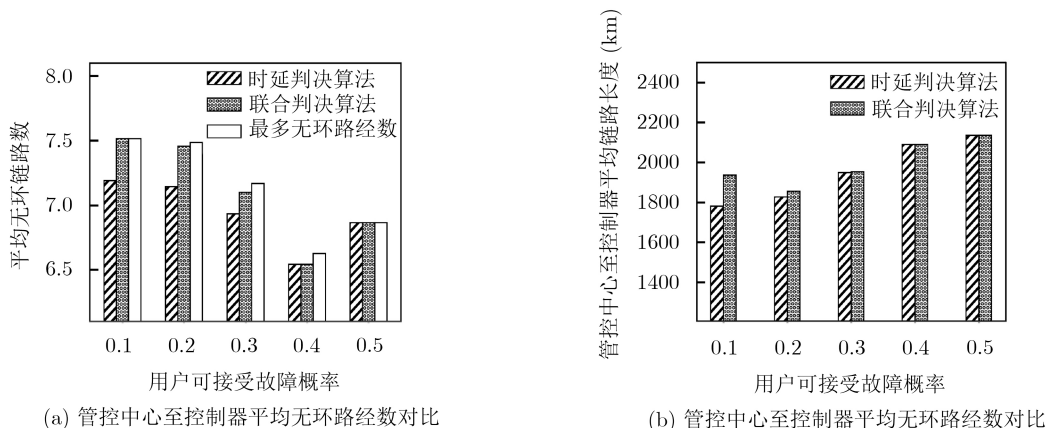


图7 两种管控中心部署对比

含40个节点的网络拓扑中, 两种管控中心部署算法的性能比较。其中图7(a)和图7(b)分别表示两种算法下管控中心至控制器的平均无环路径数和控制链路长度对比。可以从图中分析出当用户可接受故障概率 P_1 较低时, 表示用户对网络生存性的重视程度较高, 本文算法选取控制冗余最多的节点来部署管控中心, 以提高网络的生存性。随着 P_1 即用户对网络出现故障容忍程度的增加, 本文算法在判决时随之降低控制冗余所占的比重, 逐渐选取控制链路长度最短的节点作为管控中心部署节点。

以上分析可以体现出该算法相对于仅以时延为判决条件的部署算法在生成管控中心部署方案时, 可以根据用户需求的改变而改变部署方案, 动态地调整网络不同方面的性能。

5 结束语

为满足用户对软件定义光网络中控制平面生存性的需求, 并在此基础上降低控制平面的部署成本, 本文提出了软件定义光网络中以控制平面生存性为约束条件的控制器部署(SCD)算法。首先, 将SDON控制平面合理划分为两级管控模型, 即控制器和管控中心。在生成控制平面部署方案时, 利用二分图, 弗洛伊德最短路径和极小支配集等数学原

理计算控制器的部署节点, 接着利用控制时延和可达路径为联合判决条件在控制器部署节点中确定管控中心部署节点。通过对本文算法以及两种比较算法的仿真实验和仿真结果的分析, 表明本文所提算法在百分之百保障用户指定的网络生存性需求前提下, 仍较前者在网络生存性和部署成本方面有大约15%和40%的改善和提高。且所提算法优势在生存性要求较高的设计中表现得更是尤为明显。

参考文献

- [1] 徐云斌, 李宏发, 林屹, 等. 软件定义光传送网控制器测试方法研究[J]. 光通信研究, 2018, 44(2): 8-10. doi: 10.13756/j.gtxyj.2018.02.003.
XU Yunbin, LI Hongfa, LIN Yi, et al. Research on the testing method for software defined optical transport network controller[J]. *Study on Optical Communications*, 2018, 44(2): 8-10. doi: 10.13756/j.gtxyj.2018.02.003.
- [2] 梁思远, 杨武军. SDON中路径建立和资源分配研究[J]. 光通信技术, 2017, 41(9): 5-8.
LIANG Siyuan and YANG Wujun. Study of paths establishing and resources allocation in SDON[J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(9): 5-8.
- [3] 纪越峰, 张杰, 赵永利. 软件定义光网络(SDON)发展前瞻[J].

