

基于协同迁移进化的自适应网络遥测路径编排方法

郝炳炜, 崔允贺, 钱清, 申国伟, 郭春

引用本文

郝炳炜, 崔允贺, 钱清, 申国伟, 郭春 [基于协同迁移进化的自适应网络遥测路径编排方法](#) [J]. 计算机科学, 2023, 50(7): 270-277.

HAO Bingwei, CUI Yunhe, QIAN Qing, SHEN Guowei, GUO Chun. [APPOINTER: Adaptive Network Telemetry Path Orchestration Method Based on Cooperative Migration Evolution](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(7): 270-277.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于深度学习的勒索软件早期检测方法](#)

Ransomware Early Detection Method Based on Deep Learning

计算机科学, 2023, 50(3): 391-398. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220200182>

[一种基于漏洞威胁模式的网络表示学习算法](#)

Network Representation Learning Algorithm Based on Vulnerability Threat Schema

计算机科学, 2020, 47(7): 292-298. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190600156>

[基于粒子群算法的弹簧-阻尼系统PID控制器优化设计](#)

Optimization Design of PID Controller for Spring Damper System Based on Particle Swarm Algorithm

计算机科学, 2015, 42(Z11): 529-531.

[一种基于权重属性熵的分类匿名算法](#)

Classification Anonymity Algorithm Based on Weight Attributes Entropy

计算机科学, 2017, 44(7): 42-46. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.008>

基于协同迁移进化的自适应网络遥测路径编排方法

郝炳炜^{1,2} 崔允贺^{1,2} 钱清³ 申国伟^{1,2} 郭春^{1,2}

1 贵州大学计算机科学与技术学院 贵阳 550025

2 公共大数据国家重点实验室(贵州大学) 贵阳 550025

3 贵州财经大学信息学院 贵阳 550025

(1171782907@qq.com)

摘要 日趋庞大、复杂、高速的网络使得传统网络测量技术已经不能满足当下网络智慧管控的需求。作为一种新型网络测量技术,网络遥测可以提供细粒度、精确的会话级或报文级遥测信息。目前已有的网络遥测方案在部署网络遥测路径时不考虑网络状态,大多以静态的方式部署网络遥测路径。这种方法无法适应网络的动态性及不可靠性,如果网络遥测包所经路径出现带宽饱和或者遭遇网络攻击,则会造成网络遥测包丢失,使得网络遥测可靠性变差。除此之外,现有网络遥测方案通常采用全链路覆盖方式实现,遥测冗余较大,探针数据包的有效载荷较低。为了解决上述问题,文中提出了基于协同迁移进化的自适应网络遥测路径编排方法(Adaptive network telemetry Path Orchestration method based on Cooperative Migration Evolution, AP-POINTER)。APPOINTER 根据网络状态信息,计算能够覆盖全部网络设备的最优网络遥测路径,以转发遥测报文。实验结果表明,APPOINTER 增强了网络遥测的可靠性,有效避免了遥测冗余,提高了遥测效率。

关键词: 网络遥测;路径编排;协同迁移进化

中图分类号 TP393

APPOINTER: Adaptive Network Telemetry Path Orchestration Method Based on Cooperative Migration Evolution

HAO Bingwei^{1,2}, CUI Yunhe^{1,2}, QIAN Qing³, SHEN Guowei^{1,2} and GUO Chun^{1,2}

1 School of Computer Science and Technology, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 State Key Laboratory of Public Big Data (Guizhou University), Guiyang 550025, China

3 School of Information, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China

Abstract The increasingly large, complex and high-speed network makes the traditional network measurement technology cannot meet the current demand of intelligent network control. As a new network measurement technology, network telemetry can provide fine-grained and accurate session-level or message-level telemetry information. The existing network telemetry solutions do not consider the network state when deploying the network telemetry path, and deploy the network telemetry path in a static manner. These approaches cannot adapt to the dynamic and unreliable nature of the network. If the routing path that transfers the network telemetry packets is facing with network attacks or saturated, the network telemetry packets will be lost, and the reliability of network telemetry will decreased. In addition, the existing network telemetry methods are usually implemented by traversing all links, causing large telemetry redundancy and relatively low probe packet payload. To solve the above problems, this paper proposes APPOINTER, an adaptive network telemetry path scheduling method based on cooperative migration evolution. APPOINTER calculates the optimal network telemetry path that can traverses all network devices to forward telemetry messages based on network state information. Experimental results show that APPOINTER enhances the reliability of network telemetry, effectively avoids telemetry redundancy, and improves telemetry efficiency.

Keywords Network telemetry, Path orchestration, Cooperative migration evolution

1 引言

网络测量技术是各种网络功能的基础。传统的网络测量

方法通常使用包采样或获取流表项方式来实现,存在信息采集效率低下、查询延迟较高、开销大等问题,不适用于大规模的复杂网络^[1-2]。随着可编程数据平面技术的出现,网络遥测

到稿日期:2022-05-29 返修日期:2022-10-21

基金项目:国家自然科学基金(62102111);贵州省科技计划项目([2020]1Y267);贵州大学引进人才项目((2019)52)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62102111), Science and Technology Project of Guizhou Province([2020]1Y267) and Talent Introduction Project of Guizhou University((2019)52).

