

互联网网络时延特征研究

林川, 赵海, 毕远国, 贾思媛

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 互联网宏观拓扑结构下时延特征的研究对互联网结构与性能的理解具有重要作用。择取 CAIDA Ark 项目下分别位于 4 个不同地区的探测数据, 提取网络时延与通信直径, 发现网络时延与通信直径关系很小且超过 70% 的有效路径中存在支配时延。经分析, 正是支配时延的存在影响了网络时延与通信直径的关系。对支配时延链路两端进行地理映射, 发现支配时延以较高概率出现在同一国家同一城市某一链路传输之间。在此基础上, 得出链路两端距离小于 5 000 km 的支配时延主要由排队时延组成, 而链路两端距离大于 5 000 km 的支配时延主要由传播时延组成的结论。

关键词: 互联网; 宏观拓扑结构; 网络时延; 通信直径; 支配时延

中图分类号: TP393.6

文献标识码: A

Research on network delay of Internet

LIN Chuan, ZHAO Hai, BI Yuan-guo, JIA Si-yuan

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Research on the delay of the Internet under macrotopology plays an important role in comprehension of Internet architecture structure and performance. Using effective samples in four different regions authorized by CAIDA Ark and getting network delay, there is little relationship between network delay and communication diameter and the number of the effective paths happening dominant delay is over 70%. The analysis presents that it is dominant delay that affects the relationship between the network delay and the communication diameter. The geographic mapping of the link happening dominant delay supposes that the dominant delay happens frequently in the link across one city in a country. Finally, the conclusion is draw that queue delay is the major composition of the dominant delay for a short range (less than 5 000 km), whereas the propagation delay is the main factor for a long distance (greater than 5 000 km).

Key words: Internet; macro topology; network delay; communication diameter; dominant delay

1 引言

互联网作为大型复杂系统, 其宏观拓扑结构表现为极大的复杂网络特性^[1-3]。随着现代社会对互联网的依赖性不断增强, 互联网作为大型实时系统的通信媒介, 其反馈时间即网络时延的特征备受人们关切。

早期, 对互联网时延的研究主要通过对单一通信链路或特定某几条链路发送探测数据分组, 获得目的端的反馈时间, 继而计算网络时延或评价探测方法的优劣^[4-6]。由于互联网研究的复杂性, 单一

链路探测或单一数据源分析已无法对互联网相关特征进行解释。运用统计学, 从宏观拓扑结构上分析互联网的复杂性成为解决问题的关键^[7,8]。文献[9]对可探测的 2 000 条路径进行分析, 发现互联网中存在大量的支配时延。文献[10]的研究成果表明互联网中的支配时延主要由传播时延决定, 且多出现在 AS 自治域内部。文献[11]结合复杂网络理论, 对 CAIDA 机构授权的海量样本进行分析, 认为 RTT 与从源节点到目的节点经过的中转路由器个数成正比。

本文在基于 CAIDA 同时期的 Ark 探测项目

收稿日期: 2013-11-15; 修回日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61101121, 61373159)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61101121, 61373159)

下,分别选取位于北美洲的bjc-us、南美洲的scl-cl、欧洲的her-gr、亚洲的she-cn探测节点,获取2009年至2013年间探测的海量IPv4级数据,有效路径达900万条之多。首先,详细讨论了数据获取及处理方法。在此基础上,对影响网络时延与通信直径关系的链路时延进行分析,给出支配时延的概念。其次,分析支配时延对网络时延的影响。最后,分析支配时延的特征行为与产生原因。

2 实验数据

自2007年,CAIDA开展Ark项目计划取代原有Skitter项目。Ark项目在兼容原有Skitter项目中所有的探测技术的前提下,使用Scamper技术^[12],探测节点以traceroute主动探测方式,向随机抽选的目的IPv4地址发送ICMP探测数据分组。此外,每一个IPv4地址在同一探测周期内只被唯一一个探测节点探测一次。

定义1 有效路径

探测源SRC向目标IP地址发送探测IP数据分组。数据分组经过中转路由器 a_1, a_2, \dots, a_n ,最终到达被探测IP地址所对应的目的端DST。那么对于 $R = (SRC, a_1, a_2, \dots, a_n, DST)$ 为一次探测,IP数据分组从探测源SRC到目的端DST所经过的路径。然而,由于互联网的复杂性,中转路由器个体间存在差异(如有些中转路由器不对ICMP报文响应),有可能造成IP数据分组在中转路由器处不可达,而且根据Scamper的探测方式,若探测源未收到中转路由器响应,仍可通过增加TTL值继续向前探测直到达到目的端,而此时所对应的路径 R 是不完整的。由于本文所采用的样本空间庞大,忽略探测中,存在中转路由器不可达的路径 R ,只分析路由完整的样本数据,并将其命名为有效路径。

本文选取了CAIDA Ark项目下4个分别位于4个不同大洲的探测节点,数据选取为2009年6月到2013年6月期间,每个月选取一个探测周期(3到4个工作日)的探测结果,提取有效路径后的统计结果如表1所示。

由表1可知,本文提取的有效路径样本数达900万之多。有效路径样本数可以用来分析互联网的网络时延特征。

定义2 通信直径

指在探测有效路径的过程中,经过的中转路由器 a_1, a_2, \dots, a_n 的数量。

定义3 链路时延

表1 提取4个探测节点探测有效路径后的结果

探测节点	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	总计
bjc-us	21万	46万	51万	53万	37万	208万
her-gr	18万	49万	61万	68万	41万	237万
scl-cl	31万	44万	56万	67万	35万	233万
she-cn	21万	55万	63万	68万	23万	210万

