

基于客观权重确定的数据中心网络性能评估方法

南洋*, 陈琳

(国防科学技术大学 计算机学院, 长沙 410073)

(* 通信作者电子邮箱 nanyang_nudi@163.com)

摘要:针对大规模数据中心网络如何有效监控网络、发现网络性能瓶颈和潜在故障点,为网络性能优化提供支持成为新的研究课题。然而影响网络性能的因素众多,性能因素的影响程度存在差异,如何给出一个准确的性能评估一直是比较困难的问题。针对上述问题,提出了网络性能评估指标体系,在此基础上进一步提出了一种基于客观权重确定的数据中心网络性能评估方法(PE-OWD)。该方法通过采用基于客观权重确定方法动态计算性能权重,利用基于历史参数分布的数据归一化方法,建立了完善的网络性能健康度评估模型。针对天河2真实的网络环境,对网络设备的性能指标进行评估,验证了网络性能评估方法的有效性。

关键词:性能评估;客观权重确定;健康值;性能指标

中图分类号: TP393.07 **文献标志码:** A

Performance evaluation method based on objective weight determination for data center network

NAN Yang*, CHEN Lin

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: For large-scale data center network, how to monitor the network effectively, discover the bottleneck of network performance and potential point of failure, provide support for optimization of network performance becomes the new research subject. However, there are many factors which affect the network performance, and there are differences in the influence of performance factors. How to give an accurate performance evaluation has been a difficult problem. To solve these problems, a network performance evaluation index system was proposed in this paper. On this basis, a method for evaluating the network performance of data centers based on objective weight (PE-OWD) was put forward. By using the method of objective weight determination, the dynamic calculation of the weights of the indexes was adopted. And using the data normalization method based on historical parameters, a perfect network performance evaluation model was established. For the Tianhe2 real network environment, the performance indexes of the network equipment were evaluated, and the validity of the method for evaluating the network performance was verified.

Key words: performance evaluation; objective weights determination; health value; performance index

0 引言

数据中心不同于传统网络,它是一种具有大规模数据处理和存储功能的基础设施,在物联网和云计算等应用中扮演着重要角色。数据中心集中了各种资源和业务系统,是数据计算、存储的中心,基于标准构建模块实现自动化计算与管理,并以供应链方式提供共享的基础设施、信息处理与应用环境等服务。现代数据中心网络有以下特点:

1) 数据中心网络规模日益庞大,网络异构复杂。

现代数据中心通常具有上万节点的规模,随着网络规模的不断增大,除了通常的树型结构,一些新型的网络结构被提出,例如: Fat-tree、PortLand^[1]、VL2^[2]、DCell^[3]等,这些新型网络结构能够支持多路径,提供更高的带宽。

2) 流量行为复杂,拥塞加剧。

由于承载的服务类型多种多样,数据中心传输的流量也呈现多样化、波动大、传输速度快等特点;网络设备数量的增

加、数据流量的增大,造成网络拥塞加剧,这都给网络性能管理带来了新的挑战。

3) 应用的多样化。

数据中心承载着各种应用,如 Web 服务、搜索引擎、电子商务、集群计算、分布式文件系统等。这些应用的出现使资源需求和流量分布呈现极大的动态性和不平衡性。

4) 网络故障率的指数增加。

通过对十余个美国数据中心网络的日志进行挖掘分析,发现网络故障主要包括设备故障、链路故障和接口故障。在设备故障中,软件类故障占比约 75%,硬件类故障为 25%;其中,接入交换机单设备故障率约为 4.5%,汇聚交换机单设备故障率更是高达 11.1%。在链路故障中,接入交换机和汇聚交换机之间链路故障的比例也最高,达到 58%,这些链路故障会有 18% 左右的概率影响到网络的连通性^[4-5]。