通信作者:崔允贺(yhcui@gzu.edu.cn)

成为了网络测量领域的新兴代表,受到学术界和产业界的广泛关注^[3]。其代表性技术带内网络遥测(In-band Network Telemetry, INT)通过将网络设备的状态信息封装到探测数据包中,实现了细粒度和精确的网络监测,不需要控制平面的额外干预,扩展性得到较大改善^[4]。但 INT 只能跟随业务数据包监测特定路径的网络状态数据,检测范围有限,难以获得全局网络视图^[5]。

为了实现全网范围的网络遥测, Pan 等提出了 INT-path, 实现了全网流量监控的遥测框架^[6]。Liu 等设计了主动网络遥测平台 NetVision, 提高了遥测覆盖性和可扩展性^[7-8]。为了获取链路状态, 上述两种遥测框架利用图论知识实现网络链路全覆盖, 但这些方法使网络中的某些设备节点被多次遥测, 面临网络遥测信息冗余的问题。遥测信息冗余一方面会使探测数据包有效载荷比降低, 遥测开销增大; 另一方面冗余的遥测信息会占用过多的链路带宽, 引起额外的延迟, 造成较大的网络开销。

此外, 现有的网络遥测路径编排方案通常不考虑网络状态, 仅根据网络拓扑结构计算静态路径。在上述情况下, 当网络处于轻载状态时, 由于链路网络状态的差异, 遥测数据包端到端的时延抖动过大。当网络处于重载状态时, 遥测数据包排队时延过长, 甚至会出现丢包现象, 极大地影响了网络遥测性能。

综上所述, 现有的网络遥测路径编排方案主要存在如下两个问题:

(1) 现有方法大多根据网络拓扑结构生成无向连通图, 运用图论知识计算静态网络遥测路径。因此, 现有方法在计算网络遥测路径时, 并未考虑网络状态, 因此其可靠性较差。

(2) 现有方法通过覆盖全部链路来计算网络遥测路径, 导致某些设备节点被重复遥测, 这可能会造成遥测冗余问题, 对网络遥测性能产生影响。

为了解决上述问题, 本文提出了 APPOINTER, 以提高网络遥测效率, 减少遥测开销, 保证网络遥测的可靠性。本文的贡献如下:

(1) 提出了基于协同迁移进化的自适应网络遥测路径编排方法——APPOINTER。APPOINTER 设计了一种新的协同迁移进化方法, 包括一种网络遥测个体内部变异及边界变异策略以及一种基于种群多样性的种群初始化和个体迁移策略。

(2) APPOINTER 将动态网络参数融入静态网络拓扑, 基于此设计了网络遥测路径个体适应度, 寻找当前网络中的最优网络遥测路径, 保证网络遥测的可靠性, 此外, APPOINTER 要求网络遥测路径包含全部设备节点仅一次, 避免遥测信息冗余。

(3) 对提出的 APPOINTER 进行了相关实验, 实验结果表明 APPOINTER 避免了网络遥测信息冗余, 提高了网络遥测可靠性。

2 相关工作

一些研究者提出了网络遥测路径规划方法。Castanheira 等提出了高效数据收集系统, 该系统根据网络各节点的紧邻

度将网络细分为集群, 对各集群网络拓扑运行深度优先搜索算法(Depth First Search, DFS), 获得遍历该集群的路由路径^[9]。

Pan 等提出的 INT-path 将路径规划解耦为路由机制和路径生成策略, 通过源路由技术将 INT 路径嵌入探测数据包, 允许指定探测包的路由路径。该方法的路径生成策略包括深度优先搜索和基于欧拉轨迹的算法, 旨在生成覆盖整个网络链路的最小非重叠路径数。基于欧拉轨迹的算法受限于网络中奇顶点个数, 限制了其适用性和扩展性。NetVision 采用段路由进行路由控制, 通过 Hierholzer 算法计算遥测路径以覆盖整个网络链路。该方法在 $O(E)$ 时间内计算从单探测点出发的欧拉回路, 但 Hierholzer 算法没有考虑所产生 INT 路径中的环路问题, 使得遥测冗余过大。上述两种方法利用图论知识生成覆盖整个网络链路的遥测路径, 但全路径覆盖的网络遥测路径将会导致网络遥测信息冗余问题, 造成了较大的遥测开销, 引入了额外的遥测延迟。

NetView 中, 探测数据包可以通过携带额外的遥测数据间接获取链路状态, 不需要覆盖每条网络链路, 其利用简单路径覆盖所有网络节点实现网络全局可视化^[10]。Simsek 等提出了 GPINT, 使用图像分割算法对最小化路径数、平衡多路径、减少遥测冗余等多个目标进行优化, 实现了高效的网络监测^[11]。

上述方法都基于网络拓扑结构计算静态路径, 没有将网络状态作为路由路径规划的因素。若探测包所经路径带宽饱和和、拥堵、出现链路故障或者遭遇网络攻击, 则会造成探测包丢失, 使网络遥测的可靠性大大降低。

3 基于协同迁移进化的自适应网络遥测路径编排方法 (APPOINTER)

3.1 APPOINTER

3.1.1 问题建模

如前文所述, 为实现高可靠、无冗余的网络遥测, 本文提出的 APPOINTER 需满足如下要求: (o_1) 遥测路径包含全部设备节点仅一次; (o_2) 结合静态网络拓扑及动态网络参数, 寻找当前网络中的最优遥测路径。

针对上述设计要求, 本文对网络遥测路径编排问题进行数学建模。给定一个网络 $G=(V, E, f)$ 。 $V=\{v_1, \dots, v_m\}$ 为网络设备集合, $E=\{(v_i, v_j) | i \neq j\}$ 为链路集合, f 是链路集合的赋权函数。 $f(v_i, v_j)=\zeta_{ij}$, ζ_{ij} 为链路成本, $\zeta_{ij}=\sum_{k=1}^{\lambda_k} \lambda_k c_k$ 。其中 c_k 代表链路状态参数, λ_k 代表链路状态参数影响因子。链路状态参数包括链路带宽利用率、链路传输时延、交换机端口队列占用率、丢包率、可用带宽等。一条网络遥测路径 p 是包含所有顶点仅一次的有序序列, 即 $p=(a_1, \dots, a_m)$, $a_i \in V$, 且对于任意的 i 和 j 满足 $i \neq j, 1 \leq i, j \leq m, a_i \neq a_j$ 。本文定义 l 为路径 p 的成本, 即 $l=\sum_{i=1}^{m-1} f(a_i, a_{i+1})$, $a_i \in p$ 。在 G 上进行的最优网络遥测路径规划是在遥测路径集合 $P=\{p_1, \dots, p_n\}$ 中寻找具有最低成本的网络遥测路径 p_{\min} , 即 $\forall p_i \in P, l_{p_i} \geq l_{p_{\min}}$ 。