设探测数据分组经过有效路径 j 的各中转路由器的往返时间为 $rtt_1^j, rtt_2^j, rtt_3^j, \dots, rtt_n^j$,令 $t_i^j = 0.5(rtt_{i+1}^j - rtt_i^j)$,则 t_i^j 代表有效路径 j 上中转路由器 a_i^j 和 a_{i+1}^j 之间的链路时延。

然而在实际测量的过程中,由于各中转路由器之间存在差异,不同时刻,各中转路由器负载各不相同,很可能在对近处的中转路由器探测时, rtt_i^j 大于远处的中转路由器 rtt_{i+1}^j ,那么,与其对应的链路时延 t_i^j 会产生负值。本文采用一种路径修正算法对出现上述情况的路径进行修正,具体如下。

1)若 $0 < rtt_i^j - rtt_{i+1}^j < 1$, $rtt_i^j = rtt_{i+1}^j - \varepsilon$ ($0 < \varepsilon < 1$)
 ε 为随机变量,且其概率密度服从区间 $[0,1]$ 上的均匀分布,若 $\varepsilon > rtt_{i+1}^j$,那么重新随机选取 ε 。

2)若 $rtt_i^j - rtt_{i+1}^j > 1$, $rtt_i^j = (rtt_{i+1}^j + rtt_{i-1}^j) / 2$ 。

3)此外,若在同一条路径上同时出现4次上述情况,则该条路径不在计算范围之内。

定义4 网络时延

在指定时间内,网络时延为IP数据分组从探测源SRC发出到目的端响应的的时间,即探测有效路径各链路时延之和。

3 通信直径

3.1 网络时延的分布特征

首先提取位于4个不同地点的探测节点bjc-us、her-gr、scl-cl、she-cn,5年内(2009年6月~2013年6月)每月同周期有效路径样本,提取其中的网络时延信息,并分别作概率分布统计,如图1所示。由图1可知,对于同一探测节点5年探测有效路径中的网络时延分布曲线具有一定的自相似性且都呈现一定的双峰垂尾分布特性^[13],其中以位于北美的bjc-us和位于欧洲的her-gr探测节点的探测结果

最为明显。此外，网络时延超过 300 ms 的有效路径非常少，说明随着互联网的飞速发展，跨国家，跨大洲，跨海洋传输已经不是问题，因此本文对网络时延大于 300 ms 的有效路径不做研究。为了选取具有代表性的有效路径样本，即选取网络时延分布较为密集的有效路径样本。根据图 1 的统计结果，分别选取表 2 所示的网络时延区间的有效路径样本进行研究。

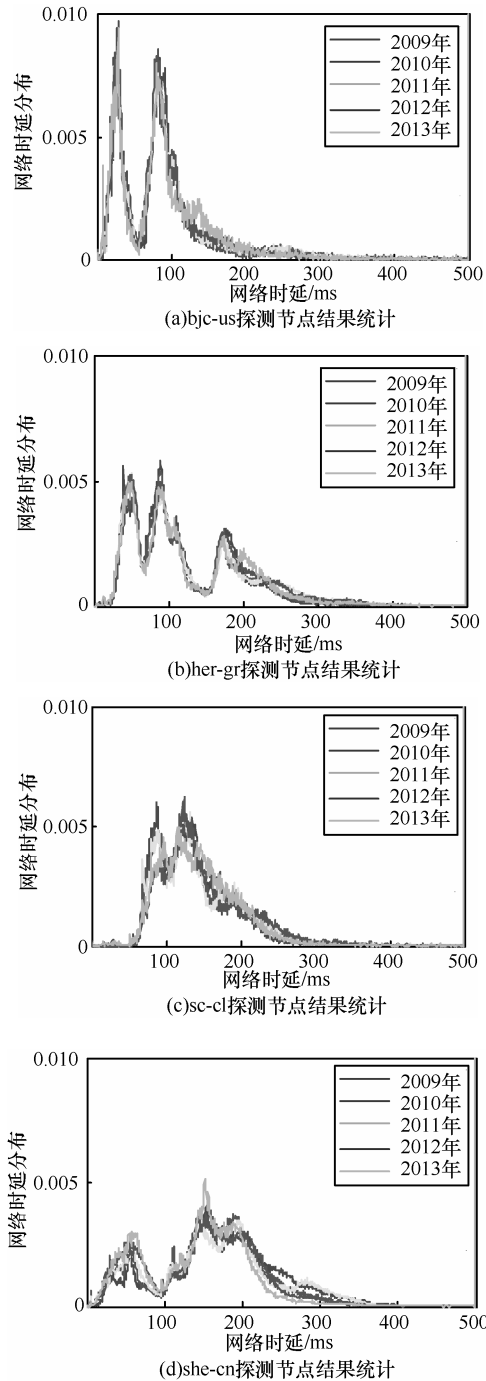


图 1 有效路径网络时延概率分布

探测节点	区间 1/ms	区间 2/ms
bjc-us	[12, 55]	[55, 165]
her-gr	[10, 55]	[55, 165]
scl-cl	[55, 110]	[110, 215]
she-cn	[10, 110]	[110, 235]

3.2 相关性分析

文献[11]研究认为 Internet 的往返时延即 RTT 随着 Internet 上数据分组从源节点到目的端经过的中转路由器的个数增加而增加，即 RTT 与本文所定义的通信直径成正比，而 RTT 正是本文研究网络时延的组成关键。那么，即使在考虑本文定义 3 中 $rtt_i^j > rtt_{i+1}^j$ 这一异常情况时，网络时延的大小也应与通信直径成正比。本文从探测获取的上百万条有效路径中，统计分析网络时延与通信直径的关系。

