高技术通讯 2012 年 第22卷 第6期:604~609

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2012.06.008

基于随机扫描的并行网络模拟拓扑划分算法①

张兆心②*** 杜跃进*** 王 克* 童 琳* 郝志宇***

(*哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)
(**国家计算机网络应急技术处理协调中心 北京 100029)
(***中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

摘 要 为了提高并行网络模拟的性能,研究了实现有效的拓扑划分的策略,提出并实现了基于随机扫描的并行网络模拟拓扑划分(TPBRS)算法。基于启明星辰探测获得的实际拓扑进行的蠕虫模拟表明,该划分方法可适用于实际拓扑,并可进行大规模网络安全事件的模拟。实验结果表明,相对于传统划分算法,该拓扑划分方法减少模拟时间约19%,各个模拟节点模拟时间差值平均减少约21.78%,内存差值平均减少约4.6%,并且模拟时间和内存的增长更具有规律性,即负载均衡度更好,划分更加合理,提高了网络模拟的性能。

关键词 并行网络模拟,拓扑划分,随机扫描,概率

0 引 言

随着互联网的发展,网络行为越来越复杂,出现了各种各样的带来巨大负面影响的大规模网络安全事件,如蠕虫、DDoS、僵尸网络等。这些网络安全事件不可能在真实网络环境下重现,这就需要采用某些技术对互联网行为进行研究。当前研究 Internet 的方法主要有数学模型分析、网络测量、网络模拟、网络仿真、原形实验平台、实际网络测试与实验等6种[1-3]。网络模拟方法能详细刻画网络行为,且灵活、资源消耗小、规模大、效率高,成为目前研究互联网行为的主要方法。

面对大规模网络,单机模拟已无法满足需求,需要将待模拟任务进行分割,采用多台机器协作模拟,即并行网络模拟,大规模并行网络模拟已成为目前研究 Internet 的主要方法。并行网络模拟首先要进行任务分割[4],任务分割普遍采用基于拓扑的划分方式[5],提高并行网络模拟的性能需要一种有效的拓扑划分策略。这方面的研究取得了一定的进展。文献[6]提出根据节点在拓扑图中的核心程度估计其负载,采用拓扑划分工具进行划分,该方法可提高安全事件模拟效率,但其数据包转发策略与实际不符;文献[7]提出并行网络蠕虫模拟任务的优化划分方法,采用改进的模拟退火算法实现任务划分,对蠕虫模拟性能大大提高,但不能对 DDoS 等进行有效划分;文献[8]和[9]提出一种基于聚类指导的异构网络拓扑划分方法,使具有不同计算能力的节点能更好地协同工作;文献[10]在考虑负载均衡和远程通讯量最小化的前提下,结合时间窗口最大化方法,使并行模拟器之间同步次数减少,提高模拟性能;文献[11]提出了一种基于链路粗糙化的并行网络模拟拓扑划分算法,该算法将具有最多连通关系的边聚合在一起,减少了远程链路的条数,但很难保证负载均衡;文献[12]提出了一种基于回退的并行网络模拟拓扑划分算法,即在 METIS 划分后,在保证节点数据量平衡的条件下,不断移动边界节点,并记录移动过程,从多个过程中选取一个最佳值作为最终结果;文献[13]以内部数据流量为基础对拓扑进行划分,可减少远程路由器数和增大 Windows 时间窗口。上述研究从各个方面来提高并行网络模拟的效率,但对具有几万、几十万甚至上百万规模的真实、复杂的网络拓扑进行划分是一个挑战。针对这种情况,本文研究了传统的基于无权的网络拓扑划分(topology partitioning based on no-weight,TPBNW)存在的问题,运用概率学的原理,提出了基于随机扫

① 863 计划(2007AA010503),国家自然科学基金(61100189,61003261)和山东省中青年科学家奖励基金(BS2011DX001)资助项目。
② 男,1979 年生,博士,副教授;研究方向:网络与信息安全;联系人,E-mail:heart@hit.edu.cn
(收稿日期:2011-05-17)

描的拓扑划分(topology partitioning based on random scanning,TPBRS)方法。实验表明,相对于传统划分算法,该拓扑划分方法可提高网络模拟的性能。

