

基于测量的网络性能评价方法研究

张冬艳, 胡铭曾, 张宏莉

(哈尔滨工业大学 计算机网络与信息安全技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 网络性能评价方法的研究对于指导网络设计和改进网络运行性能状况有着重要的意义。为了综合地评价网络的运行状况, 在测量的基础上, 提出了基于多个测量指标的多指标综合评价方法, 并应用到路径性能评价和网络性能评价上, 该值反映了路径和网络的综合性能状况, 并可以按照不同的策略分析路径和网络之间的性能变化情况。实验结果表明, 该方法可以有有效的评价目标路径和网络的运行状况。

关键词: 网络测量; 性能评价; 性能指标

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2006)10-0074-06

Study on network performance evaluation method based on measurement

ZHANG Dong-yan, HU Ming-zeng, ZHANG Hong-li

(Research Center of Computer Network and Information Security Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to evaluate the condition of network, a new synthetically multi-metric performance evaluation method was put forward based on multiple measurement metrics and applied to the performance evaluation of links and nets. The value of calculation reflected the performance condition of links and nets. The performance change of links and nets could be analyzed according to the different strategies using the method. The results of experiment indicate that the method can evaluate the performance of links and nets effectively.

Key words: network measurement; performance evaluation; performance metric

1 引言

Internet 变得日益庞大和复杂的同时, 人们对网络服务质量(QoS)的要求也在不断提高, 计算机网络的可靠性、稳定性以及高效性等诸多性能方面的表现也被越来越多的网络使用者和网络管理开发者所关注。如何在现有网络环境基础上提高网络性能, 以及如何为下一代互联网设计出具有更好的运行效率和更高性能的网络互联协议等问题, 目前已成为国内外研究的热点。而这些问题的解决都要求

对网络性能能够进行有效的评价与分析。

一个计算机网络系统, 可以由多种多样的计算机平台, 通过各种各样的传输媒体构成不同的拓扑结构, 并且采用相应的多种信道访问控制方式, 因此计算机网络的性能评价非常复杂, 目前国内外普遍采用并发展相对成熟的有 3 种方法^[1]: 1) 通过对实际计算机网络系统本身进行观测, 对收集的各种参数及事件进行分析与评价的测量法; 2) 为实际系统建立数学模型, 并通过求解表达式来分析网络系统性能的模式分析法; 3) 通过计算机程序对实

收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2006-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60203021); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2002AA142020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(60203021); The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2002AA142020)

际网络进行模拟，通过程序运行得到的结果来分析网络性能的模拟法。

本文提出的评价方法是一种基于测量的方法，即对已经存在并运行的网络系统进行测量，收集各种参数，然后通过对这些测量值进行数据分析与处理来对网络性能进行量化的分析与评价，从而可以对网络当前的运行性能状况进行综合评价。

2 性能评价方法

如何对一个网络系统进行性能评价是网络测量要研究的重要内容之一，目前基于测量法对网络性能进行评价，各个组织与研究机构普遍使用的是指标体系评价法。指标体系评价法就是为了从多个角度对事物进行综合评价，用不同的指标对评估对象发展的多个方面分别予以反映。在网络性能评价中，主要使用延迟、丢包率、带宽与流量等多项指标对所测量的网络进行性能评价。但是这种指标体系法虽能全面反映某一个事物的发展状况，但在不同事物间比较时又遇到了困难。因为各个指标的同时使用，经常会发生不同指标之间无法统一比较的情况，因而不能对被评价对象作时间和空间上的整体对比。例如在比较甲、乙 2 个网络同一时刻的性能优劣时，往往会遇到这样的情况，甲网络有几项性能测量指标好于乙网络，同时，乙网络又有另外几项性能测量指标好于甲网络。这时就无法判断甲、乙 2 个网络的性能到底孰优孰劣。同样在分析比较同一网络不同时刻网络性能的发展变化时，也常常会遇到类似的情况。正是由于指标体系的这一不足，本文在网络性能评价方面引入了多指标综合评价方法，即把反映网络性能的多个指标信息综合起来，得到一个综合指标，由此来反映网络整体的性能状况，并进行横向和纵向的比较，既有全面性，又有综合性。