首先对 4 个探测节点探测有效路径的通信直径进行统计，结果如图 2 所示。本文提取的有效路径，通信直径范围为 4 跳至 34 跳，并且在 4 个探测节点探测的有效路径中，通信直径为 4、5、6 跳的有效路径个数均小于有效样本的 0.1%，无法对这一区间的有效路径进行有效分析，故不在讨论范围内。根据图 2 的统计结果，分别选取如下通信直径区间内的有效路径样本进行分析：bjc-us, 7 跳~34 跳；her-gr, 8 跳~34 跳；scl-cl, 7 跳~34 跳；she-cn, 8 跳~34 跳。

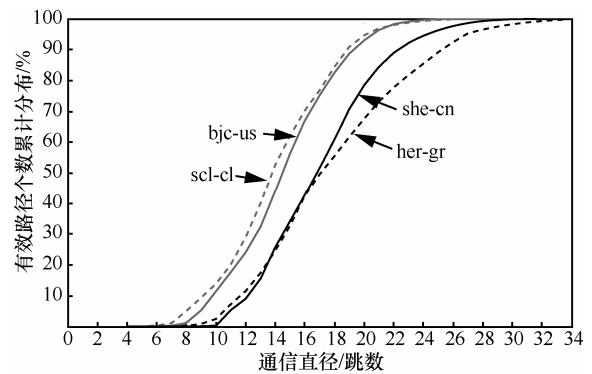


图 2 不同通信直径的有效路径累积分布

根据 scl-cl 探测节点和 bjc-us 探测节点的探测结果，超过 90% 的有效路径通信直径在 10 跳以上，而在 her-gr 和 she-cn 的探测结果中，有 90% 的有效路径通信直径超过 12 跳。分别对 4 个探测节点探测有效路径的通信直径求平均数，分别为：bjc-us, 15 跳；her-gr, 18 跳；scl-cl, 14 跳；she-cn, 17 跳。接着

统计不同通信直径下，有效路径的平均网络时延。

图 3 的统计结果表明，从整体上看网络时延随着通信直径的增加而增大，尤其是在 20 跳以前，网络时延的大小与通信直径的增长几乎成正比，然而 20 跳以后却出现平缓且还有略微减小的现象，其中 bjc-us 与 scl-cl 的探测结果最为明显。为了对网络时延和通信直径的关系进行深入分析，分别对 4 个探测节点探测结果划分的网络时延区间的有效路径进行量化统计分析。

由表 3 可以看出，本文从按网络时延划分的有效路径区间中提取出的网络时延与通信直径都为

有效样本（网络时延和通信直径标准差较小）。从整体上看，通信直径与网络时延的 Pearson 相关系数最大为 0.327，最小为 0.054，即网络时延与通信直径之间呈极弱相关性。接着从时间跨度上分析网络时延与通信直径之间的关系变化趋势，分别统计 2009 年至 2013 年网络时延与通信直径之间的 Pearson 系数，统计结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出，在 2009 年到 2013 年间，4 个探测节点探测有效路径的网络时延和通信直径的 Pearson 系数均小于 0.3，呈弱关联性并且 Pearson 系数没有随着 5 年时间的推移增长或减小。然而，

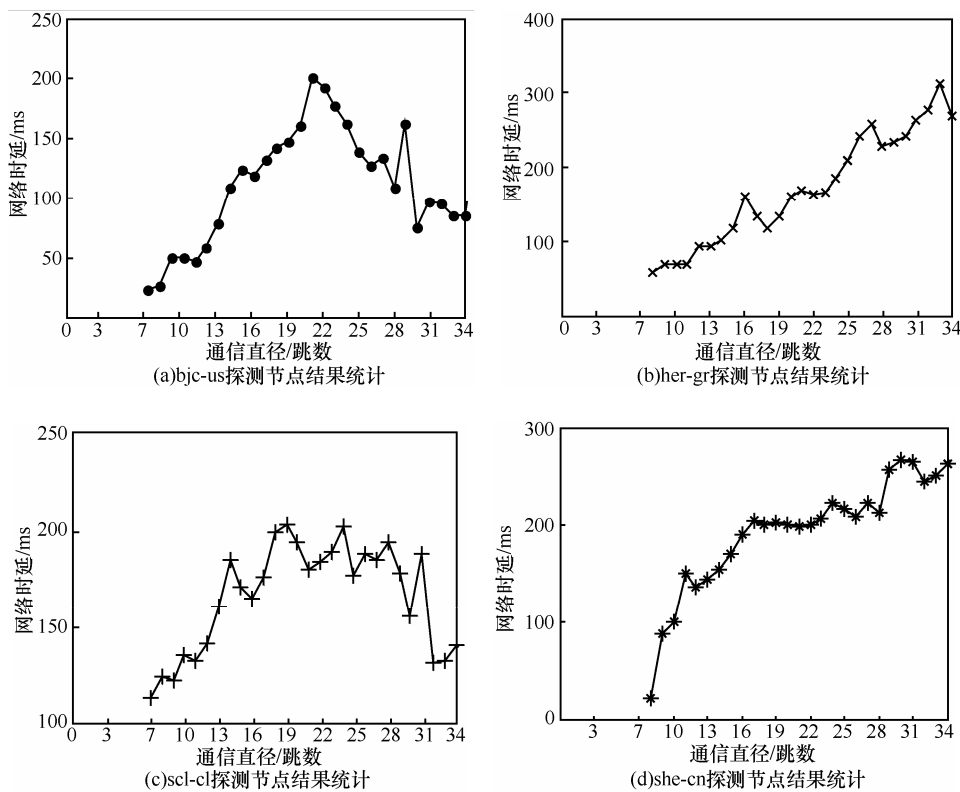


图 3 通信直径对网络时延的影响

表 3 不同网络时延区间中的有效路径的网络时延和通信直径特征量化分析

时延区间/ms	网络时延均值/ms	网络时延标准差	通信直径均值/跳	通信直径标准差	Pearson 系数
bjc-us[12, 55]	28.406	9.7646	13.512	2.743	0.327
bjc-us[55, 165]	98.981	23.358	16.049	3.180	0.076
her-gr[10, 55]	43.024	8.1647	15.259	3.310	0.274
her-gr[55, 165]	97.016	25.875	17.797	4.310	0.232
scl-cl[50, 110]	89.876	11.650	13.407	3.215	0.054
scl-cl[110, 215]	151.43	27.898	14.819	3.913	0.210
she-cn[10, 110]	59.241	23.941	15.507	3.521	0.236
she-cn[110, 235]	172.437	31.576	18.215	3.883	0.116

