

## 一种基于信息熵的关键流量矩阵发现算法<sup>\*</sup>

王宏<sup>+</sup>, 龚正虎

(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

### Algorithm Based on Entropy for Finding Critical Traffic Matrices

WANG Hong<sup>+</sup>, GONG Zheng-Hu

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

+ Corresponding author: E-mail: wh@nudt.edu.cn, http://www.nudt.edu.cn

**Wang H, Gong ZH. Algorithm based on entropy for finding critical traffic matrices. Journal of Software, 2009,20(5):1377-1383.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3308.htm>

**Abstract:** This paper studies the critical traffic matrices selection problem and develops an algorithm called MinMat which uses information entropy to select the first critical matrices at first, then takes merging cost into consideration when agglomerating a pair of clusters. The algorithm is evaluated by using a large collection of real traffic matrices collected in Abilene network. Theoretical analysis and experimental results demonstrate that MinMat algorithm is more effective than  $K$ -means, Hierarchical Agglomeration, CritAC, and by simulating on Totem, it is concluded that a small number of critical traffic matrices suffice to yield satisfactory performance.

**Key words:** traffic matrix; flow measure;  $K$ -means; CritAC; MinMat

**摘要:** 研究关键流量矩阵发现问题,提出了近似算法 MinMat.引入信息熵和耗费函数等概念,计算流量矩阵的信息熵,选取信息熵较大的若干个矩阵作为候选关键矩阵,然后对最小耗费的簇进行合并,直到最后获得需要的流量矩阵.使用 Abilene 提供的网络流量矩阵进行实验,使用 Totem 模拟验证了 MinMat 算法选择结果的有效性.理论分析与实验结果表明,MinMat 比  $K$ -means 层次凝聚 CritAC 效率更高,选择结果具有更好的代表性.

**关键词:** 流量矩阵;流量测量; $K$ -means;CritAC;MinMat

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

网络流量矩阵在 IP 网络工程应用中具有很重要的应用价值<sup>[1,2]</sup>.以前的研究重点主要集中在如何获得流量矩阵上<sup>[3,4]</sup>,而目前的研究成果使得 ISP(Internet service providers)可以获得大量实时的流量矩阵<sup>[5]</sup>.接下来的问题是,面对庞大的流量矩阵,如何挖掘出关键性能数据,以便在网络规划、流量工程及其他工程应用中使用.本文研究的是从数以千计的流量矩阵中挖掘若干关键流量矩阵的方法.

国外在流量矩阵相关领域做了大量的研究工作.2005 年,Zhang<sup>[6]</sup>定义了关键流量矩阵选择问题,并对问题进行了形式化的描述,对其进行了复杂性分析,并提出了近似算法 CritAC 来求解该问题.2006 年,Juva<sup>[7]</sup>通过链路流量协方差和均值-方差的函数进行流量矩阵估算;Zhao<sup>[8]</sup>在数据不完整的情况下,利用多个信息源进行路由矩

<sup>\*</sup> Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60803153 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2008AA01A325 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2007-10-09; Accepted 2008-03-14

阵估算;Wang<sup>[9]</sup>研究了基于预测的流量矩阵与遗忘路由结合的流量工程技术;Zhang<sup>[10]</sup>提出了基于多个流量矩阵优化路由的方法;Jin<sup>[11]</sup>研究了基于流量矩阵协方差检测网络异常的方法.

国内对流量矩阵相关的研究工作尚未广泛开展起来.2006年,Liu<sup>[12]</sup>提出了一种路由推断算法,通过期望最大化算法对一个包含了多种路由可能性的流量矩阵进行估计,然后根据估计值的差异来推断实际路由.2006年,Hong<sup>[13]</sup>使用分配模型设计了流量矩阵估算的快捷算法,并对估算误差进行了仿真实验,文献[14,15]综述了流量矩阵估算的研究进展.