2.1 路径性能评价

计算机网络是一个自主的互联的计算机的集合，要考察一个网络的整体或部分的性能状况必须从网络中单个节点以及连接到这个节点路径的性能状况出发。节点是构成计算机网络的基本元素之一，节点的性能状况是通过测量某条路径所表现出来的，本文所述测量法的原理来源于抽样统计，网络中的任何节点都会对网络性能在一定范围内造成影响，但是根据测量的方法和粒度，对某条路径进行测量获得的结果已经可以反映此条路径上各

个节点的运行状况，因此在本文中把网络路径当作网络中可测对象的最小元素，节点作为其中的一部分加以考察。

网络中路径的性能指标是指某一节点到另一节点之间连接路径所表现出来的性能状况，如节点间的往返延迟、往返丢包率等。对网络中路径的综合性能评价，即是对固定 2 个节点之间路径的综合性能评价。通过对路径两端节点的多个单项性能指标进行综合处理，得出综合性能参数值，该值能反映路径的综合性能状况，可依据此综合性能参数值对同一路径在不同时间或同一时间不同路径之间进行性能比较分析。

2.2 网络性能评价

对单条路径的综合性能评价可以拓展到网络中来。由于是对已知网络进行测量，该网络的拓扑图可由先期测量得到，根据拓扑找出代表该网络的多条主要路径，网络的整体性能状况可通过这些路径的性能状况反映出来。计算每条主要路径的性能评价参数，进行数据处理后作为该网络的综合性能评价参数。

3 性能评价指标

3.1 测量指标与评价指标

在进行网络测量的过程中定义一系列的参数来描述网元、数据路径、端到端路径或网络的性能，使用户和运营商对网络所提供的服务能力或网络的整体性能有全面、准确的理解。这些经过严格定义的定量参数称为测量指标（metrics）。

但是，这些都集中在测量指标方面，也就是采用一定的测量方法和测量系统得到网络性能指标。对于网络测量还有许多方面需要进行分析与评价。例如，如何定义测量方法的评价指标，能够对同一指标的不同测量方法进行全面的性能评价比较；如何能够通过一些测量指标的综合处理，从而对于网络的整体性能或局部性能有综合的量化的比较与分析等。这些能够对于网络测量某些方面进行评价的定量参数，称之为评价指标。

已有的 Internet 测量研究所提出的一系列测量指标，主要集中在节点以及路径的单项性能测量方面，目前还没有针对节点和网络的综合性能评价参数，因此不能很好地反映网络的性能状况。本文提出的性能评价指标将主要测量指标统一起来，使之能够更直观有效的反映局域网的整体性

能与变化。

3.2 性能评价指标分析

首先根据 IPPM^[2]标准化的一系列网络性能指标选取测量指标,如连通性、单向延迟、单向丢包、时延变化、往返延迟指标、路径利用率、网络吞吐量、流量突发性、网络带宽等^[3~6]。这些测量指标都反映了网络某些方面的运行状况。在评价性能时,某些指标若同时考虑会偏重某些方面,例如单项延迟与往返延迟;而有一些指标则不需要考虑进来,如连通性。因此在性能评价指标中需考虑的测量指标的选取原则有:1)全面性,选取测量指标无需很多,但要尽可能全面。2)易测性,选取的测量指标应易于测量。3)相关性,选取的测量指标相关性尽可能小。经过分析,本文选取往返延迟、丢包率和带宽这 3 个基本而重要的测量指标计算综合性能参数。由于可利用带宽在路径的性能评价中更有意义,因此带宽指标选取路径的可利用带宽。

其次将进行测量指标的无量纲化。选取的测量指标是异量纲的,数据差异较大,直接对它们的值进行数据处理没有实际意义。因此先将进行性能评价与分析的各条路径在不同时刻相应的测量值形成矩阵,然后根据该矩阵把指标值转化为无量纲的相对数,数值大小规范在 $[0, 1]$ 内。这种去掉指标量纲的过程称为数据的无量纲化(也称为数据的规格化),它是指标综合的前提。无量纲化的过程就是把测量指标的实际值转化为评价指标值的过程。