对于同一探测节点的不同时延区间内的有效样本，在通信直径相差不大的情况下，网络时延平均值却相差很大。以位于亚洲的 she-cn 探测节点为例，如表 3 所示，在 10 ms~110 ms 和 110 ms~235 ms 的时延区间内，二者的平均通信直径相差不到 3 跳，但网络时延却相差了 112 ms。

表 4 网络时延与通信直径 Pearson 系数随时间演化统计

探测节点	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
bjc-us	0.164 1	0.210 6	0.194 9	0.137 8	0.150 6
her-gr	0.177 4	0.227 3	0.188 5	0.240 2	0.221 7
scl-cl	0.061	0.071 8	0.116	0.0946	0.075 2
she-cn	0.017	0.119 7	0.087 5	0.084 5	0.086 5

4 支配时延

4.1 链路时延特征分析

由表 3 和表 4 的统计结果可以说明，通信直径的大小并不是影响网络时延大小的关键。那么，影响网络时延的主要因素可能就是网络时延本身，即组成网络时延的链路时延。根据以上分析，本文提出假设 1。

假设 1 在本文从 4 个不同位置探测节点提取的有效路径中存在一条或几条拥塞链路，且这些拥塞链路的链路时延对有效路径的网络时延起着支

配作用。

分别提取 4 个探测节点探测到的有效路径，截取其中每一段链路的链路时延，分别用 MAX1, MAX2, MAX3 代表其中最大前 1,2 或 3 条链路时延的总和占该条有效路径网络时延的比例。那么，4 个探测节点探测的有效路径中，MAX1, MAX2, MAX3 的分布如图 4 所示。

此外，为了量化分析关键几条链路的链路时延对网络时延的影响，分别求出 MAX1, MAX2, MAX3 的平均值。统计结果如表 5 所示。

表 5 MAX1, MAX2, MAX3 的平均值

探测节点	MAX1	MAX2	MAX3
bjc-us	0.453	0.516	0.613
her-gr	0.386	0.471	0.557
scl-cl	0.481	0.614	0.685
she-cn	0.408	0.552	0.616

根据图 2 和表 5 的统计结果表明，在平均通信直径超过 14~18 跳的有效路径中，平均最大前一条链路时延占有效路径网络时延的平均比例为 0.386~0.481，平均最大前 2 条链路时延之和占有效路径网络时延的平均比例为 0.471~0.614，而平均最

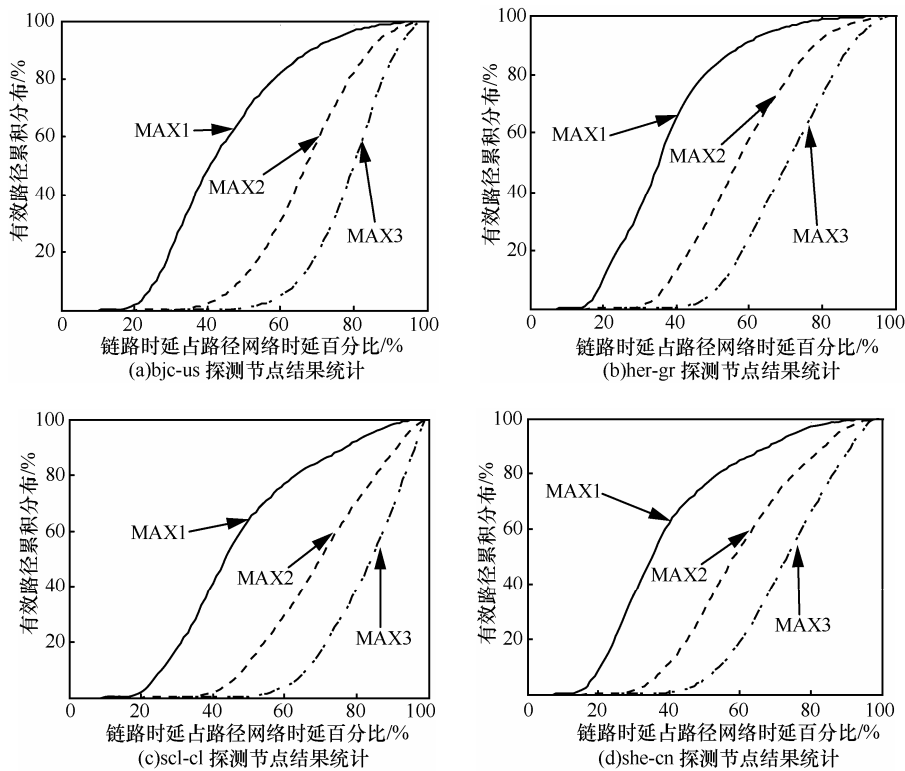


图 4 MAX1、MAX2、MAX3 有效路径百分比分布

大前3条链路时延之和占有有效路径网络时延的平均比例为0.557~0.685。可见,在本文所提取的有效路径中,存在1条或几条链路的链路时延对该条有效路径的网络时延起到绝对支配作用且最大前1条链路时延对整个网络时延的平均影响程度最大。也证实了本文假设1设想。本文只对MAX1进行研究,即在本文4个探测节点探测的有效路径中,只对某一条链路时延最大的链路进行研究,并且当其对整条有效路径的网络时延影响达到一定程度时,将这条链路的链路时延定义为支配时延,如定义5所示。