综上所述, 网络遥测路径计算问题是典型的哈密顿路径

问题,属于 NP 完全问题。因此,本文提出了一种协同迁移进化策略,对该问题进行求解,寻找当前网络中的最优网络遥测路径。

3.1.2 网络遥测路径编码策略

所设计的协同迁移进化策略首先对网络遥测路径进行编码。本文首先对网络拓扑中的节点进行唯一标识命名,命名后的拓扑节点代表网络遥测基因点 $V = \{v_1, \dots, v_m\}$,由全部的基因点排列组合形成遥测染色体。本文使用线性表结构以及严格的前驱后继关系对染色体进行存储,最终形成具有唯一性的遥测染色体序列 $p = (a_1, \dots, a_m)$, $a_i \in V$,即遥测个体,每个遥测个体代表遍历全网络设备的一条可行遥测路径。每个个体需满足如下约束条件:

$$\forall (a_i, a_{i+1}) \in E, 0 \leq i \leq m-1 \quad (1)$$

$$\forall i \neq \forall j, 1 \leq i, j \leq m, a_i \neq a_j \quad (2)$$

其中, a_i 表示遥测个体中的第 i 个遥测基因点。式(1)表示遥测个体中相邻遥测基因点的组合必须存在于链路集合 E 中。式(2)表示遥测个体中不存在相同的遥测基因点。根据上述定义,设计的遥测个体适应度函数如下:

$$F(p) = \frac{\vartheta}{\sum_{i=1}^{m-1} f(a_i, a_{i+1})} \quad (3)$$

其中, ϑ 为适应度系数, $f(a_i, a_j)$ 为链路成本。遥测个体适应度越高,相应的网络遥测路径成本越低。

3.1.3 网络遥测个体交叉策略

本文对遥测个体进行单点交叉以产生新的遥测个体,跳出局部最优解。采用单点交叉策略的步骤如下。

(1)计算遥测个体间的相似度。为了防止两个极为相似的遥测个体进行交叉操作,使算法陷入局部最优,本文引入了遥测相似度概念,通过对遥测种群内个体的相似度进行计算,维持遥测种群多样性。交叉操作之前对选中的两个遥测个体进行相似度计算,若相似度高于设定的遥测相似度阈值,则放弃本次交叉操作。

对 $p_1 = (a_1, \dots, a_m)$, $p_2 = (b_1, \dots, b_m)$ 两个个体进行遥测相似度计算的步骤如下:

1)建立遥测个体的基因点连接矩阵,矩阵中 a_{ij} 为 1 代表遥测路径中设备节点 i 和 j 之间连通,为 0 代表遥测路径中设备节点 i 和 j 之间非连通。根据遥测个体内严格的前驱后继关系建立基因点连接矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2m} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \dots & b_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & b_{m3} & \dots & b_{mm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2)根据两个遥测个体的基因点连接矩阵计算相似度。

$$simi(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \frac{1}{2|E|} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sqrt{(a_{ij} - b_{ij})^2} \quad (6)$$

其中, $|E|$ 表示链路数量, a_{ij} 或 b_{ij} 表示遥测路径中设备节点 i 和 j 之间是否连通。

(2)交叉操作。对于交叉点 $2 \leq i \leq m-2$, $p_1 = (a_1, \dots, a_m)$, $p_2 = (b_1, \dots, b_m)$ 可以进行交叉。当且仅当进行交叉的两个遥测个体交叉点之前和之后拥有的遥测基因点相同、前驱后继关系不同,且遥测个体交叉点和另一遥测个体交叉点之后基因点之间完全连通。满足的约束条件如下:

$$\{a_1, \dots, a_i\} = \{b_1, \dots, b_i\} \quad (7)$$

$$(a_1, \dots, a_i) \neq (b_1, \dots, b_i) \quad (8)$$

$$(a_{i+1}, \dots, a_m) \neq (b_{i+1}, \dots, b_m) \quad (9)$$

$$(a_i, b_{i+1}) \in E \vee (b_i, a_{i+1}) \in E \quad (10)$$

式(7)表示两个遥测个体交叉点前后的遥测基因点集合相同,式(8)表示两个遥测个体交叉点前的遥测基因点序列不同,式(9)表示两个遥测个体交叉点后的遥测基因点序列不同,式(10)表示 a_i 和 b_{i+1} 代表的设备节点之间连通。

3.1.4 网络遥测个体变异策略

为了提高算法的局部搜索能力,保持遥测种群的多样性,本文采用遥测个体内部变异和边界变异相结合的变异策略来进行网络遥测变异操作。

(1)遥测个体内部变异策略。对于变异点 $2 \leq i \leq m-2$, 遥测个体 $p = (a_1, \dots, a_m)$ 进行内部变异操作。变异点之后的基因序列 $p_{ori} = (a_{i+1}, \dots, a_m)$ 重新排列组合并严格遵循前驱后继关系形成新的序列 $p_{new} = (a'_{i+1}, \dots, a'_m)$,若满足如下约束条件,则可以与变异点之前的序列拼接形成新的遥测个体 $p = (a_1, \dots, a_i, a'_{i+1}, \dots, a'_m)$ 。

