

向量地址平均长度研究^①

赵阿群^② 梁满贵 廉松海 郭箫铭

(北京交通大学计算机与信息技术学院 北京 100044)

摘 要 通过引入复杂网络理论,利用理论分析方法对向量地址作为一种新的转发地址用于组建全球网时的平均地址长度进行了研究,得出了在覆盖相同用户数量的情况下向量地址的平均长度远小于 IPv4 的 32 位地址长度的结论,并采用仿真实验的方法在实际的网络拓扑模型中对平均地址长度进行了实验验证。结果表明,用向量地址除了能构建比现有网络更安全、更简单、适应性更强的网络外,在相同地址长度下,用向量地址构建的网络还能覆盖比 IP 网络多得多的用户数量。

关键词 通信网络,转发地址,向量地址,复杂网络

0 引 言

向量地址是文献[1]提出的一种新的转发地址。转发地址在分组交换网络中起着举足轻重的作用,它负责将数据包从信源设备转发到信宿设备。当前网络使用的转发地址编码有两种,一种是以 IP 地址为代表的节点编码,另一种是以 ATM 路径信道地址为代表的链路编码。向量地址不同于上述转发地址,它依靠电子设备的端口号进行地址编码。依据向量地址编码方法建立的网络称为向量网^[2],向量网中的转发设备称为向量交换机^[3]。

向量地址是一种不定长地址,在数据转发过程中,数据包每经过一个转发设备,其目标地址就缩短一些,直至到达信宿设备,地址长度变为 0。直观上讲通信网络规模越大,向量地址越长,通信网络规模越小,向量地址越短。向量地址的长度直接影响通信线路资源的使用效率,是向量地址能否应用于实际通信网络的关键因素之一,因此本文进行了向量地址平均长度研究,主要研究向量地址用于组建全球网时的平均地址长度。首先建立了一个估算模型,然后引入复杂网络理论,利用理论分析方法计算向量地址平均长度,并通过仿真实验进行验证。

1 背景

向量网采用身份标识(即域名)、路由地址和向量地址三标识体系,身份标识到路由地址的解析通过呼叫来完成,路由地址到向量地址的解析通过寻由来完成^[4]。呼叫是信源以信宿的身份标识作为目标,向网络发出呼叫请求,网络根据标识架构确定信源通向信宿的呼叫路径,通过这一呼叫路径双方协商通信格式,信源得到信宿的路由地址。寻由是在协商好的通信格式下,信源以信宿的路由地址作为目标,向网络发出寻由请求,根据可达性评价进行分支探索,其结果是得到指定数量的合理路径,同时获得信源到信宿的向量地址。与 IP 网中的域名系统(domain name system, DNS)相比,向量网中的地址解析具有如下特点:(1)在网络第三层就定义了身份标识,而 IP 网第三层不知道域名的存在;(2)身份标识到向量地址的解析功能被融入整个网络,而不是使用类似 IP 网的 DNS,避免了服务集中带来的不可靠性。

向量网提供了一种内在支持移动的方法^[5],可适应互联网的动态变化。它采用身份标识和转发地址相分离的思想,身份标识用于标识节点的身份,在运输层和呼叫时使用,转发地址用于标识节点的位置,在数据转发时使用。节点位置发生改变,只是改

① 863 计划(2007AA01Z203),973 计划(2007CB307101)和中央高校基本科研业务费专项资金(2009JBM021)资助项目。

② 男,1974 年生,博士,副教授;研究方向:计算机网络;联系人,E-mail: aqzhao@bjtu.edu.cn
(收稿日期:2010-04-13)