5) 细粒度的网络性能评估需求。

数据中心网络运行的应用通常对网络性能要求严格,需

收稿日期: 2015-06-17; 修回日期: 2015-07-15。 基金项目: 国家 863 计划项目(2012AA01A50606)。

作者简介: 南洋(1987-),男,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向:网络管理、网络故障预警; 陈琳(1976-),女,福建陇海人,副教授,博士,主要研究方向:网络管理、故障诊断、网络测量。

要管理者能更加实时、精确地掌握全网态势和端到端的通信性能,在网络性能下降初期能及时发现和定位网络性能瓶颈及可能故障点,给出一个快速网络性能评估和预测方案。

文献[6]采用 nProbe 工具对大规模网络进行被动测量,该方法结合历史数据得到网络延迟、吞吐率、正常连接率的偏离度,能够反映网络的整体运行情况,但是作为评估参数的 TCPflags 在 TCP 连接超时后,会发生 TCP 重传提高正常 TCP 连接的比率,可能会造成评估值较大,而无法反映真实的网络情况;文献[7]提出了一种基于支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的网络性能评估方法,通过对正常样本和故障样本进行 SVM 分类训练,结合云模型对网络性能进行评估,该方法提高了评估结果的客观性,但在选择样本和样本归一化处理过程,如果样本的差距比较大,或导致归一化后的参数数据距离参数正常运行值偏离较远,会造成评估结果的不准确;文献[8]主要分析不同事件与网络性能之间的关联,考虑的影响事件较多,由于影响网络性能各个因素之间存在复杂的关联性,单纯考虑每个事件对网络性能的影响,难以发现影响网络性能的关键因素,同时也增加了系统的复杂程度。

在性能评估阶段需要对数据进行归一化处理,目前典型的有 Z-score 标准化方法和 min-max 标准化方法等^[9]。Z-score 标准化方法处理后的数据虽然满足正态分布,但会有负值出现;min-max 标准化方法得到结果无法解决由于某些设备参数数据 max 值和 min 值偏大或偏小,带来的均值严重偏离正常设备数据取值范围的问题^[10]。

本文提出了一种基于客观权重确定的性能评估方法,该方法具有以下特点:

1)提出了基于客观权重的确定原则。区别于复杂的神经网络和机器学习网络需要训练大量的历史数据^[4],以及根据管理员经验的人为权值确定方法,本文采用的基于客观权重的确定原则能够更可观地反映各个设备参数对设备整体性能的影响程度。

2)根据历史数据动态调整各性能参数的阈值。由于网络中运行的应用种类繁多,评价网络设备性能好坏的阈值很难确定,某些特殊的网络除外,比如因特网协议语音(Voice over Internet Protocol, VoIP)网络等。为了让管理人员更准确地了解当前网络设备的性能,本文对各个参数采用了动态阈值,让数据的归一化更加合理,同时也能更好地反映各个设备的性能。

3)提出了网络健康度评估模型,为网络和设备的运行态性能提供一个量化的评估模型。

1 网络性能评估指标

数据中心网络的可用性直接关系着用户的体验,而网络设备的端口掉线率是对网络设备连通性的一种量化评价指标,从一个角度反映了网络的可用程度;在大规模数据中心网络中,数据的传输需要有较强的容错性,网络交换设备的错误包率是整个网络当前数据传输质量的一个评价指标,错误包率越低说明整个网络的传输质量越高;网络流量有着不确定性的特点,当网络流量超出了网络设备的最大交换能力时,就会出现丢包现象,如果整个网络中所有的交换设备在流量过载的情况下,仍能保持稳定的较低的丢包率,则说明网络具有较强的健壮性^[12-13]。本文提出了针对数据中心网络的网络

性能评估指标,具体定义描述如下:

定义1 数据中心网络 $DN = \{S, C, E\}$, 其中: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}$ 表示交换机设备集合, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ 表示网络中终端计算节点的集合, M 和 N 分别为网络中交换设备及计算节点的总数; $E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$ 表示交换机设备的网络接口集合, 每一个交换设备 S_i 都含有 X_i 个接口, 则有 $E_i = \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iX_i}\}$, 其中 E_i 是交换设备 S_i 的接口集合, $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iX_i}$ 是设备 S_i 的所有接口, X_i 是 S_i 的接口总数。