1 TPBNW 方法

传统拓扑划分算法的目标是将拓扑均匀地分散到各个模拟节点上。首先将所有非终端路由器节点和链路的权值初始化为 1,然后将终端路由器节点的权值初始化为其所连主机数加 1,并将主机节点从拓扑中剔除,最后使用多级划分算法对拓扑图进行划分。因划分过程中没有考虑节点和链路的负载,仅以节点数量为划分标准,故这种划分方法称为无权拓扑划分(TPBNW)。设 *all _ rt* 为所有路由器集合,*rt- > vw* 为路由器权值,*rt- > hostnum* 为路由器下主机数,*link- > ew* 为边权值,则 TPBNW 划分权值定义算法如下:

```
01.  procedure CalcWeightNW (graph)
02.      all _ rt ← all router set;
03.      for each rt ∈ all _ rt do
04.          rt - > vw ← rt - > hostnum + 1;
              for each link ∈ adjacent edge of rt do
05.              link - > ew ← 1;
06.          end for
07.      end for
08.  end procedure
```

算法中第 4 行对所有路由器的权值进行初始化,终端路由器权值为主机数量加 1,非终端路由器权值为 1;第 6 行将所有链路权值都初始化为 1。

显然,这种按照节点个数定义权值的无权拓扑方法能将节点基本均匀地分布在不同 SIM 中,但节点的均衡并不代表负载的均衡。实际网络中,各个路由器和各条链路的负载是不同的,即其转发和承载的数据包数量是不同的。在模拟过程中,这种数据包的转发是一种动态资源消耗过程,如果忽略,必将导致模拟资源消耗的不均衡,从而导致各模拟节点模拟时间长短的不均衡。因此如能在拓扑划分过程中将待模拟事件的特性作为影响因素融入划分算法中,即利用事件的特性,估计负载,并将其作为节点和链路的权值,必能在保证节点基本平衡的前提下,提高负载的均衡度,从而提高划分的有效性,并提高模拟的性能。

2 TPBRS 方法

不同于 DDoS 攻击,蠕虫和僵尸网络感染策略经常使用随机策略,故其数据包传播具有随机性。当一个新的主机被蠕虫或僵尸感染后,成为一个新的扫描点,继续感染其他主机。传播具有典型的三阶段:缓慢开始,快速传播和缓慢完成。具体如图 1 所示。

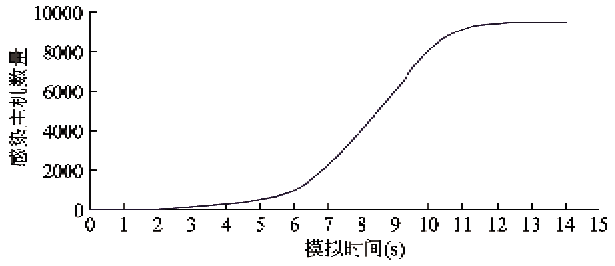


图 1 传播曲线图

如图 1 所示,在起始传播阶段,因起始扫描节点少,扫描数据包量还处在较低水平,此时传播速度比较慢。随着感染主机数量的增加,扫描数据包量快速增长,此时传播速度迅速提高。当扫描区域内的所有可被感染点已被感染时,则感染数量达到峰值,此后一直维持着这个数量,直至感染结束。

对于随机扫描攻击方式而言,扫描产生的数据包流向具有较大的随机性,不能事先确定安全事件模拟过程中流量的分布。鉴于此,基于概率学原理,每个 IP 地址具有相同的收包概率,其被最短链路经历的次数越多,转发数据包的数量也越大,故赋予其权值也越大。

2.1 权值定义

采用蠕虫随机扫描策略时,只有终端路由器下挂载主机,数据包源于主机。为了简化问题,可以认为所有数据包都来源于终端路由器,并且每一个路由器收到数据包的概率是相同的。鉴于此,基于随机扫描拓扑划分的权值定义过程如下:

步骤 1:所有路由器和链路负载初始化为 0,终端路由器负载定义为它拥有的主机数;

步骤 2:对于每个终端路由器,计算它与所有其它路由器的最短路径,并保存最短路径;

步骤 3:对于每条最短路径上的每个路由器和每条链路,更新其权值为原来权值加上最短路径两端路由器负载的乘积。

步骤 4:重复步骤 2,直至计算对所有终端路由器计算完最短路径。

这种计算节点和链路权值的方法基于如下原理:在随机 IP 扫描情况下,每个路由器或主机收到数据包的概率相等。那么,就可以假设每个主机向所有路由器和其它主机各发送一个数据包,路由器或主机收到一个数据包就将权值加 1,链路权值计算也按照该方法。如图 2 所示,假设每个终端路由器拥有一个主机,它们起始的权值都为 1。