从众多的流量矩阵中寻找出关键流量矩阵的方法主要有 *K-means*、层次凝聚、*CritAC*、*TopN* 和 *TopConsecN* 方法.*K-means* 首先随机选取  $m$  个向量作为聚类的核心,然后把其余的待分向量用某种方法(判断准则)分到各类中去,完成初始分类.初始分类完成以后,重新计算各聚类中心,完成第 1 次迭代.然后修改聚类中心,进行下一次迭代,直到所有的向量到本聚类中心的距离小于到其他聚类中心的距离为止.层次凝聚方法首先选取所有  $n$  个向量作为聚类的中心,然后每次迭代将最近距离的两个聚类合并为一个聚类,聚类合并和重新计算聚类中心.经  $n-m$  次迭代,剩下  $m$  个聚类.*CritAC* 方法在层次凝聚方法的基础上引入了容量和耗费函数、簇首概念,选择容量最大的向量作为簇首,聚类时选择耗费函数最小的簇进行合并.*TopN* 和 *TopConsecN* 方法均考虑向量的容量,*TopN* 方法查找出  $N$  个容量最大的向量,*TopConsecN* 方法查找出  $N$  个连续容量最大的向量.

熵是热力学中微观状态多样性或均匀性的一种度量,反映了系统微观状态的分布几率.从通信的角度来看,随机性的干扰是无法避免的,因此通信系统具有统计的特征.信息源可视为一组随机事件的集合.该集合所具有的随机性不确定度与热力学中微观态的混乱度是类同的,将热力学几率扩展到系统各个信息源信号出现的几率就形成了信息熵.信息熵标志着所含信息量的多少,是对系统不确定性程度的描述.文献[16,17]利用信息熵挖掘网络异常流量,取得了较好的效果.

本文首先给出了流量矩阵数据发现问题(critical traffic matrices selection,简称 CTMS)的描述,由于问题本身为 NP-hard 问题,提出了处理该问题的近似算法 *MinMat*.其主要思想是计算流量矩阵信息熵,选取信息熵较大的若干个矩阵作为候选关键矩阵,然后引入耗费函数对最小耗费的簇进行合并,直到最终获得需要的关键流量矩阵为止.使用 *Abilene* 提供的流量矩阵<sup>[18]</sup>进行实验并与 *K-means*、层次凝聚、*CritAC* 等方法进行了比较,实验结果表明,*MinMat* 方法比 *K-means* 和 *CritAC* 方法效率更高,选择结果具有更好的代表性.本文最后使用 *Totem*<sup>[19]</sup> 模拟验证了 *MinMat* 算法选择结果的有效性.

本文第 1 节介绍问题的形式化描述.第 2 节介绍近似算法 *MinMat*.第 3 节对算法的有效性进行评估.第 4 节对本文的工作进行总结.

## 1 问题的描述

### 1.1 形式描述

设每一个流量矩阵为一个  $K$  维向量, $K$  为一个自然数.对于一组有限的流量矩阵集合  $X = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n\}$  和整数  $m$ ,关键流量矩阵选择问题就是找到一组关键流量矩阵  $Y = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m\}$ ,使得距离函数  $f = \max_{1 \leq i \leq m} \|\bar{y}_i, X\|$  最小,同时满足约束条件  $\forall \bar{x}_i \in X$ , 且  $\bar{x}_i \leq_d \bar{y}$ .在此,  $\bar{x}_i \leq_d \bar{y}$  称为  $\bar{x}_i$  被  $\bar{y}$  主导,当且仅当  $\bar{x}_i$  在  $k$  维上均小于  $\bar{y}$ ,这里,  $\bar{y} = \{\max_{1 \leq q \leq n} y_{1q}, \max_{1 \leq q \leq n} y_{2q}, \dots, \max_{1 \leq q \leq n} y_{mq}\}$ ,  $\bar{y}_i = \{y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{Ki}\}$ .

距离函数  $\|\bar{y}_i, X\|$  可以有不同的定义,可以是  $\bar{y}_i$  与  $X$  的欧几里德距离,也可以是绝对值之和或最大绝对值.在本文中,定义其为绝对值之和,即

$$\|\bar{y}_i, X\| = \sum_{p=1}^N |\bar{y}_i - \bar{x}_p|_1 = \sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^K |y_{ij} - x_{pj}|.$$

### 1.2 复杂性分析

本节将分析关键矩阵选择问题的复杂性.寻找关键流量矩阵的问题是:

实例:给定一个有限集合  $X = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n\}$ , 一个实数  $\delta$ , 一个整数  $m$ .CTMS 的判断问题:是否存在一组向量

$Y = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m\}$ , 满足:1)  $|Y|=m$ ;2)  $\forall y_i \in Y, \|\bar{y}_i, X\| \leq \delta$ ;3)  $\forall \bar{x} \in X, \bar{x} \leq_d \bar{y}$ . 这里,  $\bar{y} = \left\{ \max_{1 \leq q \leq n} y_{1q}, \max_{1 \leq q \leq n} y_{2q}, \dots, \max_{1 \leq q \leq n} y_{mq} \right\}$ .