变了转发地址,而身份标识保持不变,这样节点的移动对运输层来说就是透明的了。在向量网中,将单个节点的移动,整个网络的移动和网络结构的变化都统一理解为网络拓扑结构的变化,采用一种统一的方法来处理。对于一次节点移动过程来讲,会依次经历移动检测、拓扑更新和路径切换的过程。移动检测即节点发生了移动后网络如何检测到这一事件的发生;节点移动必然导致网络拓扑结构发生变化,拓扑更新即是网络拓扑结构更新到节点移动之后的情况;节点的移动还会导致正在通信的节点之间原有链路中断,路径切换即移动节点重新建立起通信链路,维持原有通信不中断。针对向量网的特性,设计了完整的移动检测、拓扑更新和路径切换的机制。

2 估算模型

一个具体的通信网络可以抽象为一个由点集 V 和边集 E 组成的图 $G = (V, E)$, 在估算模型中,我们只考虑无向无权网络,并且假设没有重边和自环,即任意两个节点之间至多只有一条边,并且没有以同一个节点为起点和终点的边。

网络中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点的最短路径上的边数,网络的平均路径长度 L 定义为任意两个节点之间距离的平均值,即

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (1)$$

其中 N 为网络节点数。

网络中节点 i 的度 k_i 定义为与该节点连接的其他节点的数目,网络的节点平均度 K 定义为网络中所有节点的度的平均值,即

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (2)$$

网络中节点的度的分布情况可用分布函数 $P(k)$ 来描述, $P(k)$ 表示的是一个随机选定的节点的度恰好为 k 的概率。

使用向量地址作为转发地址进行通信时,向量地址的长度取决于两个因素,一是分量地址的个数,二是每个分量地址的长度。分量地址的个数取决于信源与信宿之间的距离,每个分量地址的长度取决于通信路径上每个节点的端口个数,即节点的度。

在估算模型中,设每个分量地址的平均长度

(即分量地址所占比特数)为 b (b 为整数),考虑到端口从 1 开始编号,有

$$2^b - 1 \geq K > 2^{b-1} - 1 \quad (3)$$

因此有

$$b = \lceil \log_2(K+1) \rceil \quad (4)$$

考虑到向量地址的第 1 个分量地址在信源发出数据包前就已被删除,不会出现在网络中,因此一个向量地址中分量地址的平均个数为 $L-1$,再考虑向量地址的传递削减特性(即向量地址经过每个节点时将删除相应的分量地址),可得向量地址的平均长度 V 的计算公式为

$$V = \frac{b(L-1)}{2} \quad (5)$$

3 向量地址平均长度

实际的通信网络是一个典型的复杂网络,在复杂网络理论^[6]中,人们提出了各种各样的网络拓扑结构模型,我们选择其中较为典型的随机图模型^[7]、小世界模型^[8]和无标度模型^[9]来研究向量地址用于组建全球网时的平均地址长度。

3.1 随机图模型

在随机图模型中,任意两个节点之间有一条边相连接的概率为 p , p 的临界值 p_c 为 $(\ln N)/N$ (N 为节点数目),即当 $p > p_c$ 时,随机图可能会突然涌现某些重要性质。随机图模型中,节点的平均度 K 和网络的平均路径长度 L 分别为

$$K = p(N-1) \approx pN \quad (6)$$

$$L = \frac{\ln N}{\ln K} \quad (7)$$

我们取节点数目 $N = 2^{32}$ (为互联网协议 IPv4 网络理论上能够容纳的最大节点数),此时临界概率 p_c 为 52×10^{-10} , 概率 p 在 p_c 附近取值 ($p = 10^{-9} \sim 10^{-8}$), 根据式(6)、(7)、(4)和(5)分别计算不同连接概率情况下节点的平均度 K , 网络的平均路径长度 L 和向量地址平均长度 V , 计算结果如图 1 所示。

从图中可以观察到,在节点数目 N 为 IPv4 网络理论上能够容纳的最大节点数的情况下,向量地址平均长度 V 最大值在 21 左右,大部分情况下围绕 15 上下波动,远小于 IPv4 的 32 位地址长度。在典型的网络配置下(节点的平均度即端口数 K 保持在 6~14 之间),网络的平均路径长度 L 在 13~8 之间,向量地址平均长度 V 在 20~15 之间。另外可