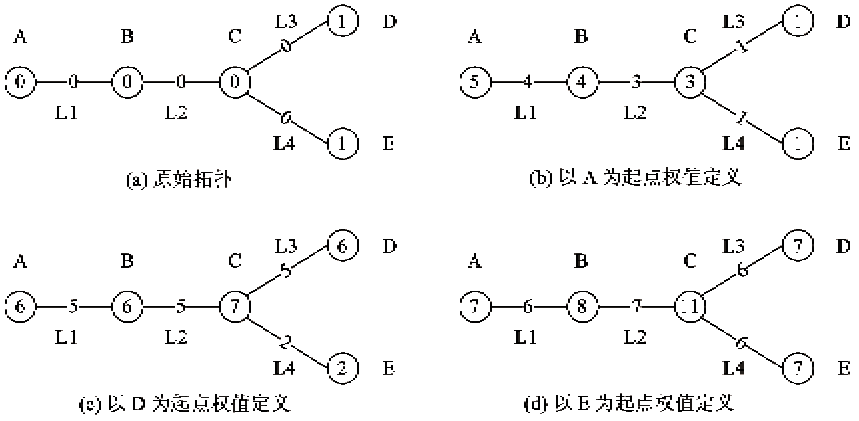


图 2 权值计算过程

图 2(a)中有 A、D、E 3 个终端路由器,首先以 A 为起点,它可以向所有路由器发送数据包,包括自身,所以将自己权值更新为 5,同理,D、E 权值也更新为 1。对于 C 节点,A 向 D 和 E 节点发送的数据包都要经过 C,再加一次 A 到 C 的数据包,共 3 次,故将 C 的权值更新为 3,依此类推,B 的权值为 4。同样将数据包经过次数定义为链路权值,结果如图 2(b)所示。再分别以 D、E 为起点,更新所有路由器和链路的点权值,路由器和链路权值变化过程如图 2(c)和图 2(d)所示。C 节点处于核心地位,因此其权值较高。

TPBRS 划分算法使得路由器通过的数据包越多,它的负载也越大,同样它的权值也就越大。将负载转换为权值后划分使得模拟过程中负载更加均衡。另外,链路权值高也代表了其通过的数据量大,因此使用多级拓扑划分有助于减少总的远程通讯开销。

2.2 拓扑划分

根据上述思想,设 *term _ rt* 为所有终端路由器的集合,*all _ rt* 为所有路由器集合,*vec _ it* 为终端路由器,*vec _ it _ other* 为非终端路由器。TPBRS 划分算法描述如下:

```
01.  procedure TPBRS (graph)
02.    CalcWeightNW (graph)
03.    term _ rt ← all terminal router set;
04.    all _ rt ← all router set;
05.    for each vec _ it ∈ term _ rt do
06.      BFS (graph, vec _ it);
07.      for each vec _ it _ other ∈ all _ rt do
08.        weight ← the product of both ends
           of the shortest path
09.        for each rt ∈ router in shortest-path do
10.          if rt ∈ term _ rt then
11.            rt- > vw = rt- > hostnum;
12.          else if
13.            rt- > vw += weight;
14.          end if
15.        end for
16.        for each ep ∈ link in key-path do
17.          ep- > ew += weight;
18.        end for
19.      end for
20.    end for
21.    TP (graph)
22.  end procedure
```

TPBRS 划分算法与传统划分算法的不同之处在于权值的定义方式,良好的权值定义方式必能带来良好的负载均衡度,并减少远程通讯量。

3 实验及分析

为验证 TPBRS 划分算法相对于 TPBNW 划分算

法的改进程度,设计如下三组实验。不同结构和规模的拓扑,相同安全事件模拟时间对比;固定拓扑,改变攻击频率,相同安全事件模拟时间对比;相同安全事件,相同拓扑,各个模拟节点模拟时间对比,内存占用量对比。