顶点覆盖问题和三维匹配问题均可在多项式时间内变换为寻找关键流量矩阵(CTMS)问题,因此,CTMS 问题是 NP 完全问题.

## 2 MinMat近似算法

### 2.1 算法描述

设目前存在  $n$  个流量矩阵,需要选取其中的  $m$  个关键流量矩阵.MinMat 的思想是,首先对  $K$  个流量矩阵的信息熵进行排序,选出其中较大的  $p=am(\alpha=3/5/8)$ 个流量矩阵,对剩余的  $P$  个流量矩阵引入容量、耗费函数概念,进行聚类合并.选择容量最大的流量矩阵作为簇首,聚类时选择耗费函数最小的簇进行合并,合并到只剩下  $m$  个矩阵时即为所需要的结果.

1. Create an array  $X$  using  $n$  cluster where every cluster be column vector:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

2. calculate the entropy of each column of  $X$ , sort entropy value in descending order

3. Resort  $X$  according entropy value, select the first  $P$  vector.

4. Each vector create a cluster  $C_i = \{x_i\}$

5. define cluster head  $h_i = x_i, d_i$  be max volume in  $C_i$

6. for each  $C_i, C_j$

7. define head  $h(i, j) = \max(x_i, x_j)$

8. computer  $cost(i, j) = \max(h(i, j)) - d_i$ ;

$$cost(j, i) = \max(h(i, j)) - d_j$$

9. sort  $cost(i, j)$  in ascending order

10. for  $q=p$  step  $-1$  to  $m+1$

11. merger the cluster  $C_i, C_j$  with min  $cost(i, j)$ :

12.  $h_i = h(i, j), d_i = \max(d_i, d_j)$

13. remove cluster  $c_j$

14. for each remaining cluster  $C_k$

15.  $cost(i, k) = \text{volume}(h(i, j)) - d_i; cost(k, i) = \text{volumn}(h(i, j)) - d_k$ ;

16. insert  $cost(i, k)$  in sorted list

17. return  $\{h_i\}$  for the remaining  $m$  clusters

### 2.2 算法分析

算法中耗费函数  $\bar{h}(i, j) = \max_{j=1}^k(x_{iq}, x_{jq}), \text{volumn}(x_i) = \max_{q=1}^k(x_{iq})$ .

把测量数据当作离散信息源,把测量数据的度量值看作是一组随机事件发生的次数,就可以对它的信息熵进行分析. $Z = \{n_i, i=1, \dots, N\}$ ,表示在测量数据中属性  $i$  发生了  $n_i$  次.在此,信息熵定义如下:

$$H(Z) = -\sum_{i=1}^N \left( \frac{n_i}{S} \right) \log_2 \left( \frac{n_i}{S} \right), S = \sum_{i=1}^N n_i,$$

表示某个属性发生的总次数.

一组数据的信息熵越高,说明其数据分布越分散,它所包含的信息量也就越多<sup>[8]</sup>.因此,我们选择首先对初始数据进行信息熵分析,剔除那些包含信息量较少的数据,以降低算法的复杂性.同时,我们通过实验验证了算法的有效性.

算法的第 1 步~第 5 步需要耗费时间  $O(nK \log n)$ ,算法的第 6 步~第 9 步需要耗费时间  $O(p^2 K + p^2 \log n)$ ,第 10

步~第 16 步时间复杂性等于  $O(p(p-m)K+p(p-m)\log n)$ 。所以,MinMat 算法的时间复杂性为  $O(nK\log n+p^2K+p^2\log p)$ 。而 CritAC 算法的时间复杂性为  $O(n^2K+n^2\log(n))$ ,由  $p \ll n$  可知,MinMat 算法在时间复杂性方面要优于 CritAC 算法( $n$  为样本数量, $m$  为被选中个数, $K$  为维数, $p$  为经信息熵分析后选取的矩阵个数)。