定义5 支配时延

指在互联网中,对于可探测的有效路径 j ,其各段链路的链路时延分别为 $\{t_1^j, t_2^j, \dots, t_n^j\}$,若存在 $t_{\max}^j = \max\{t_1^j, t_2^j, \dots, t_n^j\}$,且 t_{\max}^j 大于或等于网络时延的30%,那么 t_{\max}^j 为这条有效路径的支配时延。

此外,图5的统计结果表明,出现支配时延的有效路径中,平均每段链路的平均链路时延并没有随着通信直径的增加呈现明显的递增或递减趋势。说明在出现支配时延的有效路径中,支配时延对不同通信直径的有效路径影响程度是一致的,且Ark项目下获取的有效路径皆为现实互联网真实通信情况的客观记录。那么,在不同网络负载下(各段链路时延同增或同减),各段链路时延对网络时延的相对影响才可以真实表现某一段时间内,影响该条有效路径实际通信情况的真正链路。综上,可以通过本文定义5对有效路径进行重点分析与研究。

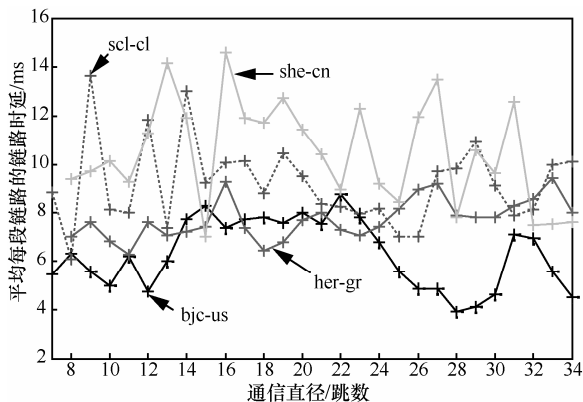


图5 出现支配时延的有效路径中,不同通信直径下的平均链路时延

4.2 支配时延与网络时延

根据图4,分别统计4个子图中的MAX1曲线。在4个探测节点可探测到的所有有效路径中,存在本文所定义的支配时延的有效路径比例,分别为:bjc-us,79%;her-gr,71%;scl-cl,75%;she-cn,74%。根据

图6的统计结果,支配时延在各通信直径下的有效路径上都有可能产生,并且产生概率并没有随着通信直径的增长而呈现明显的增减趋势。可见本文所定义的支配时延在可探测到的有效路径中非常常见,可供研究的有效样本数量也十分丰富,可以用来统计分析支配时延的特性及产生原因,接着研究本文按网络时延划分的有效路径各区间中,支配时延的分布特征。

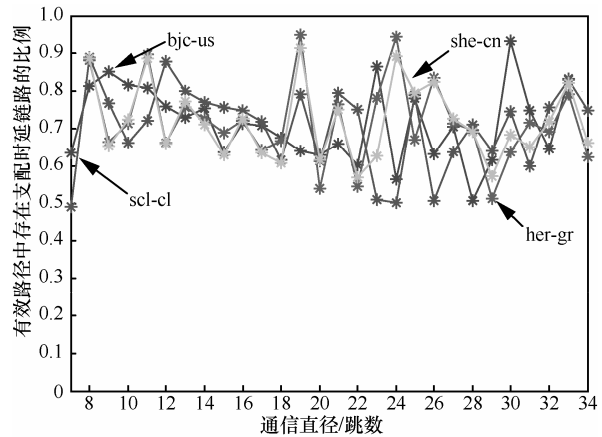


图6 不同通信直径的有效路径支配时延产生比例

图7的统计结果表明,在网络时延较大的有效路径上,其平均支配时延也较大。对图7进行详细的量化分析如表6所示。

表6结合图7的统计结果说明,首先,按网络时延概率密度分布拆分统计研究的各时延区间,有足够多的有效路径支持本文研究。其次,支配时延对有效路径的网络时延影响程度明显。各时延区间存在支配时延的有效路径,平均支配时延占平均网络时延的比例都超过了35%。最后,表6的统计结果表明,虽然在平均网络时延略大的有效路径中,其平均通信直径也略大,但差距很小,不足以影响网络时延,且在第3节经分析也得出通信直径与网络时延弱相关性结论。然而,在本文区分研究的各网络时延区间内的有效路径中,平均支配时延相差较大,其对有效路径网络时延的影响是不忽视的。本文认为正是有效路径中支配时延的普遍存在,使通信直径相差不大的有效路径其网络时延相差很大。