定义2 端口掉线率 $PortDropPer$ 。它是交换设备整体可用性的一个重要指标,代表操作状态异常的交换设备端口数目 $PortDropNum$ 占设备正在使用总端口数目 $DevicePortNum$ 的比值,它的高低代表了交换设备的运行健康好坏:

$$PortDropPer = PortDropNum / DevicePortNum$$

定义3 进端口错误包率 $InPortErrper$ 。它是通信过程中交换机每个端口收到进入端口的错误包数目 $InPortErrPkts$ 占总进设备数据包数目 $InDevicePkts$ 的比值,即:

$$InPortErrper = InPortErrPkts / InDevicePkts$$

定义4 出端口错误包率 $OutPortErrper$ 。它是通信过程中交换机每个端口收到出端口的错误包数目 $OutPortErrPkts$ 占总出设备数据包数目 $OutDevicePkts$ 的比值,即:

$$OutPortErrper = OutPortErrPkts / OutDevicePkts$$

定义5 设备平均错误包率 $AvgPortErrper$ 。它是设备进出错误包率之和与使用端口数 $DevicePortNum$ 的比值,即:

$$AvgPortErrper = \frac{InPortErrper + OutPortErrper}{DevicePortNum}$$

定义6 进端口丢包率 $InPortDiscardper$ 。它是通信过程中交换机每个端口接收到进入端口的丢包数目 $InPortDiscardPkts$ 占总进设备数据包数目 $InDevicePkts$ 的比值,即:

$$InPortDiscardper = InPortDiscardPkts / InDevicePkts$$

定义7 出端口丢包率 $OutPortDiscardper$ 。它是通信过程中交换机每个端口接收到出端口的丢包数目 $OutPortDiscardPkts$ 占总出设备数据包数目 $OutDevicePkts$ 的比值,即:

$$OutPortDiscardper = OutPortDiscardPkts / OutDevicePkts$$

定义8 设备平均丢包率 $AvgPortDiscardper$ 。它是设备进出丢包率之和与使用端口数 $DevicePortNum$ 的比值,即:

$$AvgPortDiscardper = \frac{InPortDiscardper + OutPortDiscardper}{DevicePortNum}$$

定义9 标准差系数或称标准离差率。标准差系数 $V_s = \text{标准方差} \delta / \text{期望值} \mu$, 该参数反映了某个变量数据偏离均值的变异程度,它指每单位中所包含的变异大小。在期望不同的情况下,变量的标准差系数越大,表明该变量的变异性越大。本文采用标准差系数法比率来确定3个关键参数的权值 w_{pdp} 、 w_{apc} 和 w_{apd} 。

2 一种客观权重确定的网络设备评估方法

在多指标评估系统中,指标的变异程度越大其所携带的信息量越大,因此赋予的权值就越大。针对各个性能参数的量纲差异性较大的特点,本文对原始数据直接使用标准差系数法,最准确地为各个参数赋予权值;在计算网络设备的整体

健康值之前,需要将所有参数数据进行归一化处理,本文通过采用基于历史参数数据的方法,对归一化可能造成的数据偏移给出了合理的解决方法,让数据分布更符合数据中心网络运行的实际情况;最后,根据健康值计算公式,以及网络设备健康度分级方法,对网络设备的性能状况从量化和总体度量两个角度给予评价。