### 3 算法的有效性评估

本节从两个方面对算法的有效性进行评估:首先针对 Totem 公布的 Abilene 流量矩阵进行提取关键流量矩阵实验<sup>[19]</sup>,并与 K-means,CritAC 等方法从算法效率、有效性等方面进行比较;然后使用提出的关键流量矩阵进行 BGP(border gateway protocol)路由参数计算,并在 Totem 上进行模拟实验,验证 MinMat 算法的有效性。

#### 3.1 Abilene流量矩阵实验

模拟实验采用 Totem 公布的 Abilene 网络中的自治系统 AS20965,在 2005 年 1 月 1 日~2005 年 4 月 29 日,每 15 分钟采样一次,每周 672 次采样,共 17 周的流量矩阵信息。AS20965 由 23 个节点、74 条链路构成,OD(original destination)流为 506 个。我们以第 2 周的数据为例进行提取关键流量矩阵的实验,并与 K-means、层次凝聚、CritAC 等方法进行比较。实验结果表明,MinMat 方法比 K-means、层次凝聚、CritAC 方法效率更高,选择结果具有更好的代表性。

图 1(a)、图 1(b)是第 1 周和第 2 周的流量总和时序图。图 1(c)是使用 K-means 方法的效果图( $k=24$ ),图中有许多类包含一些负值点,表明这些类区分得不好。图 1(d)是使用层次聚集方法的效果图(24 类),归类分布同样不均匀。图 1(e)是 MinMat 方法初始阶段计算的网络各时间段的熵值变化情况。MinMat 选取其中熵值较大的  $P$  个流量向量(vector)作为后续优化方法的输入。这里, $P=am=8 \times 24=192$ 。图 1(f)对剩余的  $P$  个流量矩阵分类合并到只剩下  $m=24$  个矩阵。该图显示了对  $P=192$  个流量向量聚类合并的分布效果。

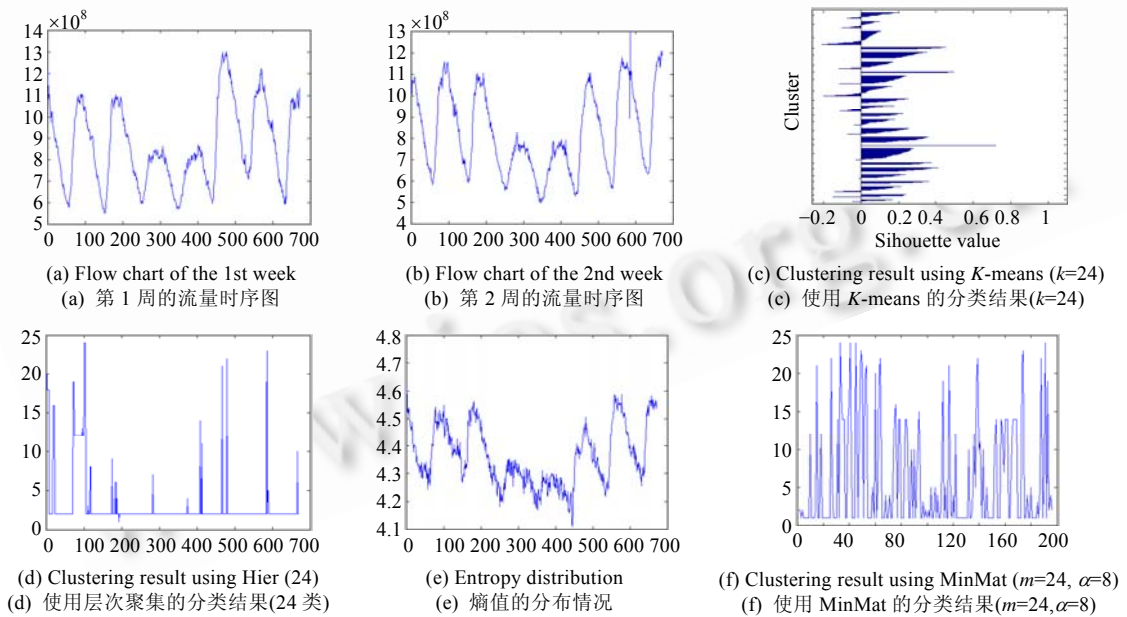


Fig.1 Results of using MinMat compared with different clustering based methods

图 1 MinMat 与其他分类方法的分类结果的比较

#### 3.2 BGP路由优化实验

基于流量矩阵的 IP 路由通常通过设置链路度量来达到优化的目的。然而,IP 链路度量的最优设置问题是 NP 难问题<sup>[20]</sup>。解决该问题的经典近似算法是 Tabu 搜索算法<sup>[20]</sup>。为了提高对流量变化的鲁棒性,研究人员提出了

基于多流量矩阵的 IP 链路度量的最优设置算法<sup>[21]</sup>.为了增强对链路故障的鲁棒性,研究人员提出了链路故障鲁棒的 IP 链路度量的最优设置算法<sup>[22,23]</sup>.这些算法可以较好地解决基于流量矩阵的域内链路的流量平衡问题<sup>[22]</sup>.