5 支配时延特征的分析与讨论

通过以上分析,支配时延作为互联网有效路径网络时延的重要组成部分而普遍存在。支配时延的研究与分析对于研究分析互联网,解决网络中关键

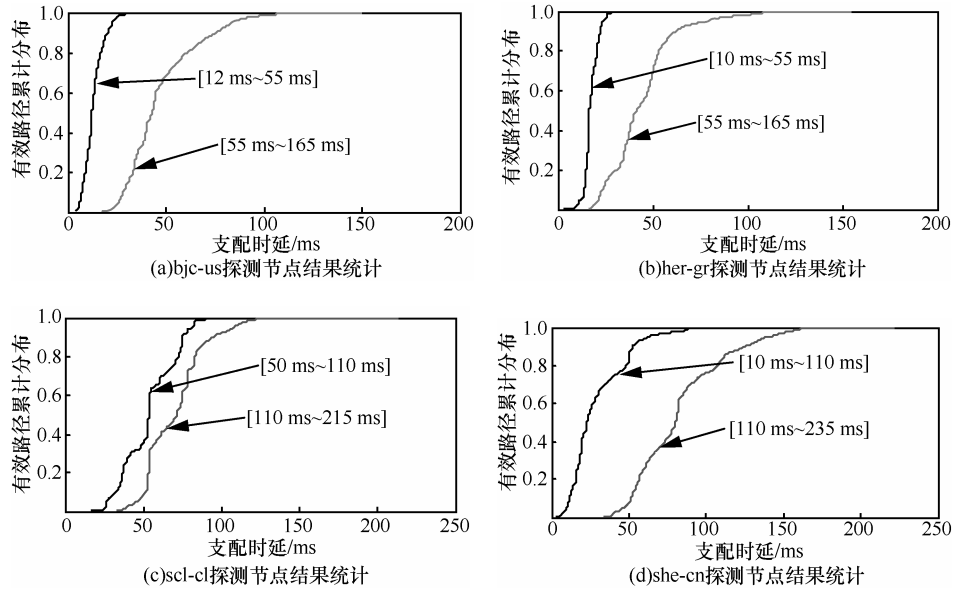


图 7 各网络时延区间中存在支配时延的有效路径分布

表 6 不同网络时延区间的支配时延特征量化分析

时延区间/ms	支配时延平均值/ms	网络时延平均值/ms	通信直径平均值/跳	支配时延/网络时延
bjc-us[12, 55]	11.633 9	29.240 5	14.637 2	40.063 5%
bjc-us[55, 165]	44.317 6	95.981 5	16.049 3	46.318 7%
her-gr[10, 55]	15.605 1	43.163 5	15.275 7	36.859 6%
her-gr[55, 165]	38.530 3	97.016 8	17.797 1	39.567 1%
scl-cl[50, 110]	32.375 6	77.876 8	13.407 3	41.572 9%
Scl-cl[110, 215]	75.138 2	151.43 5	14.819 4	51.247 5%
she-cn[10, 110]	23.714 0	59.241 2	15.507 0	38.096 9%
she-cn[110, 235]	70.511 7	172.43 7	17.210 5	41.426 5%

性问题有着重要指导作用。现阶段，在互联网中，通常从以下几个部分来讨论网络时延：发送时延（传输时延）、传播时延、处理时延、排队时延^[14]。接下来，将从这 4 个特征时延来讨论本文研究的支配时延的产生原因。

5.1 支配时延与传播时延

在互联网中，传播时延用来描述电磁波在通信链路中传播一定距离需要消耗的时间。若以地球可测量周长 40 000 km 为传播距离，以光缆为通信媒介，那么电磁波信号在光纤中以 2/3 光速环绕地球所需时间仅为 0.2 s。由此可见因特网发展至今，长距离远程通信已经不是问题。文献[10]从 AS 层面研究了支配时延的特征，认为传播时延是产生支配时延的主要原因。本文以 CAIDA 百万条数据为依托，将产生支配时延链路两端的 IP 地址做地理映射，计算端到端 IP 地址的物理位置距离，研究传播时延与支配时延之间

的关系。此外，本文在定位 IP 地址物理位置时借助于 MaxMind 公司的 GeoLiteCity 开源数据库。在计算 IP 地址之间的物理距离时，将地球等价为一个表面光滑且球面规则的球体，那么 IP 地址之间的距离可以等价以为以 IP 地址物理映射位置夹角为球心角，以等价球体的球心为地球球心，以等价球体的球面半径为地球半径所做的圆弧弧长。

首先，将 4 个探测节点探测的有效路径中，存在支配时延的那一段链路两端 IP 进行地理映射，并计算其链路两端物理距离，假设以光纤为通信媒介，计算对应的数据传播时延。接着按照支配时延链路两端距离大小分别求出各距离区间内的平均支配时延，那么传播时延占支配时延的比例为