$$(a_i, a'_{i+1}) \in E \quad (11)$$

$$\forall j, i+1 \leq j \leq m-1, (a'_j, a'_{j+1}) \in E \quad (12)$$

其中,式(11)表示 a_i 和 a'_{i+1} 代表的设备节点之间连通,式(12)表示 a'_j 和 a'_{j+1} 代表的设备节点之间连通。

(2)遥测个体边界变异策略。内部变异策略容易使算法陷入局部最优,为提高遥测种群多样性,使算法跳出局部最优,本文设计了遥测个体边界变异策略,通过对染色体序列的移位操作来实现边界变异。对于遥测个体 $p = (a_1, \dots, a_m)$,若 $(a_m, a_1) \in E$,则整个遥测个体的全部基因点可以形成闭环,满足该性质的遥测个体可以进行遥测移位操作。进行移位操作后的遥测个体本质上仍为原先的闭环,但遥测源节点和目的节点发生变化,提高了遥测种群的多样性,使算法更容易跳出局部最优解。例如变异点为 a_3 ,将遥测染色体序列左移 2 个基因位,则产生的新遥测个体 $p_{new} = (a_3, \dots, a_m, a_1, a_2)$ 。由于闭环的性质,一定范围的移位操作会产生相同的遥测个体,因此进行移位操作的范围需要满足如下约束:

$$n_{mov} \neq \tau m, \tau \neq 0 \quad (13)$$

其中, τ 为移位系数, m 为遥测基因数。

3.1.5 网络遥测个体选择策略

选择操作在遗传种群优秀基因的同时也使种群基因多样性下降。为了防止种群多样性的快速下降导致算法过早收敛,本文使用如下策略进行选择操作:

(1)对父代种群个体以及交叉、变异产生的遥测个体按照适应度大小进行排序。

(2)使用精英保留策略选取一小部分适应度高的个体

直接复制到子代遥测种群中,保证优秀遥测基因的传播,提升计算性能。

(3)使用线性排序选择策略选择遥测个体,避免过早收敛和停滞现象,对于剩下未被选择的遥测个体进行适应度倒序排列,根据排位先后线性地分派给遥测染色体选择概率,选择概率使用 Baker 提出的计算式,具体如下:

$$pro(i) = \frac{1}{N} \left(\eta^+ - \frac{\eta^+ - \eta^-}{N-1} (i-1) \right), i=1, 2, \dots, N \quad (14)$$

其中, N 代表种群大小, i 代表排列序位, $1 \leq \eta^+ \leq 2$, $\eta^- = 2 - \eta^+$ 。

3.1.6 网络遥测种群初始化策略与迁移策略

种群进化的好坏很大程度上取决于种群的多样性,种群多样性的缺失会使算法陷入局部最优,不利于种群进化。而多样性的基因会使算法的全局搜索能力增强,因此网络遥测种群初始化和多种群间的迁移都必须对种群的多样性进行衡量,通过种群多样性指导初始化和迁移过程。

本文遥测路径编码是基于网络设备节点设计的,每个网络设备是一个基因,多个基因构成一个个体。但路径本质是由链路组成的,为此本文由基因边(链路)形成遥测个体向量 $\xi_i = (e_{i1}, \dots, e_{i\|E\|})$, $e_{ij} = 1$ 当且仅当遥测个体 p 中存在边 e_{ij} , 否则 $e_{ij} = 0$,再由遥测个体向量形成遥测种群路径矩阵,利用遥测种群路径矩阵度量种群多样性。注意边 (v_i, v_j) 或者 (v_j, v_i) 在 E 中仅存在一个。

遥测种群路径矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \dots & e_{1\|E\|} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \dots & e_{2\|E\|} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \dots & e_{3\|E\|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e_{k1} & e_{k2} & e_{k3} & \dots & e_{k\|E\|} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{\|E\|} e_{ji} = m-1, 1 \leq j \leq k \quad (16)$$

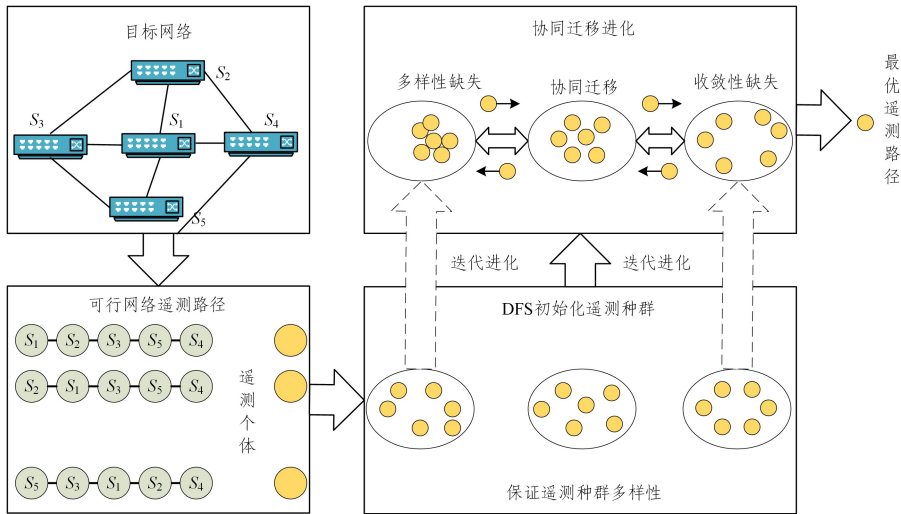


图1 APPOINTER 描述图

Fig. 1 Description diagram of APPOINTER

算法1 APPOINTER

输入:图 $G=(V, E, f)$, 迭代次数 T , 种群规模 $size$, 单个种群迭代次数

λ , 交叉概率 p_c , 变异概率 p_m

输出:最优遥测个体 P_{opt}

遥测多样性度量为:

$$D(t) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\|E\|} |2 \times \sum_{j=1}^k (e_{ji} | e_{ji} = 1) - k|}{\|E\| \times k} \quad (17)$$