“热土豆”算法<sup>[23,24]</sup>是 BGP 出口路径选择算法,属于拓扑结构变化立刻触发出口选择变化的算法.“热土豆”算法随域内 IGP 的变化而变化.评估本文提出的 MinMat 方法如下:用主成分分析方法分析网络中的关键路径(将在其他文章中介绍),将全体流量矩阵作为输入,利用 Totem 工具,使用“热土豆”算法计算网络路由,求得一个真实(real)的流量.将用 MinMat 算法求得的关键流量矩阵作为输入,利用 totem 工具,使用“热土豆”算法重新计算网络路由,求得一个预测的流量,将两者关键路径上的链路平均利用率之差的绝对值(记为  $|mean(U_a) - mean(U_k)|$ )除以真实链路平均利用率(记为  $U_a$ )作为评估度量值(记为  $D_k$ )进行比较,则  $D_k = |mean(U_a) - mean(U_k)| / mean(U_a)$ .如果  $D_k$  值不大(如小于 15%),则认为 MinMat 提取的关键流量矩阵是有效的;否则认为存在差异.

图 2 和表 1 是用全体流量矩阵和用 MinMat 选出的关键流量矩阵作为输入,使用热土豆算法获得的关键链路利用率的比较结果.

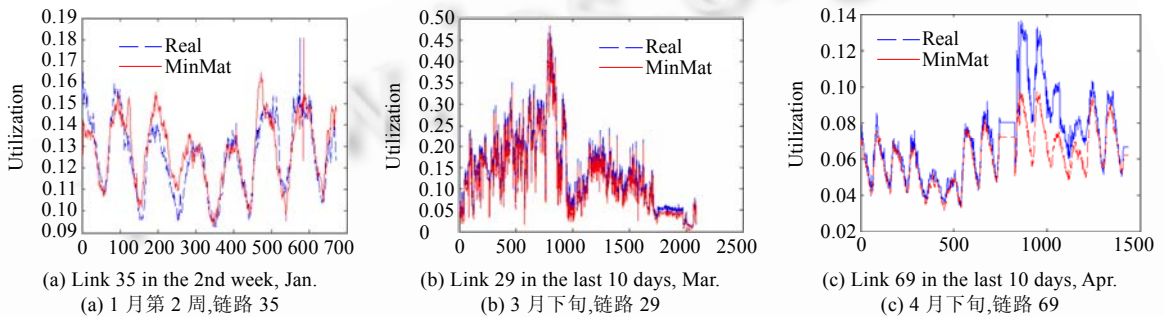


Fig.2 Link utilization ratios of key link after using critical traffic matrices compared with using whole traffic matrices for BGP optimizing

图 2 用全体流量矩阵和用关键流量矩阵进行 BGP 优化后的关键链路利用率的比较

Table 1 Comparison of link utilization ratios of key links

表 1 关键链路利用率的比较结果

Dates	Key links	$D_k$ (%)
Jan. 1~Jan. 31	35	8.76
Feb. 1~Feb. 28	15	5.09
Mar. 1~Mar. 31	29	12.31
Apr. 1~Apr. 29	69	11.26

分别将全体流量矩阵以及用 MinMat 算法选出的关键流量矩阵作为热土豆算法的输入,优化 BGP 路由后获得关键链路利用率,计算评估度量值.如果度量值小于 15%,则说明 MinMat 算法是有效的.

我们以网络最大链路利用率作为算法效能的评估标准,以 InvCap 的最大链路利用率作为评估参考<sup>[3]</sup>,图 3 显示了离线和在线运行时的不同关键流量矩阵发现算法的性能.由图 3 可知,无论是离线还是在线,MinMat 算法均优于层次凝聚和 TopN 方法;在选取 24 个关键流量矩阵时优于其他任何一种关键流量矩阵选取方法;在在线选取 6 个关键流量矩阵时稍逊于 CritAC 方法(<0.02).