本文提出了一种客观权重确定的网络设备评估方法 (PE-OWD), 描述如下。

1) 计算性能参数权重阶段。

本文提出了基于标准方差系数 (Standard Deviation Coefficient, SDC) 的权重计算方法分别求出 $PortDropPer$ 、 $AvgPortErrPer$ 、 $AvgPortDiscardPer$ 在时间点 t 下的期望值 μ_{pdp} 、 μ_{ape} 、 μ_{apd} , 再求出标准方差 δ_{pdp} 、 δ_{ape} 、 δ_{apd} , 最后分别得到 3 个参数的标准差系数 $V_{\delta_{pdp}}$ 、 $V_{\delta_{ape}}$ 、 $V_{\delta_{apd}}$ 。由下面的公式得到权重

w_{pdp} 、 w_{ape} 、 w_{apd} :

$$w_{pdp} = V_{\delta_{pdp}} / (V_{\delta_{pdp}} + V_{\delta_{ape}} + V_{\delta_{apd}})$$

$$w_{ape} = V_{\delta_{ape}} / (V_{\delta_{pdp}} + V_{\delta_{ape}} + V_{\delta_{apd}})$$

$$w_{apd} = V_{\delta_{apd}} / (V_{\delta_{pdp}} + V_{\delta_{ape}} + V_{\delta_{apd}})$$

其中: 标准方差 $\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - m)^2 / (n - 1)}$, 期望值 $\mu = \sum_{i=1}^n X_i / n$; X_i 代表某个参数的任一个数值。

若某参数的标准差系数所占百分比越大, 表明该参数在 3 参数中其数据变异程度越大, 提供的信息量越大, 在综合评价中所起的作用越大。

2) 数据的归一化阶段。

网络设备的各个性能参数, 由于各自数据的单位不同, 无法直接乘以权重来得到设备的性能评分。因此, 要对原始的数据值进行归一化处理, 让处理后的数据都落入一个较小的特定范围。本文采用一种结合历史参数分布的归一化方法来处理各个性能参数的数据。

① 在时间点 t 下, 把 $PortDropPer$ 、 $AvgPortErrPer$ 、 $AvgPortDiscardPer$ 的所有数据用科学计数法表示, 比如 $m \times 10^{-n}$ ($0 < m < 1$), 分别统计出 3 个参数该时间点下出现次数最多的幂值 n_{most} 以及最大的幂值 n_{max} , 即出现概率最大的幂值 n_{most} 和最大上限幂值 n_{max} , 并将该值存入历史数据库;

② 在指定时间内的历史数据库中, 分别统计所有时间点 $PortDropPer$ 、 $AvgPortErrPer$ 、 $AvgPortDiscardPer$ 各自的 n_{most} 中出现频率最高的 n_{most} 值设定为 n_{mid} , 再统计 n_{max} 历史的最大值设定为 n_{maxhis} ;

③ 取出时间点 t 下 $PortDropPer$ 参数的所有数据 $value_i$, 经过归一化处理后得到新值 $newValue_i$, 处理方法如下:

令 $x = n_{mid}$, $y = n_{maxhis}$

$newValue_i =$

$$\begin{cases} 0.2 * (10^x - value_i) / 10^x, & 0 < value_i \leq 10^x \\ 0.6 * (value_i - 10^x) / value_i, & 10^x < value_i \leq 10^y \\ 1, & 10^y < value_i \leq 1 \\ 0, & value_i > 1 \text{ 或 } value_i \leq 0 \end{cases}$$

对该时间点 t 下的另外两个参数 $AvgPortErrPer$ 、 $AvgPortDiscardPer$ 同样采用上述方法处理得到归一化后的值。

3) 网络设备健康值评估阶段。

网络设备的端口异常情况、平均错误包率、平均丢包率, 从网络的可使用性、转发能力等方面反映了网络设备的运行状态, 通过量化设备参数及客观求得参数权重, 最终得到一个较客观的设备运行状态评价价值。

通过对设备各个参数归一化的数值求加权和, 得到设备的综合评价价值:

$$HealthValue = (1 - w_{pdp} * newValue_{PortDropPer} - w_{ape} * newValue_{AvgPortErrPer} - w_{apd} * newValue_{AvgPortDiscardPer}) * 100$$