4 性能评价计算方法

对选取的测量指标值进行加权平均处理,权值可依据实际应用被赋予相同或者不同的值。

对单条路径而言,选取其中的某些节点的某些测量指标进行综合处理,计算该路径的性能评价指标值,该值即为该条路径的性能评价价值。

由上节提出的路径级性能评价拓展到网络中的方法,首先计算该网络内所有主要路径的性能评价价值,然后用加权求和的方法计算出该网络的综合性能评价价值。

4.1 路径性能评价计算方法

为了符合用户习惯,定义性能评价指标值越高则表明该条路径的性能越好,相反越低则表明该条路径的性能越差。测量指标有 2 种类型,一种指标

值越大表明性能越好,称为正指标;而另一种指标值越大表明性能越差,称为逆指标。在选取的指标中,往返延迟越大,丢包率越高,路径上的性能越差;相反,可利用带宽越大,路径上的性能越好。因此,可利用带宽是正指标,而往返延迟和丢包率是逆指标。

性能评价指标是将当前时刻在路径两端的节点上直接测量得到的往返延迟 R 、丢包率 L 和该条路径的可利用带宽 B_w 综合计算。

设对于某个测量指标给定 p 个时刻的 n 条路径上的测量数据,就称为给了 np 个样本,相应的全部数据用矩阵 \mathbf{X} 表示,即

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

\mathbf{X} 是 $n \times p$ 的矩阵,其中矩阵的每一行代表同一路径在不同时刻的指标测量值,每一列代表不同的路径在同一时刻的指标测量值,指标分别有延迟 R 、丢包率 L 和可用带宽 B_w 的样本矩阵。利用上述 3 个指标的样本数据,计算出无量纲的相对数,即功效分数。

首先将异量纲的指标值分别转化为功效分数。对某一测量时刻 T ,用加权平均方法计算功效分数得到路径性能评价价值,表示路径的性能状况,该值也可用于各条路径之间的比较,计算方法如

$$P_{L_j} = \left(\sum_{i=1}^l \omega_i d_{ij} + \sum_{i=1}^{k-l} \omega_i d'_{ij} \right) / \sum_{i=1}^k \omega_i \quad (1)$$

其中

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^{(s)}}{x_i^{(h)} - x_i^{(s)}}, \quad i=1, 2, \dots, k, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$d'_{ij} = \frac{x_i^{(h)} - x_{ij}}{x_i^{(h)} - x_i^{(s)}}, \quad i=1, 2, \dots, k, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中 P_{L_j} ——第 j 条路径性能评价指标

k ——选取测量指标总个数

l ——选取测量指标中正指标个数

n ——参加评价路径的个数

- ω_i ——各 i 项指标权值
- x_{ij} ——第 j 条路径第 i 项测量指标值
- $x_i^{(h)}$ ——第 i 项测量指标的满意值
- $x_i^{(s)}$ ——第 i 项测量指标的不允许值
- d_{ij} ——第 j 条路径的第 i 项正指标的功效分数
- d'_{ij} ——第 j 条路径的第 i 项逆指标的功效分数

某项指标的不允许值是指该项指标在路径测量中不应该出现的最坏值，满意值即该项指标在路径测量中可能达到的最好值。得出的路径性能评价价值越高，表明路径综合性能越好，反之则差。

4.2 网络性能评价计算方法

对某一测量时刻 T ，网络性能评价指标是分别将该网络中主要路径的性能评价指标综合求值的结果，其值反映了网络整体性能，网络性能评价指标用式(4)计算。

$$P_N = \left(\sum_{i=1}^n P_{L_i} \omega_i \right) / \sum_{i=1}^k \omega_i \tag{4}$$

式中 P_N ——网络性能评价指标
 n ——路径的个数
 ω_i ——各路径的性能指标权值
一般情况下取 ω_i 为 1，对该网络中不同的路径可根据需要赋予不同的权值，以便更合理的评价该网络的综合性能状况。

5 实验

5.1 实验环境

使用网络模拟软件 NS2(network simulator version 2)^[7]搭建仿真网络环境，为使仿真环境更接近于实际的 Internet，首先使用网络拓扑生成器 NEM(network manipulator)^[8]生成网络拓扑图，该网络拓扑图能够比较准确地反映实际 Internet 拓扑的各个方面。