3.1 不同拓扑模拟时间对比

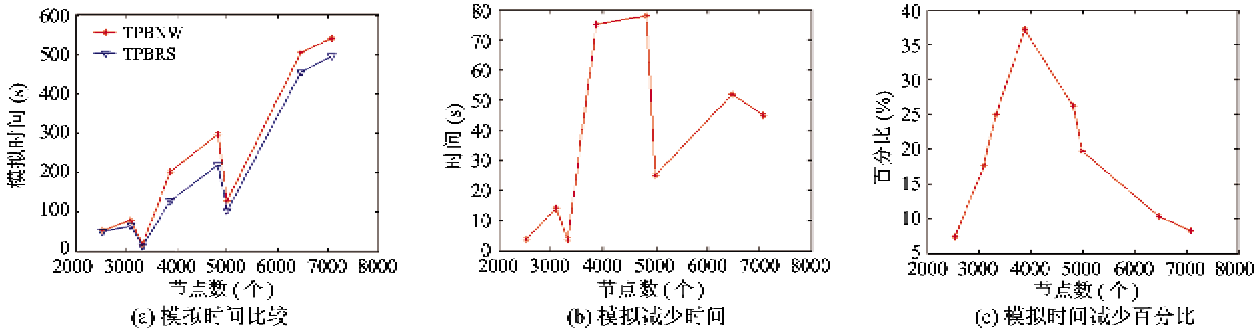
测试环境如表 1 所示。

表 1 模拟拓扑结构

实验编号	实验拓扑	总节点数	路由器数	路由器间链路条数	终端路由器数	主机数	路由器平均度数
1	国家骨干网	2530	226	380	72	2304	3.3628
2	福建省	3095	183	319	91	2912	3.4863
3	云南省	3323	187	238	98	3136	2.5455
4	陕西省	3877	357	737	110	3520	4.1289
5	重庆市	4823	375	717	139	4448	3.8240
6	湖北省	4993	321	475	146	4672	2.9595
7	内蒙古自治区	6472	424	655	189	6048	3.0896
8	江苏省	7078	486	877	206	6592	3.6091

随机将一个终端路由器下的 30 个主机作为蠕虫扫描源,其扫描频率为 200pps。模拟结果如图 3 所示。

从图 3 中看出,对于不同结构和规模的拓扑,TPBRS 划分算法下蠕虫模拟时间要比 TPBNW 划分算法缩短约 19%。不同于 DDoS 攻击,蠕虫模拟可能向所有节点发送数据包,随着蠕虫感染的主机越来越多,模拟的环境中数据包量会急剧增加,模拟会越来越慢。因此随着拓扑规模扩大,主机数量也增加,能被感染的主机变多,导致模拟流量增加从而使模拟时间变长。



(a) 模拟时间比较 (b) 模拟减少时间 (c) 模拟时间减少百分比

图 3 不同划分算法下蠕虫模拟时间

从图 3 中还能发现,第 3 个和第 6 个拓扑下的模拟时间较短,这是因为模拟性能与拓扑结构有关,这两种拓扑节点平均度数较小,其内部树形结构多,路由算法会对这种形式的拓扑结构进行路由存储优化,路由效率非常高,因此模拟时间短。

3.2 固定拓扑不同频率模拟时间对比

拓扑结构对实验的结果具有很强的干扰性,在此固定拓扑,通过改变攻击频率,比较两种拓扑划分算法相同安全事件模拟时间的对比。模拟结果如图 4所示。

从图 4 可知,蠕虫模拟时间随着攻击频率的增大而增加,理论上可以分为 3 个阶段。第一阶段随发包频率增加模拟时间增加非常缓慢,这是由于开始时蠕虫发包量较小。第二阶段模拟时间随着攻击频率迅速增加,这阶段由于大量的主机被感染,发送的数据包量急剧增加。最后一个阶段随发包频率增加模拟时间以恒定斜率增加,因为此时所有主机都被蠕虫感染,每个主机都以恒定的速率继续发送数据包,模拟时间随攻击频率变化的关系模型退化为一个全局主机进行的随机 DDoS 攻击模型。

从图 4 还可以看出,随着攻击频率的增加,TPBRS划分方法相对于 TPBNW 划分方法的模拟时间增加的比例更少,即同等条件下,TPBRS 方法比 TPBNW 方法能节省更多的模拟时间。