根据健康值对设备运行状况分级:

① 健康值 $HealthValue < 60$, 为设备运行不正常, 或者是综合计算不正常, 或者是单项指标超出了动态阈值的上限;

② 健康值 $HealthValue \geq 60$, 且健康值 $HealthValue < 80$, 为设备运行正常, 但相对网络中的其他大部分设备, 在端口掉线率、平均错误包率或平均丢包率三方面的某一方面或多个方面有些落后;

③ 健康值 $HealthValue \geq 80$, 设备与网络中其他大部分健康设备的运行状态一致, 说明设备运行良好。

2 实验分析与验证

本文基于天河 2 网络进行测试和验证, 实验网络环境中包含有包括核心交换机、汇聚交换机、接入交换机在内的 400 多台交换设备。实验从 2014 年某日上午 10 点开始至晚上 19 点, 采用主动轮询的方式, 按预先设定的数据采集策略, 获得天河 2 网络环境中各种交换设备的性能参数数据。

1) 求参数权重。

本文对设备参数数据集合分别采用标准差 (Standard Deviation, SD) 法和本文提出的标准差系数 (SDC) 法两种方法计算参数所占的权重。两种方法都是客观求权重方法, SD 方法处理归一化后的数据集合, 而 SDC 方法则直接使用原始数据集合计算权重。图 1 分别绘制使用 SD 和 SDC 两种方法, 计算某一天所有轮询时间点, $PortDropPer$ 、 $AvgPortErrPer$ 、 $AvgPortDiscardPer$ 三个参数权重的对比图。

观察图 1 的分布曲线, 可以看出 SD 方法求出的权重波动总是较大, 其中端口掉线率 $PortDropPer$ 最大, 端口错误率 $AvgPortErrPer$ 最小; 本文提出的 SDC 方法求得权重曲线在网络运行一段时间后比较平稳, 其中, 端口掉线率 $PortDropPer$ 一直处于所有参数权重值的最小水平; 分析实际数据集合, 网络刚开始运行时, 各种参数不稳定, 在运行一段时间后会趋于稳定, 其中 $PortDropPer$ 数据变异程度最小, 因此可以看出标准差系数法能更准确地反映网络设备的实际运行情况。

2) 参数数据的归一化处理。

根据第 2 章的数据归一化处理步骤, 随机选取一天内某个时间点, 对其数据进行归一化处理, 得到性能参数端口掉线率 $PortDropPer$ 、端口错误包率 $AvgPortErrPer$ 、端口丢包率 $AvgPortDiscardPer$ 三个参数数据的归一化结果, 见图 2。

从图 2 可以看出, 在网络运行一段时间进入稳定状态后, 三个性能参数 $PortDropPer$ 、 $AvgPortErrPer$ 、 $AvgPortDiscardPer$ 的数值分布逐渐趋于稳定, 其中错误包率 $AvgPortErrPer$ 一直处于极小状态, 符合网络稳定运行的实际情况, 反之如果出现较大的错误包率, 很可能是发生某种异常情况。