$$rate = \text{传播时延} / \text{各距离区间内平均支配时延} \quad (1)$$

随着支配时延链路两端距离增长，rate 及平均支配时延变化情况如图 8 所示。

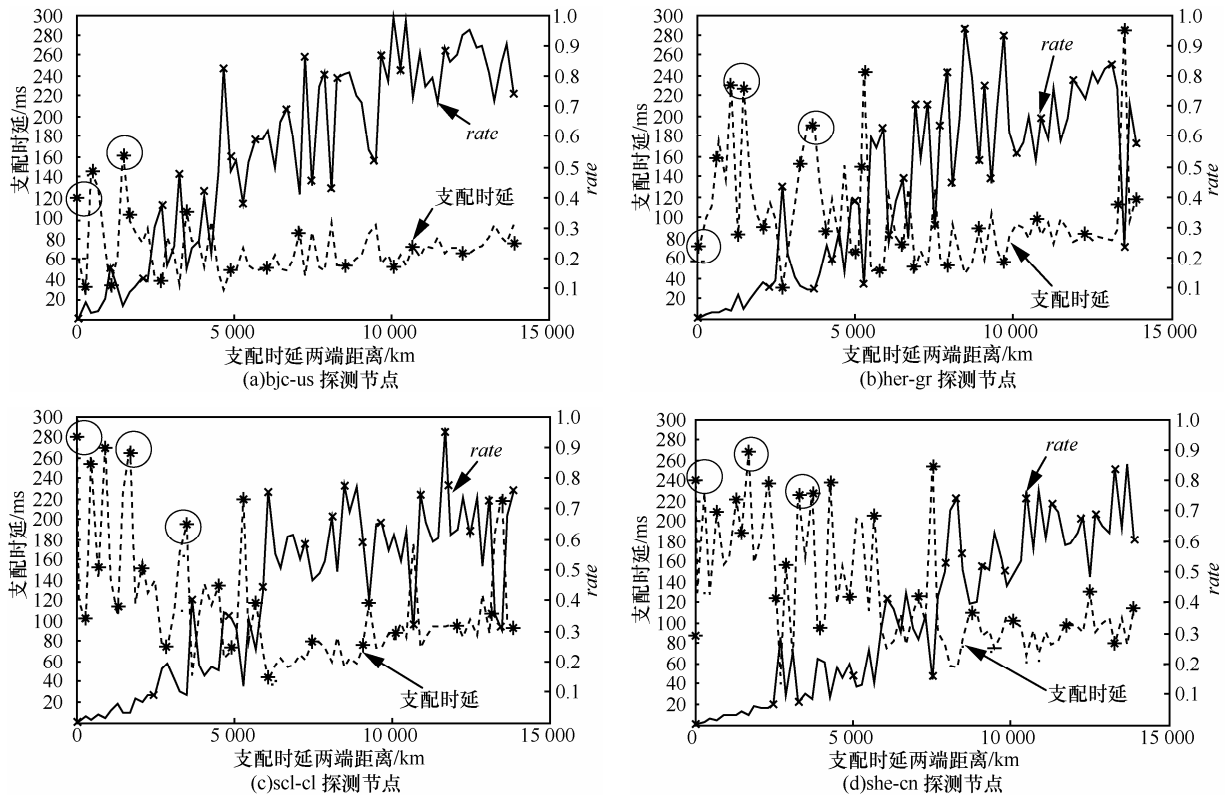


图 8 支配时延和 rate 与支配时延两端距离关系

由图 8 可以得到如下结论: 1) 在 4 个探测节点可探测的有效路径中, 支配时延不随支配时延所在链路两端距离的增加而增加; 2) 传播时延在支配时延中的比重 (*rate*) 随距离的增加而整体呈现增长趋势, 其中, 当支配时延链路两端距离大于 5 000 km 以后, 传播时延在支配时延中占 40% 以上, 而当两端距离大于 10 000 km 时, 传播时延在支配时延中占 70% 以上。因此, 本文认为对于支配时延链路两端距离较远的链路 (>5 000 km), 传播时延是影响支配时延的主要因素, 本文在此不再详述; 3) 通过全局统计, 在支配时延链路两端距离小于 5 000 km 的有效路径上, 平均支配时延表现异常, 也就是在传播时延很小的情况下, 支配时延反而异常大, 其中, 以图 8 圆圈所圈的特征点最为显著。本文将在下文对支配时延出现链路端到端距离小于 5 000 km 的支配时延特性进行研究。

5.2 支配时延地理位置映射

为了研究支配时延链路两端距离小于 5 000 km 的支配时延特性, 本文利用 GeoLiteCity 开源数据库将出现支配时延链路两端 IP 地址进行地理映射, 研究支配时延出现的地理位置与其特征关系。

首先, 先对 4 个探测节点探测出现支配时延链

路的有效路径两端 IP 地址进行地理映射。

由图 9 可以看出, 出现支配时延链路的有效路径, 探测源端与探测目的端大都分布在不同大洲不同国家 (70% 以上), 只有少部分出现在同一国家或同一大洲的不同国家, 说明利用 CAIDA Ark 探测机制探测的有效路径具有明显的跨地域性, 同时也说明本文选取的 4 个探测节点探测的有效路径很有效, 避免了因探测路径狭隘限制后面研究支配时延的真实性。

接着, 对有效路径上出现支配时延链路两端的 IP 地址进行地理映射。统计结果如图 10 所示。支配时延出现链路两端 IP 地址地理映射的统计结果与出现支配时延的有效路径两端 IP 地址地理映射统计结果相差很大。在图 10 的统计结果中, 虽然统计 scl-cl 探测节点的探测结果与统计其他 3 个探测节点的探测结果略有不同, 但是不会对总体结果造成影响。根据统计, 支配时延以较高频率 (超过 80%) 出现在同一国家的某一段链路上, 即以较高概率出现在同一国家的同一城市或不同城市之间某一中转路由链路上。本文接着对出现在同一国家的支配时延链路两端 IP 地址进行分析, 对其链路两端 IP 地址进行城市映射, 统计结果如图 11 所示。