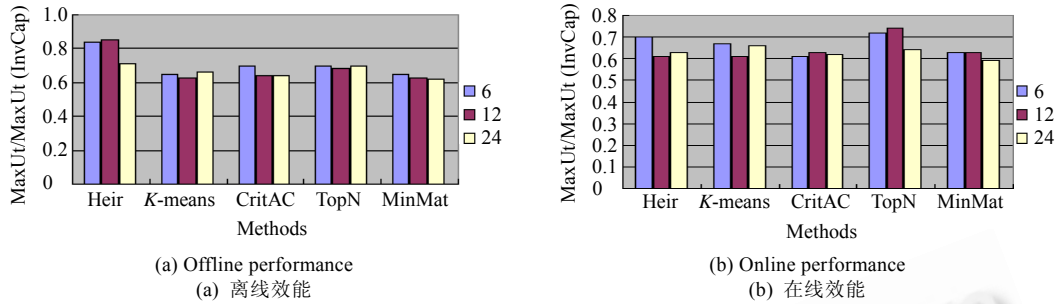


Fig.3 MinMat performance compared with difference clustering methods

图3 MinMat 与其他分类算法的效能比较

#### 4 结论和进一步的工作

本文首先对关键流量矩阵发现问题进行描述和分析,说明 CTMS 问题是 NP 难问题;然后提出了关键矩阵发现近似算法 MinMat.该算法的主要思想是,首先计算测量矩阵的信息熵,选取信息熵较大的若干个矩阵作为候选关键矩阵,然后引入耗费函数对最小耗费的簇进行合并,直到最后获得需要的关键流量矩阵.本文使用校园网和 Abilene 提供的流量矩阵的网络流量矩阵进行实验,并与 K-means、层次凝聚、CritAC 等方法进行了比较.实验结果表明,MinMat 方法比 K-means 和 CritAC 方法效率更高,选择结果具有更好的代表性.最后实验 Totem 模拟验证了 MinMat 算法选择结果的有效性.

本文的成果已应用到某项工程任务中.我们下一步将研究如何根据关键流量矩阵进行流量趋势分析以及网络瓶颈和网络故障预测.

**致谢** 在此,我们向对本文工作给予支持和建议的同行,尤其是国防科学技术大学的殷建平教授、刘亚萍副教授,以及对本文提出了建设性意见的审稿人和编辑部老师表示感谢.

#### References:

- [1] Roughan M, Thorup M, Zhang Y. Traffic engineering with estimated traffic matrices. In: Bieber G, Kirste T, eds. Proc. of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conf. (IMC). San Diego: ACM Press, 2003. 248–258.
- [2] Teixeira R, Agarwal S, Rexford J. BGP routing changes: Merging views from two ISPs. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005,35(3):79–82.
- [3] Papagiannaki K, Taft N, Lakhina A. A distributed approach to measure IP traffic matrices. In: Lombardo A, Kurose JF, eds. Proc. of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conf. (IMC). Taormina: ACM Press, 2004. 161–174.
- [4] Liang G, Taft N, Yu B. A fast lightweight approach to origin-destination IP traffic estimation using partial measurements. IEEE/ACM Trans. on Networking (TON), 2006,14(S1):2634–2648.
- [5] Uhlig S, Quoitin B, Lepropre J, Balon S. Providing public intradomain traffic matrices to the research community. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006,36(1):83–86.
- [6] Zhang Y, Ge Z. Finding critical traffic matrices. In: Tsuchiya T, ed. Proc. of the 2005 Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN). Yokohama: IEEE Computer Society, 2005. 188–197.
- [7] Juva I, Vaton S, Virtamo J. Quick traffic matrix estimation based on link count covariances. In: Yenel L, Sari H, eds. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). Istanbul: IEEE Communications Society, 2006. 603–608.
- [8] Zhao Q, Ge Z, Wang J, Xu J. Robust traffic matrix estimation with imperfect information: Making use of multiple data sources. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2006,34(1):133–144.
- [9] Wang H, Xie HY, Qiu LL, Yang YR, Zhang Y, Greenberg A. COPE: Traffic engineering in dynamic networks. In: Rizzo L, Anderson TE, McKeown N, eds. Proc. of the ACM SIGCOMM. 2006. 99–110.
- [10] Zhang C, Ge Z, Kurose J, Liu Y, Towsley D. Optimal routing with multiple traffic matrices: Tradeoff between average case and