- 电信科学, 2014, 30(8): 19–22, 41. doi: [10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.003).
- JI Yuefeng, ZHANG Jie, and ZHAO Yongli. Development prospects of software defined optical networks[J]. *Telecommunications Science*, 2014, 30(8): 19–22, 41. doi: [10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.003).
- [4] 刘承良. SDON的发展趋势综述[J]. 计算机与网络, 2018, 44(13): 44–45. doi: [10.3969/j.issn.1008-1739.2018.13.035](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1739.2018.13.035).
- LIU Chengliang. SDON's development trend review[J]. *Computer & Network*, 2018, 44(13): 44–45. doi: [10.3969/j.issn.1008-1739.2018.13.035](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1739.2018.13.035).
- [5] LU Ping, ZHANG Liang, LIU Xiahe, *et al.* Highly efficient data migration and backup for big data applications in elastic optical inter-data-center networks[J]. *IEEE Network*, 2015, 29(5): 36–42. doi: [10.1109/MNET.2015.7293303](https://doi.org/10.1109/MNET.2015.7293303).
- [6] THYAGATURU A S, MERCIAN A, MCGARRY M P, *et al.* Software defined optical networks (SDONs): A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2738–2786. doi: [10.1109/COMST.2016.2586999](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2586999).
- [7] ZHANG Ying, BEHESHTI N, and TATIPAMULA M. On resilience of split-architecture networks[C]. 2011 IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, USA, 2011: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2011.6134496](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2011.6134496).
- [8] MÜLLER L F, OLIVEIRA R R, LUIZELLI M C, *et al.* Survivor: An enhanced controller placement strategy for improving SDN survivability[C]. 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, USA, 2014: 1909–1915.
- [9] 熊余, 董先存, 李圆圆, 等. 软件定义光网络中基于最小点覆盖的控制平面跨层生存性设计[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5): 1211–1218.
- XIONG Yu, DONG Xiancun, LI Yuanyuan, *et al.* The cross-layer survivable design of control plane based on minimum point covering in software defined optical network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(5): 1211–1218.
- [10] 曾帅, 盖绍聪, 张毅, 等. 软件定义光网络中一种时延约束的控制器生存性部署方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1727–1734.
- ZENG Shuai, GAI Shaocong, ZHANG Yi, *et al.* Survivability deployment method for controller with time-delay constraint in software defined optical network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1727–1734.
- [11] SHARMA S, STAESSENS D, COLLE D, *et al.* In-band control, queuing, and failure recovery functionalities for openflow[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(1): 106–112. doi: [10.1109/MNET.2016.7389839](https://doi.org/10.1109/MNET.2016.7389839).
- [12] FONSECA P C and MOTA E S. A Survey on fault management in software-defined networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2284–2321. doi: [10.1109/COMST.2017.2719862](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2719862).
- [13] CAPONE A, CASCONI C, NGUYEN A Q T, *et al.* Detour planning for fast and reliable failure recovery in SDN with OpenState[C]. The 11th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks, Kansas City, USA, 2015: 25–32.
- [14] CHENG Zijing, ZHANG Xiaoning, Li Yichao, *et al.* Congestion-aware local reroute for fast failure recovery in software-defined networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(11): 934–944. doi: [10.1364/JOCN.9.000934](https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000934).
- [15] XIONG Yu, LI Yuanyuan, ZHOU Bin, *et al.* SDN enabled restoration with triggered precomputation in elastic optical inter-datacenter networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(1): 24–34. doi: [10.1364/JOCN.10.000024](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000024).
- [16] CHENG Zijing, ZHANG Xiaoning, SHEN Shaohui, *et al.* T-trail: Link failure monitoring in software-defined optical networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(4): 344–352. doi: [10.1364/JOCN.10.000344](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000344).
- [17] LIU Xu, LIU Qing, PENG Dili, *et al.* Service risk analysis for power communication over optical transport networks based on link failure[C]. The 16th International Conference on Optical Communications and Networks, Wuzhen, China, 2017: 1–3.
- [18] LI Mingzheng, WANG Xiaodong, TONG Haojie, *et al.* SPARC: Towards a scalable distributed control plane architecture for protocol-oblivious SDN networks[C]. The 28th International Conference on Computer Communication and Networks, Valencia, Spain, 2019: 1–9.
- 曾 帅: 男, 1982年生, 博士, 讲师, 研究方向为软件定义网络、机器学习、移动互联网。
- 钱志华: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为软件定义网络。
- 赵天烽: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为光纤通信网络、软件定义网络。
- 任 彦: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为软件定义网络。

责任编辑: 陈 倩