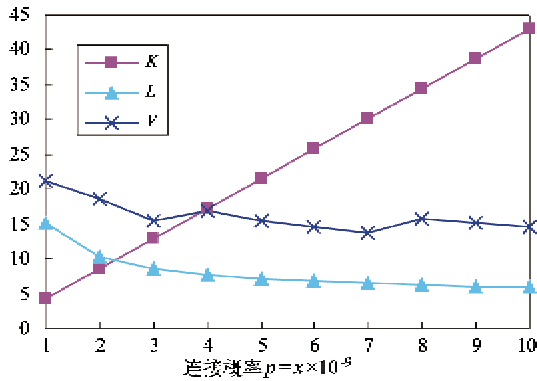


图1 随机图模型中地址长度随连接概率的变化

见,连接概率 p 的变化会导致 K 的线性变化,但却不会导致 V 的显著变化。

我们试着增大节点数目 N 的值,取 $p = p_c/3$ (如上图可知 p 的取值对 V 的影响不大,如此取值是为了确保 K 值保持在 6 ~ 14 的典型网络配置下),根据式(6)、(7)、(4)和(5)分别计算不同的节点数目 N 下节点的平均度 K , 网络的平均路径长度 L 和向量地址平均长度 V , 计算结果如图 2 所示。

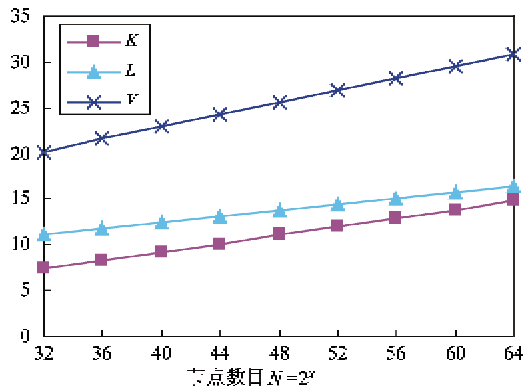


图2 随机图模型中地址长度随节点数目的变化

从图中可以观察到,在典型的网络配置下,向量地址的平均长度 V 随着节点数目 N 的增大而增大,当 $N = 2^{64}$ 时,即节点数目达到 1.845×10^{19} 时, V 接近于 32 (IPv4 的地址长度)。

3.2 小世界模型

在介绍小世界模型之前,先引入最近邻耦合网络,它是一种规则网络模型,该模型中 N 个节点围成一个环,其中每个节点都只与它左右各 $J/2$ 个邻居点相连 (J 为偶数)。不难看出,最近邻耦合网络中每个节点的度均为 J 。

小世界模型是在最近邻耦合网络的基础上进行随机化重连而得到的,即以概率 q 随机地重新连接

网络中的每个边,将边的一个端点保持不变,而另一个端点取为网络中随机选择的一个节点。该模型中, $q = 0$ 对应于完全规则网络, $q = 1$ 则对应于完全随机网络,通过调节 q 的值就可以控制从完全规则网络到完全随机网络的过渡。

从小世界模型的构造方法可知,在从最近邻耦合网络到小世界模型的随机化重连过程中,并没有改变网络中所有节点的总度数,因此节点的平均度也不会变化,仍然为 J , 即

$$K = J \quad (8)$$

小世界模型的平均路径长度的表达式为^[10]

$$L = \frac{2N}{J} f\left(\frac{NJq}{2}\right) \quad (9)$$

其中 $f(u)$ 为一普适标度函数,其近似表达式为^[11]

$$f(x) \approx \frac{1}{2\sqrt{x^2+2x}} \operatorname{arctanh} \sqrt{\frac{x}{x+2}} \quad (10)$$