3) 计算某时刻网络设备健康值。

从一天内早、中、晚3个时段内,随机选取3个时间点 T_1 、

T_2 、 T_3 ,根据第2章的健康度计算方法,分别计算3个时间点

内所有网络设备的健康值,健康值分布见图3。

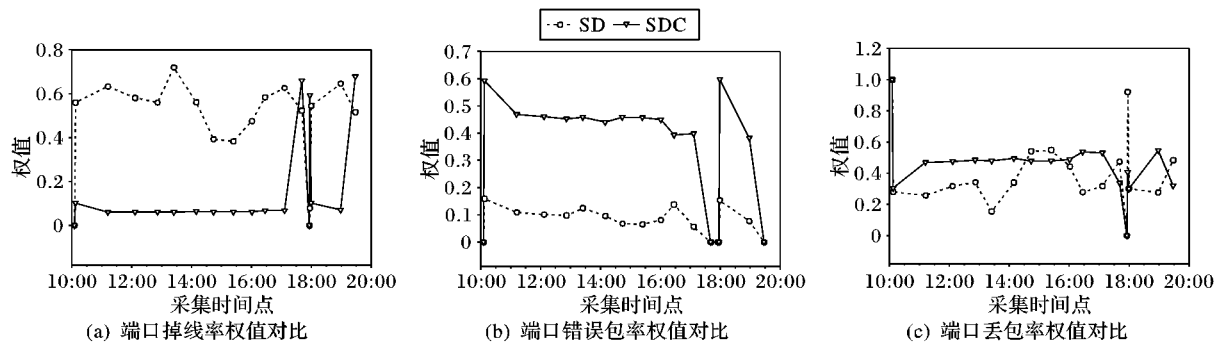


图1 SD与SDC方法计算参数权重对比

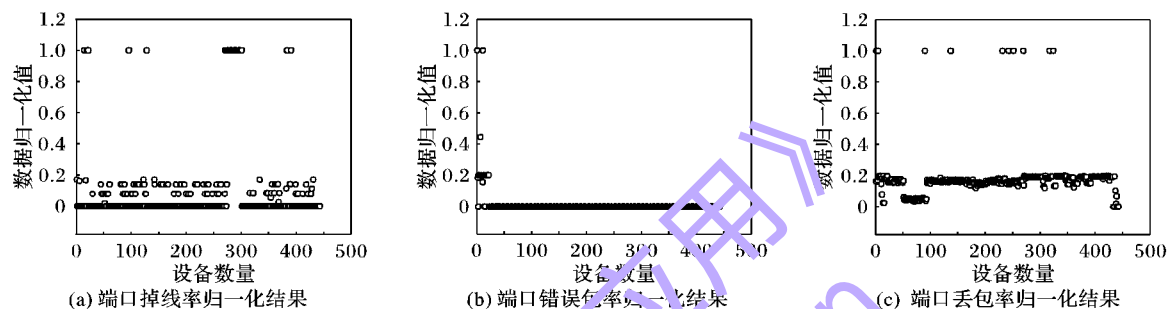


图2 不同性能参数归一化结果

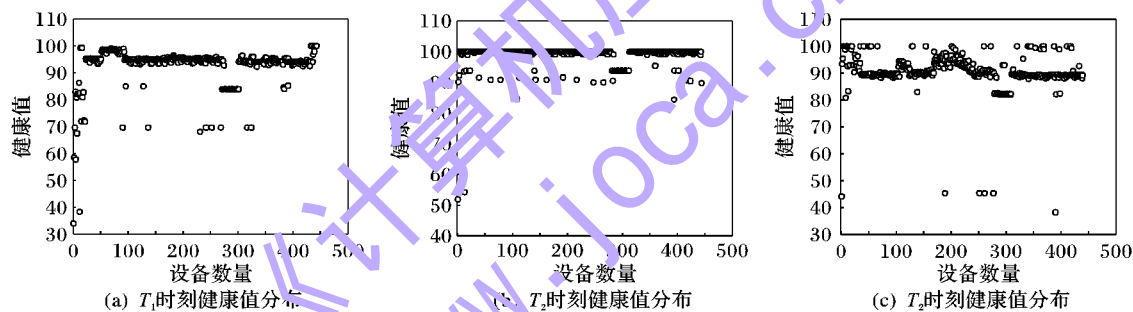


图3 网络设备健康值分布

根据第2章的健康值分级方法,从图3中可以看到,在网络持续运行中,大部分设备都运行在正常状态,只有个别设备的健康值小于60,说明运行不正常设备的整体性能或者某方面性能远低于大部分正常运行设备的性能;其中, T_1 时刻有4台设备处于不健康状态, T_2 时刻有2台, T_3 时刻有6台,进一步求出 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻网络设备的不健康比率分别为0.9%,0.45%,1.4%,反映出在这三个时刻网络整体性能稳定。通过分析 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻的不健康设备集合,发现大部分不健康设备皆为随机出现,和当时整个网络的使用情况有关,由网络流量的不可预测和突发性造成;而网络设备A一直处于不健康状态,对设备A检查发现有个别端口总是处于时断时连的状态,对故障端口处理后,设备A恢复到正常运行状态,验证了本文提出性能评估方法的有效性。