使用 NEM 为 NS2 提供的接口，把生成的网络拓扑图导入到 NS2 中，NS2 能提供可控的背景流量，在网络的主要路径中生成探测流，模拟测量得到路径的各项性能指标值。

5.2 路径与网络性能评价

5.2.1 网络拓扑

本实验生成的网络拓扑如图 1 和图 2 所示。

生成的网络拓扑图是路由器级的网络拓扑，图 1 包含 50 个节点，图 2 包括 35 个节点。叶节点表

示主机，其他节点表示路由器。图中连接节点的粗实线代表节点间有链路相连，链路的容量和路由策略在 tc1 脚本中指定。为更好的模拟实际网络，在叶节点导入实际流量，通过指定的路由策略，使该网络运行起来。然后在各路径上加入探测流进行测量，并分别计算路径与网络的综合性能评价指标。

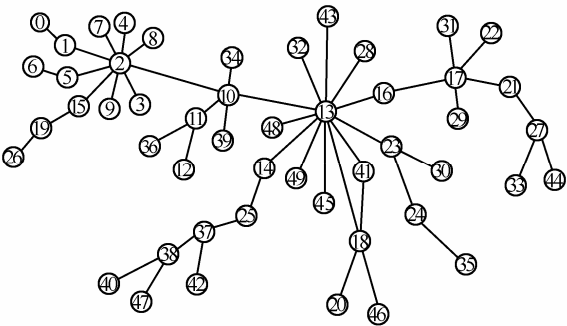


图 1 网络 1 拓扑图

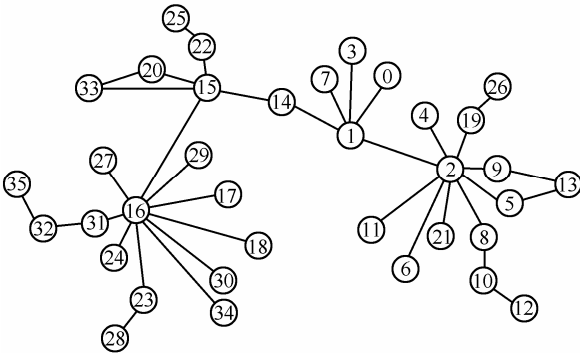


图 2 网络 2 拓扑图

根据拓扑图选取主要路径进行测量，测量结果如表 1 所示。

表 1 网络性能测量实际值				
路径	时刻	往返延迟/ms	丢包率/%	可用带宽/kB
NIL1: 3<->33	T1	209.38	2.5	284
	T2	188.95	0	784
	T3	189.12	0	484
	T4	208.68	34.67	56
NIL2: 28<->35	T1	252.60	1.02	214
	T2	214.59	0	714
	T3	214.70	0	514
	T4	263.54	18.32	78
NIL3: 43<->40	T1	292.75	1.22	386
	T2	317.18	1.84	336
	T3	324.95	2.15	286
	T4	353.28	32.66	12
NIL4: 32<->20	T1	154.23	4.10	146
	T2	110.75	0	446
	T3	134.86	0.19	246
	T4	178.19	11.50	15

N2L1:	T1	4.03	0	8,700
25<->28	T2	5.12	0	4,826
	T3	4.02	0	7,900
	T4	4.54	0	6,900
N2L2:	T1	670.95	18.18	45
35<->12	T2	677.21	26.15	23
	T3	676.98	21.96	15
	T4	678.80	22.70	10
N2L3:	T1	467.52	10.47	38
25<->26	T2	511.70	18.89	23
	T3	519.55	15.54	15
	T4	522.88	15.57	10
N2L4:	T1	9.05	0	4,100
26<->21	T2	8.04	0	6,720
	T3	8.04	0	5,254
	T4	7.95	0	7,725