- worst case performance. In: Proc. of the ICNP 2005. Boston: IEEE Communications Society, 2005. 607–618. [ftp://gaia.cs.umass.edu/pub/Zhang05\\_tradeofftr.pdf](ftp://gaia.cs.umass.edu/pub/Zhang05_tradeofftr.pdf)
- [11] Jin S, Yeung DS, Wang X, Tsang ECC. A covariance matrix based approach to Internet anomaly detection. In: Yeung DS, Liu ZQ, Wang XZ, Yan H, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC). Guangzhou: IEEE Press, 2005. 691–700.
- [12] Liu ZQ, Chen CJ. A routing inference algorithm based on traffic matrix estimation. Journal of the China Railway Society, 2005,27(6):66–70 (in Chinese with English abstract).
- [13] Hong T, Tong LF, Guo GZ. An assignment model on traffic matrix estimation. In: Jiao L, *et al.*, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Natural Computation (ICNC 2006). Xi'an: Springer-Verlag, 2006. 295–304.
- [14] Medina A, Taft N, Salamati K, Bhattacharyya S, Diot C. Traffic matrix estimation: Existing techniques and new directions. In: Paxson V, Balakrishnan H, eds. Proc. of the ACM SIGCOMM 2002 on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. Pittsburgh: ACM Press, 2002. 161–174.
- [15] Zhou JJ, Yang JH, Yang Y, Zhang H. Research on traffic matrix estimation. Journal of Software, 2007,18(11):2669–2681 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2669.htm>
- [16] Lakhina A, Crovella M, Diot C. Mining anomalies using traffic feature distributions. In: Proc. of the ACM SIGCOMM. Philadelphia: ACM Press, 2005. 217–228. <http://www.sigcomm.org/sigcomm2005/paper-LakCro.pdf>
- [17] Wang HL. Large-Scale network traffic anomaly analysis [MS.Thesis]. Changsha: Graduate School, National University of Defense Technology, 2006 (in Chinese with English).
- [18] Research and Education Community. Abilene backbone network. 2006. <http://abilene.internet2.edu/>
- [19] Montefiore University, Belgium. TOTEM project toolbox for traffic engineering methods. 2005. <http://totem.run.montefiore.ulg.ac.be/download.html>
- [20] Fortz B, Thorup M. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights. In: Cohen R, Pitt D, eds. Proc. of the IEEE INFOCOM. Tel-Aviv: IEEE, 2000. 519–528.
- [21] Fortz B, Thorup M. Optimizing OSPF/IS-IS weights in a changing world. IEEE Selected Areas in Communications, 2002,20(4): 756–767.
- [22] Fortz B, Thorup M. Robust optimization of OSPF/IS-IS weights. In: Ben-Ameur W, Petrowski A, eds. Proc. of the Int'l Network Optimization Conference (INOC). Paris: IEEE, 2003. 225–230.
- [23] Liu YP, Gong ZH, Zhu PD. Research on the bottleneck area of optimal BGP route selection. Journal of Software, 2005,16(5): 946–959 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/946.htm>
- [24] Teixeira R, Shaikh A, Griffin T, Rexford J. Dynamics of hot-potato routing in IP networks. In: Liu Z, Merchant A, eds. Proc. of the ACM SIGMETRICS. New York: ACM Press, 2004. 307–319.

#### 附中文参考文献:

- [12] 刘紫千,陈常嘉.基于流量矩阵估计的路由推断算法.铁道学报,2005,27(6):66–70.
- [15] 周静静,杨家海,杨扬,张辉.流量矩阵估算的研究进展.软件学报,2007,18(11):2669–2681. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2669.htm>
- [17] 王海龙.大规模网络流量异常分析[硕士学位论文].湖南长沙:国防科学技术大学研究生院,2006.
- [23] 刘亚萍,龚正虎,朱培栋.BGP 最优路径选择中的瓶颈区域的研究.软件学报,2005,16(5):946–959. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/946.htm>



王宏(1964—),男,湖南益阳人,博士,副教授,主要研究领域为计算机网络协议软件,网络管理,网络流量测量与分析.



龚正虎(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络体系结构,高性能计算机网络,网络协议软件,网络管理.