4 结语

本文为实现数据中心的网络交换设备的性能评估,提出了一种基于客观权值确定的网络设备性能评估方法,通过结合参数的历史值分布,给出一个更接近于网络实际运行情况的健康值评估公式,根据网络设备的性能参数值得出其整体运行状态,并进行分级筛选,帮助网络管理人员能够较准确地

了解网络中所有网络设备的性能状况。

参考文献:

- [1] MYSORE R N, PAMBORIS A, FARRINGTON N, *et al.* Portland: a scalable fault-tolerant layer 2 data center network fabric[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(4): 39-50.
- [2] GREENBERG A, HAMILTON J R, JAIN N, *et al.* VL2: a scalable and flexible data center network[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(4): 95-104.
- [3] GUO C, WU H, TAN K, *et al.* DCell: a scalable and fault-tolerant network structure for data centers[C]// Proceedings of the 2008 ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2008, 38(4): 75-86.
- [4] TURNER D, LEVCHENKO K, SNOEREN A C, *et al.* California fault lines: understanding the causes and impact of network failures[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(4): 315-326.
- [5] WU X, TURNER D, CHEN C C, *et al.* NetPilot: automating data-center network failure mitigation[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 419-430.

(下转第3091页)

一些传统算法有了显著提高,另外在实时性检测能力上有了明显提升,具有一定的实用价值。由于本文仅在 KDD Cup 数据集上进行了对比实验,在今后的工作中,要加强对于网络动态环境下产生的数据进行研究;加强 DCA 的优化,降低其检测的误报率;加强对 TWSVM 的优化,进一步减少其训练时间;另外考虑采取更为高效的分类算法与 DCA 进行组合解决复杂网络环境下的入侵检测问题。

参考文献:

- [1] LIAO H, LIN C, LIN Y, *et al.* Intrusion detection system: a comprehensive review[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(1): 16–24.
- [2] KREUTZ D, RAMOS F M V, ESTEVES VERISSIMO P, *et al.* Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(1): 14–76.
- [3] AICKELIN U, DIPANKAR D, FENG G. Artificial immune systems [M]. Berlin: Springer, 2014: 187–211.
- [4] HUA Y, LI T, HU X, *et al.* A survey of artificial immune system based intrusion detection[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(3): 156790.
- [5] FANG X, WANG L, KANG J, *et al.* On dendritic cell algorithm and its theoretical investigation[J]. *Computer Science*, 2015, 42(2): 131–133. (方贤进, 王丽, 康佳, 等. 树突细胞算法及其理论研究[J]. *计算机科学*, 2015, 42(2): 131–133.)
- [6] SALMON H M, FARIAS C M D, LOUREIRO P, *et al.* Intrusion detection system for wireless sensor networks using danger theory immune-inspired techniques[J]. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2013, 20(1): 39–66.
- [7] FENG G, GREENSMITH J, AICKELIN U. The dendritic cell algorithm for intrusion detection[M]. *IGI Global: Bio-Inspired Communications and Networking*, 2011: 84–102.
- [8] ZONG W, HUANG G, CHEN Y. Weighted extreme learning machine for imbalance learning[J]. *Neurocomputing*, 2013, 101(3): 229–242.
- [9] LIN W J, CHEN J J. Class-imbalanced classifiers for high-dimensional data[J]. *Briefings in Bioinformatics*, 2013, 14(1): 13–26.
- [10] HE Q, LI N, LUO W, *et al.* A survey of machine learning algorithms for big data[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2014, 27(4): 327–336. (何清, 李宁, 罗文娟, 等. 大数据下的机器学习算法综述[J]. *模式识别与人工智能*, 2014, 27(4): 327–336.)
- [11] JAEHAK Y, LEE H, KIM M S, *et al.* Traffic flooding attack detection with SNMP MIB using SVM[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(17): 4212–4219.
- [12] JIANG C, ZHANG G, LI Z. Abnormal intrusion detection for embedded network system based on genetic algorithm optimised SVM [J]. *Computer Applications and Software*, 2011, 28(2): 287–289. (姜春茂, 张国印, 李志聪. 基于遗传算法优化 SVM 的嵌入式网络系统异常入侵检测[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(2): 287–289.)
- [13] NIE P, ZHANG L, LIU L. Application of multi-class classification algorithm based on twin support vector machine in intrusion detection[J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(2): 426–429. (聂盼盼, 臧渊, 刘雷雷. 基于对支持向量机的多类分类算法在入侵检测中的应用[J]. *计算机应用*, 2013, 33(2): 426–429.)
- [14] VLADIMIR V. The nature of statistical learning theory[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2000: 2–6.
- [15] HU J, ZHENG S. Intrusion detection model with twin support vector machines[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Science*, 2014, 19(4): 448–454.
- [16] MANGASARIAN O L. Nonlinear programming[M]. [S.l.]: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1993: 10.
- [17] KURT A K, HALL L O, GOLDOFF D B, *et al.* Fast support vector machines for continuous data[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2009, 39(4): 989–1001.
- [8] TANG F, TANG H, QIAHAN H, *et al.* A network performance assessment method based on passive measurement[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2013, 282(4): 602–604. (唐飞, 唐海娜, 恰汗·合孜尔, 等. 一种基于被动测量的网络性能评估方法[J]. *计算机与数字工程*, 2013, 282(4): 602–604.)
- [7] MENG X, MENG X. Network health evaluation based on SVM and cloud model [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 35(1): 10–14. (温祥西, 孟相如. 基于支持向量机和云模型的网络健康状态评估[J]. *北京邮电大学学报*, 2012, 35(1): 10–14.)
- [8] TONG X. A network based estimation method of business system [J]. *Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science*, 2012, 26(8): 101–105, 126. (童晓薇. 一种基于网络的业务系统健康度评估方法[J]. *重庆理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 26(8): 101–105, 126.)
- [9] MA L. Study and use of modern statistical analysis methods (the third): the standardization of statistical data — dimensionless method[J]. *Beijing Statistics*, 2000(3): 34–35. (马立平. 现代统计分析方法的学与应用(三): 统计数据标准化——无量纲化方法[J]. *北京统计*, 2000(3): 34–35.)
- [10] WANG L, ZHANG R, SHA C, *et al.* A product normalization method for E-commerce [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(2): 312–325. (王立, 张蓉, 沙朝锋, 等. 电子商务商品归一化方法研究[J]. *计算机学报*, 2014, 37(2): 312–325.)
- [11] YUAN H. Intelligent network management system: research on network performance evaluation model based on BP algorithm [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2006: 33–50. (原慧琴. 智能网络管理系统——基于 BP 算法的网络性能评估模型的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2006: 33–50.)
- [12] CAO W, CHEN G, NIU G, *et al.* A summarization on technologies of network device test[J]. *Electronics Optics and Control*, 2014, 21(6): 13–18. (曹文斌, 陈国顺, 牛刚, 等. 网络设备测试技术综述[J]. *电光与控制*, 2014, 21(6): 13–18.)
- [13] LUO Y, XIA J, CHEN T. Comparison of objective weight determination methods in network performance evaluation [J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(10): 2624–2626. (罗赞赛, 夏靖波, 陈天平. 网络性能评估中客观权重确定方法比较[J]. *计算机应用*, 2009, 29(10): 2624–2626.)

(上接第 3058 页)