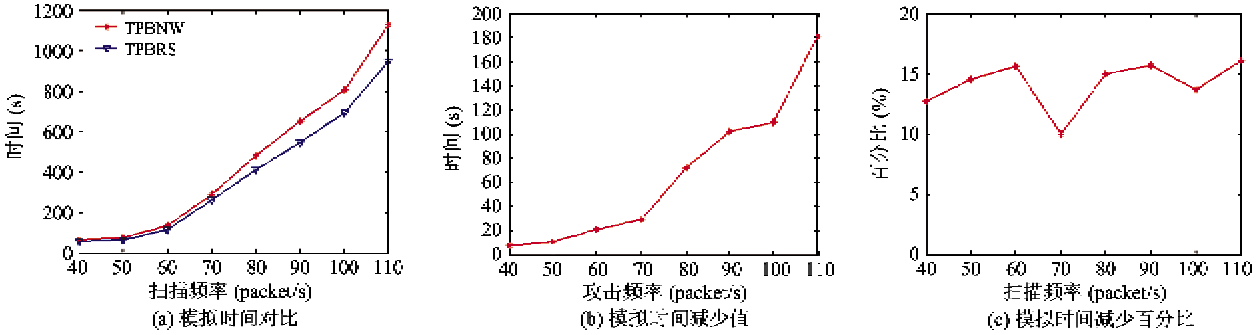


图 4 固定拓扑结构下的蠕虫模拟时间对比

3.3 负载均衡度对比

为进一步比较两种划分策略,采用相同实验环境,比较两种划分策略的负载均衡度,负载均衡度体现在各个模拟节点模拟所需时间和内存的占用量。实验拓扑如表 2 所示。

在如表 2 所示拓扑环境下,进行蠕虫感染,随机选取一个终端路由器所连主机作为起始感染节点,扫描频率为 100pps,采用两个模拟节点进行模拟,模拟结果如图 5 所示。

表 2 模拟拓扑结构

编号	实验拓扑	路由器数	终端路由器数	主机数	总节点数	路由器间链路数
1	湖北	321	146	4672	4993	475
2	浙江	610	286	9152	9762	1380
3	山东	1176	546	17472	18648	3167
4	天津 + 北京	4483	1632	52224	56707	10766
5	天津 + 北京 + 广东 + 黑龙江	7994	345	103500	111494	17111

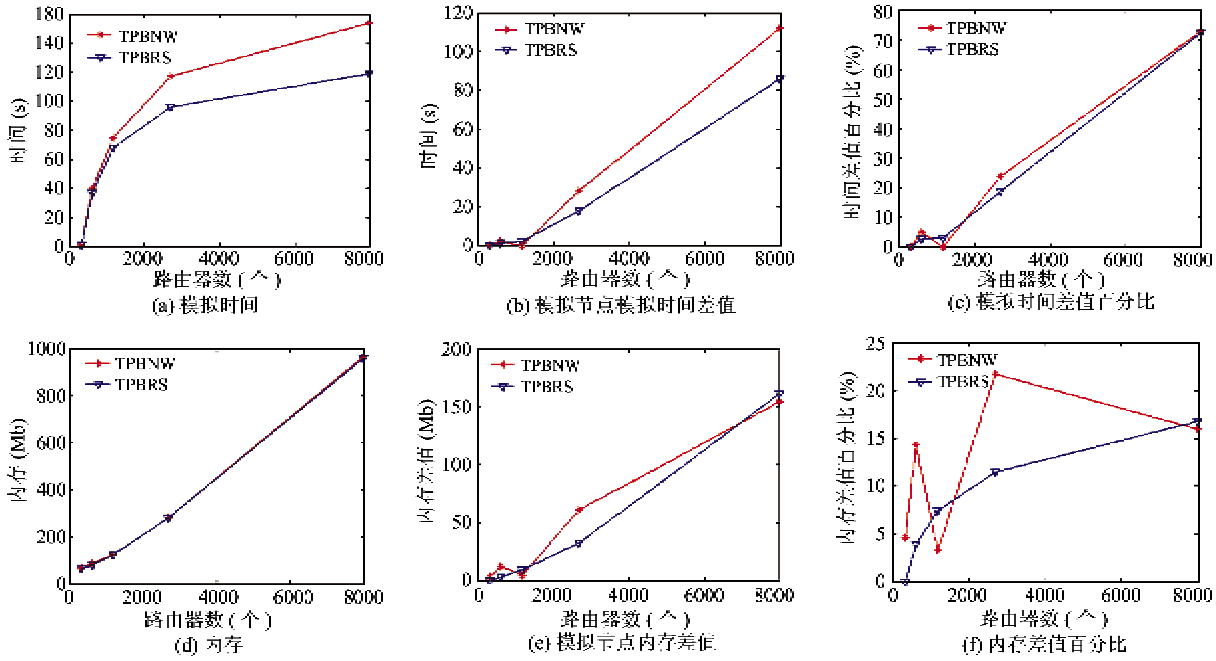


图 5 负载均衡度对比

从图 5 中可以看出,TPBRS 划分的结果较 TPBNW 划分的结果更合理。如图 5(a)所示,经 TPBRS 划分后,所需模拟时间较 TPBNW 划分平均缩短 13.2s,平均减少模拟时间约11.48%,并且随着模拟规模增长,模拟时间增长率低。从图5(b)和图5(c)中可以看出,经 TPBRS 划分后,两个模拟节点的模拟