当 $D(t)=1$ 时,遥测种群中每一个基因边 0 和 1 的个数相等,此时种群多样性最大。当 $D(t)=0$ 时,种群中每一个基因边要么全为 0,要么全为 1,种群仅包含一个个体,多样性缺失。

种群多样性指导的种群初始化方法首先确定种群规模及种群多样性阈值,使用 DFS 算法计算遍历全部网络设备仅一次的可行网络遥测路径。随后根据式(17)计算上述可行路径加入遥测种群后的种群多样性,若种群多样性增大则保留,否则丢弃,重复上述过程直至达到规定的种群规模。若种群多样性达到阈值,则停止计算种群多样性,直接加入遥测种群,加快种群初始化的速度。

基于遥测种群多样性指导的遥测迁移操作首先根据遥测种群多样性度量方法判断种群状态,对于多样性缺失的遥测种群计算其缺失的基因边,并从其他遥测种群迁移存在该缺失基因边的较高适应度遥测个体,使其跳出局部最优;对于多样性丰富的遥测种群,应从其他遥测种群迁移适应度高的基因边,加快其收敛速度。且整个迁移过程中需要对遥测个体相似度进行判断,相似度过高则不宜迁移。

3.1.7 算法步骤

APPOINTER 的描述如图 1 所示,该算法使用深度优先搜索算法生成多个遥测种群,同时保证初始遥测种群的多样性。多个遥测种群并行进化,单个遥测种群使用进化算法进行进化,包括遥测交叉策略、遥测变异策略和遥测选择策略。遥测种群并行进化结束之后,对每个遥测种群进行多样性和收敛性评估,依据遥测种群的多样性与收敛性进行种群之间的迁移,遥测迁移操作完成后,多个遥测种群继续并行进化,最后选取多遥测种群中适应度最大的遥测个体作为网络遥测路径。

1. 使用深度优先搜索算法、种群多样性度量方法初始化多个遥测种群

$Q = \{Q_1, \dots, Q_k\}$, 保证初始遥测种群的多样性

2. for ite $\leftarrow 1$ to T do

3. $Q_{temp} = \text{parallel_evolve}(Q, \lambda, p_c, p_m) / *$ 多个遥测种群并行

完成交叉、变异、选择操作 */

4. $Q = \text{collaborate_migrate}(Q_{\text{temp}})$ /* 多遥测种群之间依据种群多样性实现迁移操作 */
5. if Q is astringency then
6. break
7. end if
8. end for
9. $p_{\text{opt}} = \text{optselect}(Q)$ /* 获取最优的遥测个体 */
10. return p_{opt} /* 返回最优的遥测个体 */

3.2 基于 APPOINTER 的网络遥测实现

基于 APPOINTER 的网络遥测实现如图 2 所示, 主要的应用场景为软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 局域网。该网络遥测实现主要包括基于 APPOINTER 网络遥测路径计算和网络遥测路径部署两个部分。基于 APPOINTER 网络遥测整体的实现流程如下。

步骤 1 第一次计算网络遥测路径时, APPOINTER 首先使用 DFS 计算一条网络遥测路径并部署该路径, 随后启动网络遥测收集链路带宽利用率、链路传输时延、交换机端口队列占用率等全网链路状态信息存入遥测数据库。在后续计算网络遥测路径时, APPOINTER 将遥测数据库收集的网络状态信息作为计算网络遥测路径时的输入。

步骤 2 使用深度优先搜索算法生成多个遥测种群, 保证初始遥测种群的多样性。

步骤 3 多个遥测种群并行进化, 单个遥测种群使用遥测交叉策略、遥测变异策略、遥测选择策略迭代进化。

步骤 4 并行进化结束之后, 对每个遥测种群进行多样性和收敛性评估, 依据遥测种群的多样性与收敛性进行种群之间的迁移。遥测迁移操作完成后, 多个遥测种群继续并行进化, 最终生成适用于当前网络状态的最优遥测路径。

步骤 5 网络遥测路径部署模块使用 RYU 控制器对 SDN 网络进行路由控制。RYU 控制器利用全局网络信息, 结合步骤 2 生成的网络遥测路径, 对流表项的 match, action, instructions 等字段进行填充, 其中 match 匹配域中 ip_proto 设置为 254, 用于识别网络遥测报文, 最终生成所有遥测节点对应的流表项。

步骤 6 RYU 控制器在遥测路径所经过的设备节点

下发携带流表项的 FLOW_MOD 消息, 将网络遥测路径以流表项的形式部署于底层数据平面, 对网络遥测进行路由控制。

步骤 7 用户自定义需要收集的设备状态信息、流量信息, 将其以元数据位图的形式嵌入遥测数据包中。网络遥测服务器将网络遥测数据包从遥测源节点注入网络。遥测路径上的交换机根据元数据位图将需要的网络信息嵌入遥测数据包, 最终由遥测目的节点接收遥测报文, 上传网络遥测服务器。遥测服务器提取设备信息、流量信息, 并将其存储于遥测数据库, 完成网络遥测功能。网络遥测可收集的部分设备信息、流量信息如表 1 所列。