我们取节点数目 $N = 2^{32}$, K (即 J) 取值范围为 6 ~ 14 (典型网络配置的平均端口数), q 分别取值为 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 根据式(8)、(9)、(10)、(4)和(5)计算向量地址平均长度 V , 计算结果如图 3 之曲面图所示。

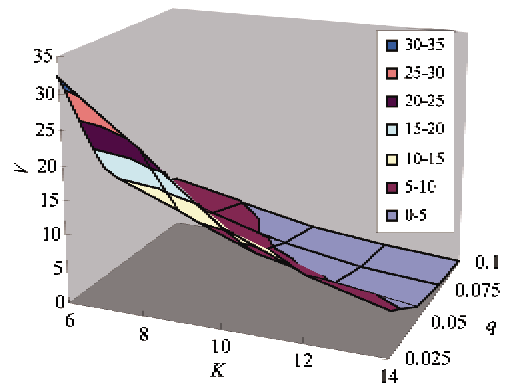


图3 小世界模型中地址长度随参数 K 和 q 的变化

从图中可以观察到,在典型的网络配置下,向量地址平均长度 V 的取值在 1 ~ 32 之间随着 q 和 K 的减小而增大,其最大值出现在 $q = 0.025$, $K = 6$ 的情况下,此时 V 的取值大致为 32,与 IPv4 的 32 位地址长度相当。因此可以得出:只要概率 q 大于等于一定的阈值 $q' = 0.025$, 即网络保持一定的随机性(事实上大规模实际通信网络确实具有一定的随机性),在典型网络配置下,向量地址平均长度 V 小于 IPv4 的 32 位地址长度。

我们在 $q = q'$, $K = 10$ (6 ~ 14 的均值)的情况

下试着增大 N 的值,根据式(8)、(9)、(10)、(4)和(5)分别计算不同的节点数目 N 下网络的平均路径长度 L 和向量地址平均长度 V , 计算结果如图 4 所示。

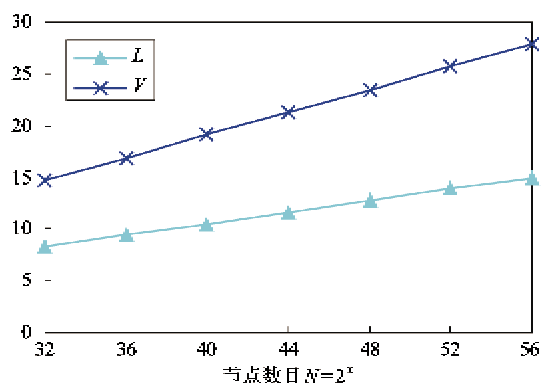


图 4 小世界模型中地址长度随节点数目的变化

从图中可以观察到,在该典型网络配置下,网络的平均路径长度 L 和向量地址的平均长度 V 随着节点数目 N 的增大而增大,当 $N = 2^{36}$ 时,即节点数目达到 7.21×10^{16} 时, V 大约为 28, 离 IPv4 的 32 位地址长度较为接近。

3.3 无标度模型

随机图和小世界模型的一个共同特征就是网络的连接度分布可近似用 Poisson 分布来表示,近年来在复杂网络研究上的另一重大发现就是许多复杂网络的连接度分布函数具有幂律形式,这类网络称为无标度网络。

无标度网络的构造算法如下:从一个具有 m_0 个节点的网络开始,每次引入一个新的节点,并且连接到 m 个已存在的节点上 ($m \leq m_0$),一个新节点与一个已经存在的节点 i 相连接的概率 Π_i 与节点 i 的度 k_i 、节点 j 的度 k_j 之间满足如下关系:

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (11)$$

经过 t 步后,该算法产生一个有 $N = t + m_0$ 个节点、 mt 条边的网络。

无标度网络的平均路径长度为^[13]

$$L \approx \frac{\ln N}{\ln \ln N} \quad (12)$$

无标度网络的度分布函数为^[13]

$$P(k) = \frac{2m(m+1)}{k(k+1)(k+2)} \approx 2m^2 k^{-3} \quad (13)$$

从而可求得节点的平均度为

$$K = \sum_{k=1}^{\infty} kP(k) \approx 2m \quad (14)$$

我们取节点数目 $N = 2^{32}$, 根据式(12)、(14)、(4)和(5)分别计算在 m 取不同值情况下 ($m = 1, 2, 3, \dots$) 节点的平均度 K , 网络的平均路径长度 L 和向量地址平均长度 V , 计算结果如图 5 所示。

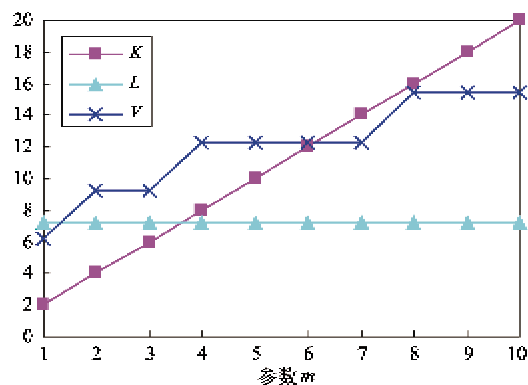


图 5 无标度模型中地址长度随参数 m 的变化

从图中可以观察到,节点的平均度 K 随着 m 的增长而线性增长,网络的平均路径长度 L 与 m 无关,而向量地址平均长度 V 随着 m 的增长而增长,但增长速度较为缓慢。在典型的网络配置情况下, V 的值在 9 ~ 13 之间,远小于 IPv4 的 32 位地址长度。

我们在 $K = 10$ (即 $m = 5$) 的情况下试着增大 N 的值,根据式(12)、(4)和(5)分别计算不同的节点数目 N 下网络的平均路径长度 L 和向量地址平均长度 V , 计算结果如图 6 所示。

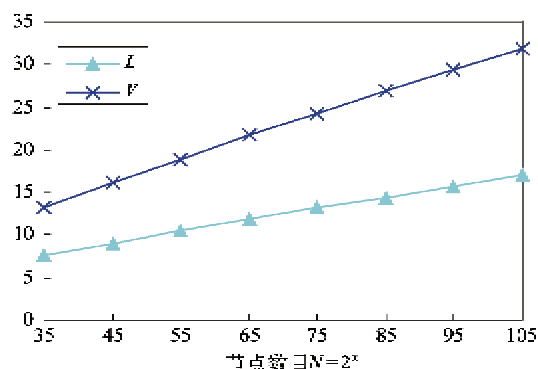


图 6 无标度模型中地址长度随节点数目的变化

从图中可以观察到,在该典型网络配置下,网络的平均路径长度 L 和向量地址的平均长度 V 随着节点数目 N 的增大而增大,当 $N = 2^{105}$ 时,即节点数目达到 4.1×10^{31} 时, V 接近于 IPv4 的 32 位地址长度。

4 仿真实验

为了在实际的网络拓扑环境中对向量地址平均长度进行验证,我们进行了仿真实验。在仿真实验中利用波士顿大学网络拓扑生成器(Boston University representative internet topology generator, BRITE)^[14]生成指定路由器数目的网络拓扑,然后以生成的网络拓扑为基础构建向量网,编写仿真软件实现向量交换,并统计向量地址平均长度。

我们仿真实现了 10000 个路由器节点的网络拓扑,这样的网络能够容纳数百万到上亿数目的主机节点,属于中大规模通信网络。以该网络为基础构建向量网,统计得到的向量地址平均长度大约为 12 位,远小于 IPv4 的 32 位地址长度。该网络中向量地址长度分布如图 7 所示,从图中可以观察到,向量地址长度接近于正态分布,地址长度值主要分布在平均长度 12 附近,长度在 9~14 之间的地址出现概率高达 90% 以上。