时间差值较 TPBNW 划分平均缩短 7s,平均减少模拟时间差值21.78%,并且随着模拟规模的增加,增长率降低,这说明 TPBRS 划分策略负载更加均衡。从图 5(d)中可以看出,TPBRS 和 TPBNW 划分后模拟所使用的内存基本相同。从图 5(e)和图 5(f)可以看出,经 TPBRS 划分后,两个模拟节点所使用的内存差值较 TPBNW 平均减少 5.8M,并且内存差值增加及增加百分比更具有一定的规律性。从上述分析可以看出,TPBRS 划分较 TPBNW 划分具有更好的负载均衡度,模拟时间更短,从而提高了并行网络模拟的效率。

4 结 论

大规模并行网络模拟已成为目前研究 Internet 的主要方法,针对目前普遍使用的随机扫描策略,本文提出并实现了基于随机扫描的并行网络模拟拓扑划分算法。基于启明星辰探测获得的实际拓扑进行蠕虫模拟表明,该划分方法可适用于大规模实际拓扑及其上发生的安全事件。实验结果表明,相对于传统划分算法,该拓扑划分方法减少模拟时间约19%,各个模拟节点模拟所需时间差值平均减少约21.78%,内存差值平均减少约 4.6%,并且模拟时间和内存的增长更具有规律性,即划分更加合理,提高了网络模拟的性能。

参考文献

[1] Ammar M H. Why we still don't know how to simulate networks. In: Proceedings of 13th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, Atlanta, USA, 2005. 179-182

[2] 雷擎, 王行刚. 计算机网络模拟方法与工具. 通信学报, 2001,22(9): 84-90

[3] Yan G. Improving Large-Scale Network Traffic Simulation with Multi-Resolution Models: [Technical Report TR2005-558]. Department of Computer Science, Dartmouth College, 2005

[4] 尤洪涛,姜小成,陈左宁等. 基于动态任务划分的降级机制. 微计算机信息, 2006,30(0-3):72-75

[5] Schloegel K, Karypis G, Kumar V. Graph Partitioning for High Performance Scientific Simulations, Sourcebook of Parallel Computing. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2003. 491-541

[6] 王晓峰, 方滨兴, 云晓春等. 并行网络模拟中的一种拓扑划分方法. 通讯学报, 2006,27(2):16-21

[7] 王晓峰, 方滨兴, 云晓春等. 并行网络蠕虫模拟中任务优化划分的研究. 计算机学报, 2006,29(8):1367-1374

[8] 彭大伟. 异构计算环境下网络模拟任务划分方法的研究:[硕士学位论文]. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 2007. 18-21

[9] 徐锐. 大规模计算环境下网络模拟多任务划分研究:[硕士学位论文]. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 2006. 12-17

[10] 王蕾. 并行网络模拟任务的优化划分方法研究与实现:[硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 2006

[11] Yang X Q, He H, Zhang H L, et al. A topology partition algorithm based on link coarsening in parallel network simulation. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Science and Engineering, 2009. 514-518

[12] 张慈,张兆心,迟乐军. 基于回退的并行网络模拟拓扑划分算法. 微计算机信息, 2011,27(4):150-151,173

[13] Liu Y, Li B, Dong K K, et al. Reaching of topology partition for parallel network simulation. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Shenzhen, China, 2009. 18-21

A topology partition algorithm for parallel network simulation based on random scanning

Zhang Zhaoxin[*,***], Du Yuejin[*,**], Wang Ke[*], Tong Lin[*], Hao Zhiyu[***]

([*] School Computer Science and Technology Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

([**] National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China, Beijing 100029)

([***] Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Science, Beijing 100190)

Abstract

The study aimed to find an effective topology partition policy to improve the performance of the parallel network simulation. With the theory of random scanning probability, an algorithm for topology partitioning based on random scanning (TPBRS) for parallel network simulation was put forward and implemented. The simulation results based on the real topology obtained by Venusense prove that this partition algorithm can be used in real topology and large scale security event simulations. The test results prove that compared with the traditional partition, this partition policy can reduce the simulation time by 19 percent, the difference of simulation time among simulation nodes by 21.78 percent, and the memory by 4.6 percent. The growth of simulation time and memory have good regularity, which means the better load balancing degree and partition result, and improvement of the performance of simulation.

Key words: parallel network simulation, topology partition, random scanning, probability