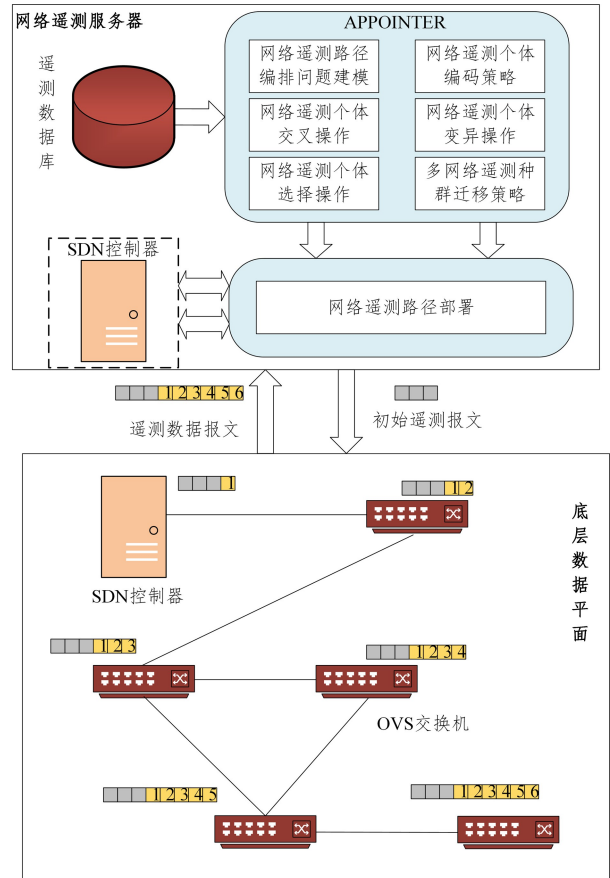


图 2 基于 APPOINTER 的网络遥测实现
Fig. 2 Network telemetry implementation based on APPOINTER

表 1 网络遥测可收集的目标信息

Table 1 Target information can be collected by network telemetry

信息类型	遥测信息	信息类型	遥测信息	信息类型	遥测信息
设备级信息 (交换机)	CPU 占用率	端口级信息	链路利用率	流级信息	协议类型
	内存占用率		端口队列长度		流持续时间
	接收数据包计数		数据包出口端口号		流报文速率
	接收字节计数		数据包入口端口号		流以太网类型
	匹配报文效率		端口接收字节计数		源 IP 信息熵
	流表项增长速率		端口传输字节计数		目的 IP 信息熵
	报文缓冲区占用率		端口丢弃字节计数		ICMP 报文个数
	流表项空间占用率		端口接收数据包计数		流字节增长率
	发送 packet-in 消息速率		端口传输数据包计数		源 TCP 序列号
	接收 packet-out 消息速率		端口丢弃数据包计数		流中每个包的平均字节数

4 实验

本节对 APPOINTER 进行了实验分析。实验中,硬件采用 i5-10400K CPU 和 16GB 内存,运行 Ubuntu 18.04 操作系统。该实验使用 Mininet 搭建 SDN 网络,实现了数据中心 jellyfish 型网络拓扑^[12],并生成遵循正态分布的背景流量^[13-14]。jellyfish 型网络拓扑包括一台控制器、一台网络遥测服务器、15 台 OpenvSwitch 交换机和 30 台终端主机。本文实验包含两个部分,第一部分将提出的 APPOINTER 与传统的遗传算法^[15]进行实验对比,比较两种算法收敛速度以及寻找最优路径的能力;第二部分将 APPOINTER 计算的网路遥测路径与基于欧拉轨迹的路径编排算法^[6](EULER)、全节点覆盖的 DFS 计算的网路遥测路径进行部署,启动网络遥测任务,对比其性能。

(1)该实验在相同网络环境下对比 APPOINTER 与传统遗传进化算法,分析两种算法的收敛速度以及寻优能力。算法初始化参数如表 2 所列。该实验中 APPOINTER 使用 3 个遥测种群,在已有实验的基础上分别赋予 3 个种群不同的遥测交叉、变异概率。第一个种群交叉概率为 0.8,变异概率为 0.2,较大的交叉概率会导致该种群不断产生新的个体;第二个种群变异概率为 0.8,交叉概率为 0.2,较大的变异概率会导致该种群进行随机搜索;第三个种群交叉概率为 0.5,变异概率为 0.5,既保持了产生新个体的能力,又进行了一定程度的随机搜索。上述种群的交叉、变异概率在迭代过程中保持不变,每个种群规模设置为 150,迭代过程中依据种群多样性进行协同迁移。对比算法为 3 组传统遗传进化算法,种群规模为 450,采取表 2 所列的交叉、变异概率。

表 2 算法初始化参数设置

Table 2 Algorithm initialization parameter settings

算法	种群规模	交叉概率	变异概率
APPOINTER	450(150)	0.8,0.2,0.5	0.2,0.8,0.5
GA-params1	450	0.8	0.2
GA-params2	450	0.2	0.8
GA-params3	450	0.5	0.5

实验结果如图 3 所示,传统的遗传进化算法初始收敛速度快于 APPOINTER,在种群迭代次数为 5 时,GA-params1,GA-params2,GA-params3 以及 APPOINTER 的适应度分别为 0.012498,0.012495,0.01250,0.012494。APPOINTER 全局收敛速度以及适应度优于传统的遗传进化算法,在种群迭代次数为 30 时,GA-params1,GA-params2,GA-params3 以及 APPOINTER 的适应度分别为 0.012517,0.012523,0.012522,0.012533。此时,APPOINTER 已经收敛,而传统遗传进化算法仍在缓慢进化,并且最终收敛于局部最优。

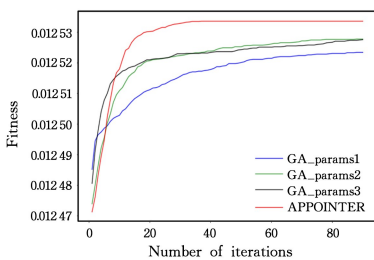


图 3 迭代过程中适应度值的变化趋势

Fig. 3 Trend of fitness value change during iteration

为测试 APPOINTER 计算的可行解是否为全局最优解,本文遍历所有网络遥测路径可行解。随后对比 APPOINTER 和遍历得出的、成本最低的网络遥测路径,判断两者是否一致。本文在不同网络状态、网络规模下进行了 1000 次实验。实验部分的结果如表 3 所列。从表中可以看出,APPOINTER 计算的最优网络遥测路径成本与遍历所有网络遥测路径后找出的、成本最低的网络遥测路径一致。