5.2.2 实验结果

根据具体测量结果值分别得到样本矩阵 R 、 L 和 B_W 如下:

$$R = \begin{bmatrix} 209.38 & 188.95 & 189.12 & 208.68 \\ 252.60 & 214.59 & 214.70 & 263.54 \\ 292.75 & 317.18 & 324.95 & 353.28 \\ 154.23 & 110.75 & 134.86 & 178.19 \\ 4.03 & 5.12 & 4.02 & 4.54 \\ 670.95 & 677.21 & 676.98 & 678.80 \\ 467.52 & 511.70 & 519.55 & 522.88 \\ 9.05 & 8.04 & 8.04 & 7.95 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 2.5 & 0 & 0 & 34.67 \\ 1.02 & 0 & 0 & 18.32 \\ 1.22 & 1.84 & 2.15 & 32.66 \\ 4.10 & 0 & 0.19 & 11.50 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 18.18 & 26.15 & 21.96 & 22.70 \\ 10.47 & 18.89 & 15.54 & 15.57 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_W = \begin{bmatrix} 284 & 784 & 484 & 56 \\ 214 & 714 & 514 & 78 \\ 386 & 336 & 286 & 12 \\ 146 & 446 & 246 & 15 \\ 8700 & 4826 & 7900 & 6900 \\ 45 & 23 & 15 & 10 \\ 38 & 23 & 15 & 10 \\ 4100 & 6720 & 5254 & 7725 \end{bmatrix}$$

式(1)中测量指标的满意值与不允许值可根据测量经验或测量结果来确定,权值可根据测量路径的实际情况来确定。本实验选取测量结果中的最小值与最大值分别作为测量指标的满意值与不允许值,各路径权值设定为 1,经过计算得到逆指标 R 、 L 和正指标 B_W 的功效分数矩阵如下:

$$d_R = \begin{bmatrix} 0.6957 & 0.7259 & 0.7257 & 0.6967 \\ 0.6316 & 0.6879 & 0.6878 & 0.6154 \\ 0.5721 & 0.5359 & 0.5244 & 0.4824 \\ 0.7774 & 0.8418 & 0.8061 & 0.7419 \\ 1 & 0.9984 & 1 & 0.9992 \\ 0.0116 & 0.0024 & 0.0027 & 0 \\ 0.3131 & 0.2476 & 0.2360 & 0.2311 \\ 0.9925 & 0.9940 & 0.9940 & 0.9942 \end{bmatrix}$$

$$d_L = \begin{bmatrix} 0.9279 & 1 & 1 & 0 \\ 0.9706 & 1 & 1 & 0.4716 \\ 0.9648 & 0.9469 & 0.9380 & 0.0580 \\ 0.8817 & 1 & 0.9945 & 0.6683 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.4756 & 0.2457 & 0.3666 & 0.3453 \\ 0.6980 & 0.4551 & 0.5518 & 0.5509 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$d_{B_W} = \begin{bmatrix} 0.0315 & 0.0891 & 0.0545 & 0.0053 \\ 0.0235 & 0.0810 & 0.0580 & 0.0078 \\ 0.0433 & 0.0375 & 0.0318 & 0.0002 \\ 0.0157 & 0.0502 & 0.0272 & 0.0006 \\ 1 & 0.5542 & 0.9079 & 0.7929 \\ 0.0040 & 0.0015 & 0.0006 & 0 \\ 0.0032 & 0.0015 & 0.0006 & 0 \\ 0.4707 & 0.7722 & 0.6035 & 0.8878 \end{bmatrix}$$

计算得出各条路径的性能评价指标值 P_L 如表 2 所示。

表 2 各条路径的性能评价指标值

路径	时刻	P_L
N1L1: 3<->33	T1	0.5517
	T2	0.6050
	T3	0.5934
	T4	0.2340
N1L2: 28<->35	T1	0.5419
	T2	0.5896
	T3	0.5819
	T4	0.3649
N1L3: 43<->40	T1	0.5267
	T2	0.5068
	T3	0.4981
	T4	0.1802
N1L4: 32<->20	T1	0.5583
	T2	0.6307
	T3	0.6093
	T4	0.4703
N2L1: 25<->28	T1	0.8509
	T2	0.9693
	T3	0.9307
	T4	0.1637
N2L2: 35<->12	T1	0.0832
	T2	0.1233
	T3	0.1151
	T4	0.3381
N2L3: 25<->26	T1	0.2347
	T2	0.2628
	T3	0.2607
	T4	0.8211
N2L4: 26<->21	T1	0.9221
	T2	0.8658
	T3	0.9607
	T4	0.9607