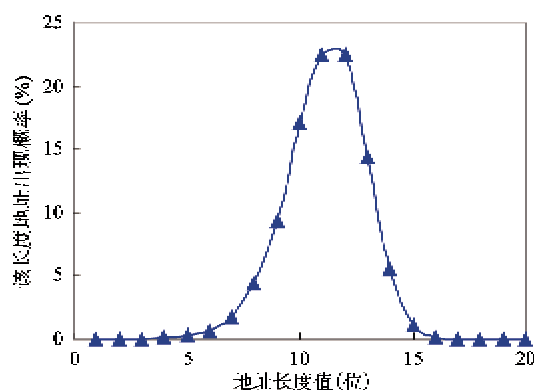


图 7 向量地址长度分布示意图

5 结论

综合以上分析,可以得出如下结论:用向量地址组建全球网时,在覆盖相同用户数量的情况下向量地址的平均长度远小于 IPv4 的 32 位地址长度,或者说向量地址平均长度等于 32 位的网络能够覆盖比 IPv4 网络多得多的用户数量。这一结论与实际通信网络的拓扑结构无关。研究结果为向量地址应用于实际通信网络提供了理论依据。下一步研究工作主要集中在以向量地址为基础构建通信实验网络,并解决其中的理论和实际问题,如向量网的服务质量问题,向量交换机的实现等。

参考文献

- [1] 梁满贵. 一种向量网络地址编码方法. 中国专利, ZL200610089302.6. 2009-09-02
- [2] Liang M G, Zhang J X, Wang S J. A new network based on vector address. In: Proceedings of the 2nd IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks, Beijing, China, 2008. 118-122
- [3] Wang Z W, Liang M G. Vector address routing protocol for MANET. In: Proceedings of the 9th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2008. 2637-2641
- [4] 梁满贵. 一种向量数据通信网上建立向量连接的方法. 中国专利, ZL200710064804.8. 2009-10-28
- [5] Zhao A Q, Liang M G. A new mobile network architecture. In: Proceedings of the 2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology, Shanghai, China, 2008. 686-689
- [6] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2006. 12-28
- [7] Domingos D J, Yoshiharu K, Vojtěch R, et al. Universality of random graphs. In: Proceedings of the 19th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, San Francisco, USA, 2008. 782-788
- [8] Zou Z Y, Mao B H, Hao H M, et al. Regular small-world network. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(11): 110502, 1-3
- [9] Li Y, Cao H D, Shan X M, et al. An estimation formula for the average path length of scale-free networks. *Chinese Physics B*, 2008, 17(7): 2327-2332
- [10] Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model. *Physics Letters*, 1999, 263: 341-346
- [11] Newman M E J, Moore C, Watts D J. Mean field solution of the small-world network model. *Physical Review Letters*, 2000, 84: 3201-3204
- [12] Cohen R, Havlin S. Scale-free networks are ultrasmall. *Physical Review Letters*, 2003, 90: 058701, 1-4
- [13] Dorogovtsev S N, Mendes J F F, Samukhin A N. Structure of growing networks with preferential linking. *Physical Review Letters*, 2000, 85: 4633-4636
- [14] Medina A, Lakhina A, Matta I, et al. BRITE: an approach to universal topology generation. In: Proceedings of the 9th International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2001), Washington, D. C, USA, 2001. 346-353

Research on the average length of vector address

Zhao Aqun, Liang Mangui, Lian Songhai, Guo Xiaoming

(School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

The research work of this research focused on the average length of vector address (VA). As a new kind of forwarding address, different from the address coding of current networks, VA plays an important role in constructing a communication network. The complex network theory and the theoretical analysis method were introduced to study the average address length of VA when VA was used to construct a global network. And also the simulation experiments on the practical network topology model were carried out to validate the results. The results showed that VA made the constructed network simpler, more secure and more adaptive than existing networks, and the network constructed using VA accommodated much more users than IP networks with the same address length.

Key words: communication network, forwarding address, vector address, complex network