表 3 最大适应度对比

Table 3 Maximum fitness comparison

实验次数	APPOINTER	遍历
1	0.018317	0.018317
2	0.016101	0.016101
3	0.014279	0.014279
4	0.012892	0.012892
5	0.011918	0.011918
6	0.011080	0.011080
7	0.010481	0.010481
8	0.010362	0.010362
9	0.008986	0.008986
10	0.008741	0.008741

APPOINTER 的初始种群由 3 个相互隔离且大小为 150 的遥测种群组成,而传统遗传进化算法初始种群的大小为 450,种群基因多样性较丰富,在进化初期有较快的收敛速度以及优秀的遥测个体。随着不断的进化,传统遗传进化算法陷入局部最优,而 APPOINTER 凭借边界变异策略、种群多样性指导的协同迁移策略对进化过程及时矫正,加快收敛速度,最终获得全局最优遥测个体。

(2)在该实验中,本文定制网络遥测任务,从以下几个方面对 APPOINTER 计算的网路遥测路径性能进行实验分析。

1)网络遥测任务端到端的时延。该实验通过动态调整网络负载来分析网络遥测任务的完成时间。使用 APPOINTER、EULER 以及全节点覆盖的 DFS 生成不同的网络遥测路径,在相同的网络负载环境下进行遥测任务。实验中每段链路的总带宽为 10mbps,网络负载的变化通过链路带宽占用率控制。网络负载的表达式如下:

$$Network_load = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \quad (18)$$

其中, l_i 代表每段链路的带宽占用率, N 为链路总数。

如图 4 所示,随着网络流量不断加大,3 种算法遥测任务的平均完成时间逐渐增加。在网络负载达到 90% 时 APPOINTER, EULER, DFS 的遥测任务平均端到端时延分别为 41.8ms, 48.9ms, 58.3ms。APPOINTER 的遥测任务端到端的平均时延明显小于 EULER 和 DFS。

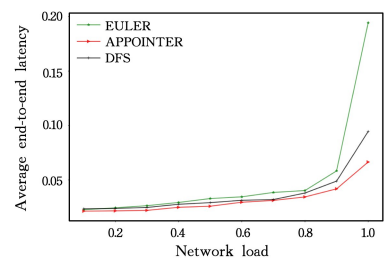


图 4 遥测端到端的时延变化曲线

Fig. 4 End-to-end delay curve in telemetry

由于 EULER 需要覆盖全部的网络链路,因此该算法完成网络遥测任务的平均时延较大,尤其是网络处于高负载状态时,发生丢包的概率也大大增加。相比 DFS 随机选择的网络遥测路径,APPOINTER 利用全局网络视图动态选择优质链路,规避高负载链路,保证遥测任务高效完成。

2)网络负载均衡度。对于定制的网络遥测任务,本文使用 APPOINTER、EULER 以及全节点覆盖的 DFS 算法生成不同的网络遥测路径,分析在不同的探测包发送速率下网络负载均衡度的变化。网络负载均衡度的表达式如下:

$$NLBD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (l_i - Network_load)^2} \quad (19)$$

其中, N 为链路个数, l_i 代表每段链路的带宽占用率, $Network_load$ 为网络负载。

如图 5 所示,随着探测包发送速率的增大,3种算法的网络负载均衡度持续增大。造成该现象的主要原因有如下两点。1)探测包的注入会使网络遥测经过的链路带宽占用加大,而网络遥测未经过的链路带宽占用不变,链路带宽占用差别明显,网络负载均衡度变大。2)网络遥测数据包用于收集设备节点的状态数据及流量信息。网络遥测包的大小随着网络遥测路径长度的增加而增大,在遥测源节点和目的节点的网络遥测包大小差别明显,导致遥测源节点与遥测目的节点所在链路的带宽占用相差较大,网络负载均衡度增大。

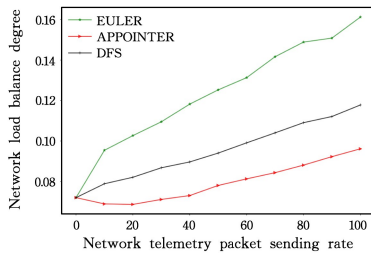


图 5 网络负载均衡度变化曲线

Fig. 5 Load balancing curves in network

由图 5 可知,随着探测包发送速率的增大,EULER 的网络负载均衡度最大,DFS 次之,APPOINTER 最小。相比全节点覆盖的 APPOINTER 和 DFS,EULER 由于全链路覆盖,网络遥测路径更长。在相同探测数据包发送速率下,基于上述原因 2)可知,网络负载均衡度较大。

如图 5 所示,在探测数据包发送速率为 0 时,APPOINTER 的网络负载均衡度为 0.072;在探测数据包发送速率为 10 时,APPOINTER 的网络负载均衡度为 0.068,网络负载均衡度出现下降的趋势。这是由于 APPOINTER 对网络状态进行分析后产生的网络遥测路径带宽占用率较小,在探测包发送速率较低、遥测路径长度较短的情况下,链路的带宽占用较为均衡,网络负载均衡度降低。

3)重叠交换机数量。如图 6 所示,在连通度固定的情况下,随着交换机数量的增加,EULER 所产生的遥测路径中重叠交换机的数量线性增大。而全节点覆盖的 DFS 和 APPOINTER 所产生的遥测路径遍历每个交换机仅一次,不存在重叠的交换机,避免了遥测冗余问题。