根据网络中主要路径的综合评价价值, 由式(4)计算出该网络的综合评价价值。从拓扑图 1 和 2 中可知, 本实验中测量的路径是网络中的主要路径, 并且路径 N1L1: 3<->33 和 N2L2: 35<->12 分别是网络 1 和网络 2 中的最主要路径。由此, 对应路径 (N1L1, N1L2, N1L3, N1L4, N2L1, N2L2, N2L3, N2L4) 选取权值为 (2, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1)。网络 1 和网络 2 在不同时刻的性能评价指标值 P_N 变化如图 3 所示。

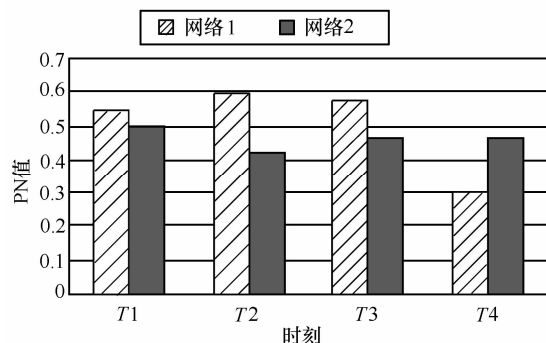


图 3 网络性能变化图

5.2.3 结果分析

由图 3 可知, 网络 1 在 T_1 、 T_2 和 T_3 时刻综合性能优于网络 2, 而在 T_4 时刻综合性能劣于网络 2。网络 1 在 T_2 时刻综合性能最优, 而 T_4 时刻综合性能最劣。网络 2 在 T_1 时刻综合性能最优, 而 T_2 时刻综合性能最劣。但由表 2 知, 网络 1 中 4 条关键路径在 T_4 时刻综合性能最劣; 网络 2 中 4 条关键路径, 路径 N2L1 和 N2L4 的性能明显优于路径 N2L2 和 N2L3, 而路径 N2L1 在网络 1 和网络 2 所有路径中性能最优。

对同一路径在不同时刻或者不同路径在同一时刻, 有时很难根据测量指标值来判断路径性能的差别, 例如在 T_3 时刻, 路径 N1L1 的往返延迟时间长于路径 N1L2 的往返延迟, 丢包率 2 条路径都为 0, 路径 N1L1 的可用带宽高于路径 N1L2 的可用带宽。根据计算的 P_L 值可知, 路径 N1L1 性能优于路径 N1L2 性能。同样, 对于路径 N1L3 的 T_1 与 T_2 时刻, 某一测量指标值无法判定性能的优劣时, 根据 P_L 值可知, 路径 N1L3 在 T_1 时刻的性能优于在 T_2 时刻的性能。

由表 1 的实际测量值可知, 网络 1 在 T_4 时刻各路径可用带宽最小, 同时网络延迟长, 丢包率也最高, 整体性能最差, 由图 3 同样可知网络

1 在 T_4 时刻的 P_N 值最小, 综合性能最劣。图 3 表明网络 2 中路径 N2L2 和 N2L3 性能很低, 实际测量值也说明路径 N2L2 和 N2L3 处于拥塞状态, 可用带宽很低, 延迟和丢包率很高, 路径性能很差。

从实验结果可以看到, 综合评价指标值很好的反映了路径与网络的性能状况, P_L 与 P_N 的值越高, 则路径与网络的性能越好, 反之越差。

对同一路径或不同路径来说, 在不同时刻进行综合性能的评价可以看到此路径在时间尺度上的变化, 由此可更好地了解路径的性能变化状况。对不同网络来说, 在不同时刻进行综合性能的评价可看到此网络在时间尺度上的变化。同时不同网络在同一时刻也可以进行综合性能的比较。

6 结束语

本文针对现在性能评测中存在的没有综合的网络性能评价指标, 不能很好的综合评价网络性能状况, 提出了多指标综合评价方法, 该方法可以综合的评价路径以及网络之间的性能状况, 并根据不同的策略分析不同路径与网络之间或者在时间尺度上的性能变化状况。通过实验证明, 提出的多指标的综合评价方法很好的评价了路径和网络的性能。不同路径与网络之间可以进行性能比较以及在时间的尺度上分析综合性能的变化状况。该评价方法可应用于网络评价, 网络中的网络资源选择等方面。

参考文献:

- [1] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
LIN C. Performance Evaluation in Computer Networks and Computer System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [2] PAXSON V, ALMES G, MAHDAVI J, et al. Framework for IP Performance Metrics, RFC-2330[S]. 1998.
- [3] ALMES G, KALIDINDI S, ZEKAUSKAS M J. A One-way Delay Metric for IPPM. IETF RFC 2679[S]. 1999.
- [4] ALMES G, KALIDINDI S, ZEKAUSKAS M J. A One-way Packet Loss Metric for IPPM, IETF RFC 2680[S]. 1999.
- [5] ALMES G, KALIDINDI S, ZEKAUSKAS M J. A Round-trip Delay Metric for IPPM, IETF RFC 2681[S]. 1999.
- [6] DEMICHELIS C, CHIMENTO P. IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metric(IPPM), IETF RFC 3393[S]. 2002.
- [7] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

(下转第 85 页)

用 DNA 计算模拟非确定性有穷自动机时, 状态、输入及状态转移的 DNA 编码方法与非确定性有穷自动机相同, 只不过对转移到接受状态的不同种状态转移分子需用不同的荧光标记。

4.3 讨论

基于确定性有穷自动机的算法的优点是需要合成的状态及状态转移的 DNA 分子的数量少, 所需的荧光标记分子的种类少, 只需一种, 而基于非确定性有穷自动机的算法的优点是试验次数少。该种算法还能用于素因子分解, 以确定性有穷自动机的算法为例, 如果一个整数不是素数, 那么上述 m 种有穷自动机就有一些最后所处的状态为接受状态, 设 y_k, y_b, \dots, y_p 等有穷自动机最后处于接受状态, 则整数 Z 的素因数为 $y_k y_b \dots y_p$ 等。

5 结束语

本文提出了一种基于有穷自动机的素性测试法的 DNA 算法, 并详细描述了该有穷自动机的构造方法。用 DNA 计算模拟有穷自动机时, 将有穷自动机的状态用单链 DNA 分子来编码, 而输入则用双链 DNA 分子编码, 用带环的双链 DNA 分子编码状态转移规则, 通过限制性内切酶的切割实现状态的转移。该算法的创新之处在于它是基于有穷自动机这种计算能力极其有限的计算模型上的, 并且它不仅能判断一个整数是否是素数, 还能用于素因子分解中。该算法的优点是容易实现, 所需的时间

是输入的多项式函数而不是指数函数。

参考文献:

- [1] ADLEMAN L. Molecular computation of solutions to combinatorial Pproblems[J]. Science, 1994, 266(9): 1021-1024.
- [2] GARZON M, ROSE J, GAO Y. DNA implementation of finite-state machines[A]. Proceedings of Genetic Programming 1997[C]. 1997. 479-490.
- [3] GAO Y, GARZON M, MURPHY R. DNA implementation of non-determinism[A]. Proceeding of the Third DIMACS Workshop on DNA Based Computers[C]. 1997. 204-211.
- [4] BENENSON Y, PAX-ELIZUR T, ADA R. Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules[J]. Nature, 2001, 414(11): 430-434.
- [5] WILHELM P, ROTHEMUND K. A DNA and restriction enzyme implementation of turing machines[A]. Proceeding of the Second DIMACS Workshop on DNA Based Computers[C]. 1996. 75-119.

作者简介:



杨学庆 (1972-), 女, 湖北仙桃人, 北京航空航天大学博士生, 主要研究方向为 DNA 计算、密码破译。

柳重堪 (1941-), 男, 江苏苏州人, 北京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理。

(上接第 79 页)

XU L M, PANG B, IHAO Y. NS and Network Simulation[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003.

- [8] MAGONI D. Nem: a software for network topology analysis and modeling[A]. Proc of the MASCOTS 2002[C]. IEEE Computer Society, 2002. 364-371.

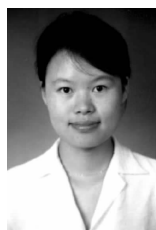
作者简介:



张冬艳 (1975-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为网络安全、网络测量。



胡铭曾 (1935-), 男, 江苏江阴人, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为高性能计算机体系结构、并行处理技术、容错计算、网络系统等。



张宏莉 (1973-), 女, 吉林榆树人, 博士, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络与信息安全、网络测量、网络计算等。