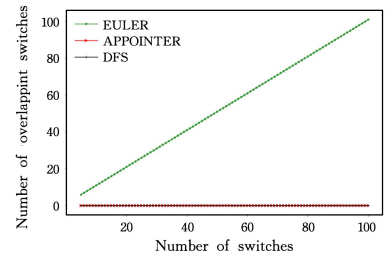


图 6 重叠交换机数量图

Fig. 6 Number of overlapping switches diagram

4)遥测报文携带字节数。对于定制的网络遥测任务,本文使用 APPOINTER、EULER 以及全节点覆盖的 DFS 算法生成不同的遥测路径进行网络遥测任务,如图 7 所示,遥测路径长度为 15,网络遥测任务完成后网络探测包的总大小为 1010 字节。随着网络规模的扩大,网络遥测路径增长,网络遥测包大小也增大。由图 8 可知,EULER 由于全链路覆盖,遥测包字节数暴增,网络开销增大,从而影响了正常的网络通信质量。而全节点覆盖的 DFS 和 APPOINTER 所产生的遥测路径遍历每个交换机仅一次,相比 EULER 减少了约 50% 的字节开销。

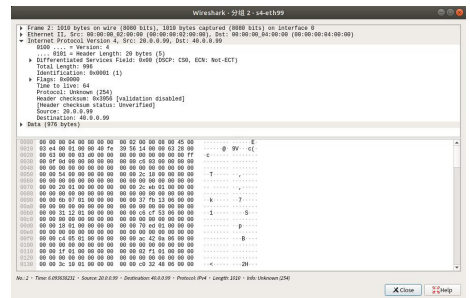


图 7 遥测探测包

Fig. 7 Telemetry detection package

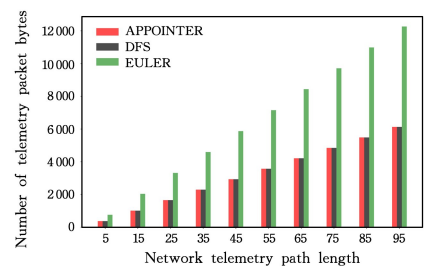


图 8 网络遥测包携带字节数

Fig. 8 Number of bytes carried by network telemetry packet

结束语 针对现有网络遥测方案的遥测信息冗余以及可靠性差的问题,本文提出了基于协同迁移进化的网络遥测自适应路径规划策略。该策略根据网络状态信息计算网络遥测路径,保证网络遥测的可靠性。同时通过全节点覆盖的路径机制,避免遥测冗余,提高网络遥测效率,降低遥测开销。该算法受时间复杂度影响,当前仅适用于小规模网络,主要的应用场景为融合网络遥测的饱和和攻击检测。在未来的研究工作中,将通过拓扑分割、子网并行进化的方法提高算法效率。

参考文献

- tenacy, Sampling-based Measurement Platform for Commodity Sdn[C]// 2014 IEEE 34th International Conference on Distributed Computing Systems. IEEE,2014:228-237.
- [2] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERISSIMO P E, et al. Software-defined Networking: A Comprehensive Survey [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1):14-76.
- [3] TAN L, SU W, ZHANG W, et al. In-band Network Telemetry: A Survey [J]. Computer Networks, 2021, 186:107763.
- [4] LV H R, LI Q, SHEN G B, et al. In-band Network Telemetry Method Research Review [J/OL]. Journal of Software, 2022. <http://www.jos.org.cn/jos/article/abstract/6635?st=search>.
- [5] SUH D, JANG S, HAN S, et al. Flexible Sampling-based In-band Network Telemetry in Programmable Data Plane [J]. ICT Express, 2020, 6(1):62-65.
- [6] PAN T, SONG E, BIAN Z, et al. Inpath: Towards Optimal Path Planning for Inband Network-wide Telemetry[C]// IEEE INFOCOM 2019—IEEE Conference on Computer Communications. 2019:487-495.
- [7] LIU Z, BI J, ZHOU Y, et al. NetVision: Towards Network Telemetry as A Service[C]// 2018 IEEE 26th International Conference on Network Protocols(ICNP). 2018:247-248.
- [8] LIU Z Z, BI J, ZHOU Y, et al. Active Network Telemetry based on P4 [J]. Journal of Communications, 2018, 39(S1):162-169.
- [9] CASTANHEIRA L, PARIZOTTO R, SCHAEFFERFILHO A E. Flowstalker: Comprehensive Traffic Flow Monitoring on the Data Plane using P4[C]// ICC 2019 IEEE International Conference on Communications(ICC). IEEE, 2019.
- [10] LIN Y, ZHOU Y, LIU Z, et al. Netview: Towards On-demand Network-wide Telemetry in the Data Center[J]. Computer Networks, 2020, 180:107386.
- [11] SIMSEK G, ERGENÇ D, ONUR E. Efficient Network Monitoring via In-band Telemetry[C]// 2021 17th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). 2021.
- [12] YUAN X, MAHAPATRA S, NIENABER W, et al. A New Routing Scheme for Jellyfish and Its Performance with HPC Workloads[C]// Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. 2013.
- [13] CUI Y H, YAN L, LI S, et al. SD-Anti-DDoS: Fast and Efficient DDoS Defense in Software-defined Networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 68:65-79.
- [14] PENG J C, CUI Y H, QIAN Q, et al. ADVICE: Towards Adaptive Scheduling for Data Collection and DDoS Detection in SDN [J]. Journal of Information Security and Applications, 2021, 63:103017.
- [15] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5):8091-8126.



HAO Bingwei, born in 1998, postgraduate. His main research interests include software defined networking, network and information security and network telemetry.



CUI Yunhe, born in 1987, Ph.D, associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include edge computing, network security, software defined networks and data center networks, network telemetry.

(责任编辑:喻黎)