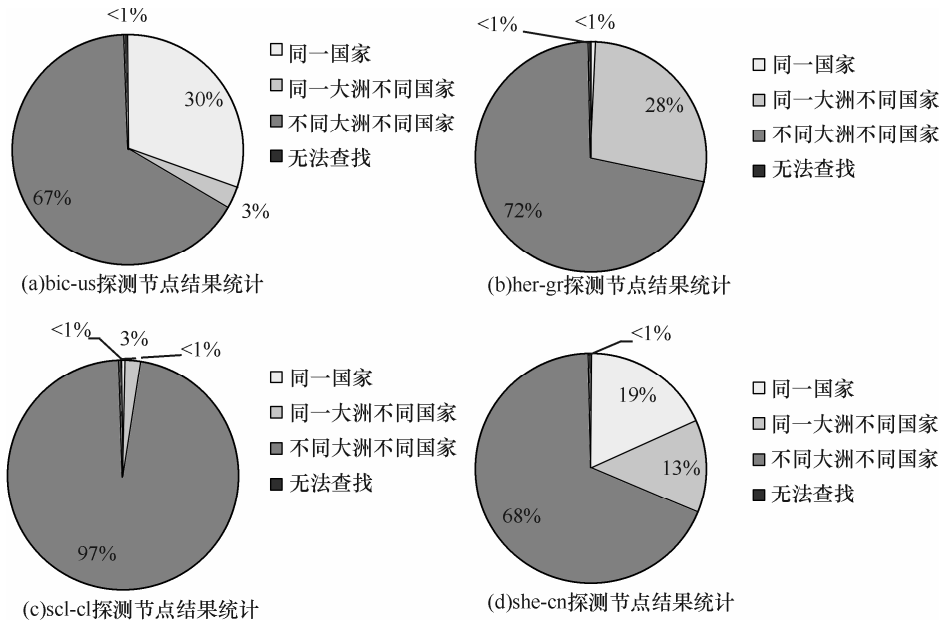


图 9 出现支配时延的有效路径两端 IP 地理映射统计

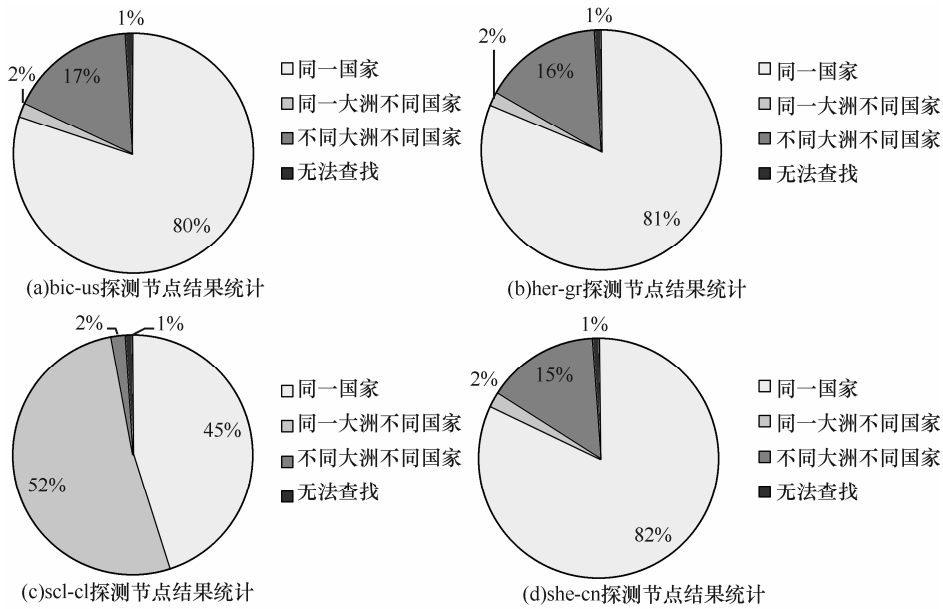


图 10 支配时延链路两端 IP 地址地理映射统计

在用 GeoLiteCity 对 IP 地址所在城市进行映射时，由于其数据库更新的局限性，在进行 IP 地址所注册城市映射时，有一部分 IP 地址无法进行相应的城市映射，而这部分数据最大也只有 25% (scl-cl 探测节点的统计结果)，不会影响整体数据的有效性。由图 11 可知，在同一国家出现支配时延的链路两端，大都出现在同一城市（超过 70%）。根据本文以上统计结果，本文研究的支配时延以较高概率出现在同一国家同一城市传输之间即同城链路传输易产生本文所研究的支配时延。

为了接着研究支配时延的地理分布特性，本文对出现在同一国家的支配时延链路两端可以进行城市映射的 IP 地址进行地理映射并利用百度地图将映射结果绘制在虚拟的世界地图上，如图 12 所示。

图 12 分别对 4 个探测节点探测的有效路径出现在同一国家的支配时延链路两端 IP 地址进行地理位置映射（依次为 bic-us, her-gr, scl-cl, she-cn 探测有效路径出现支配时延的映射结果），图中圆点代表 IP 地址所映射的城市，若支配时延链路两端

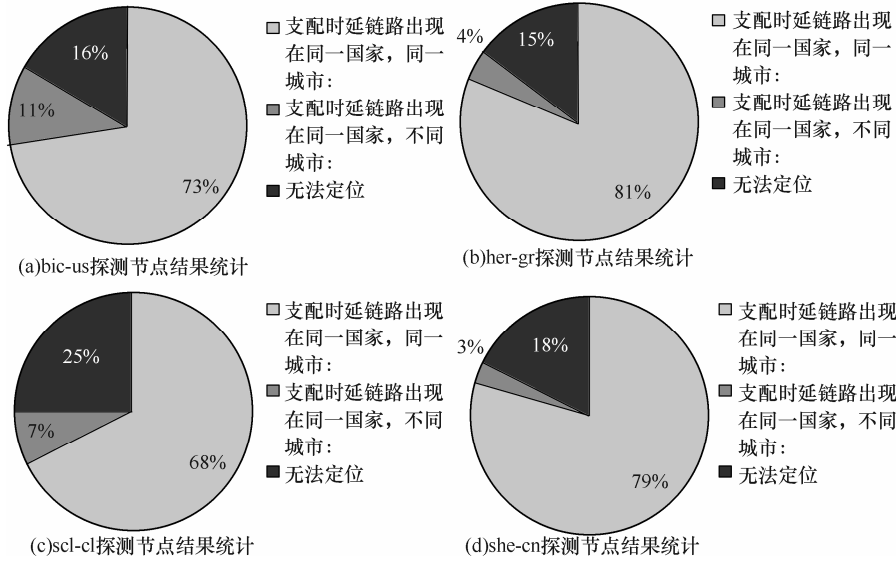


图 11 出现在同一国家的支配时延两端 IP 地址地理映射统计

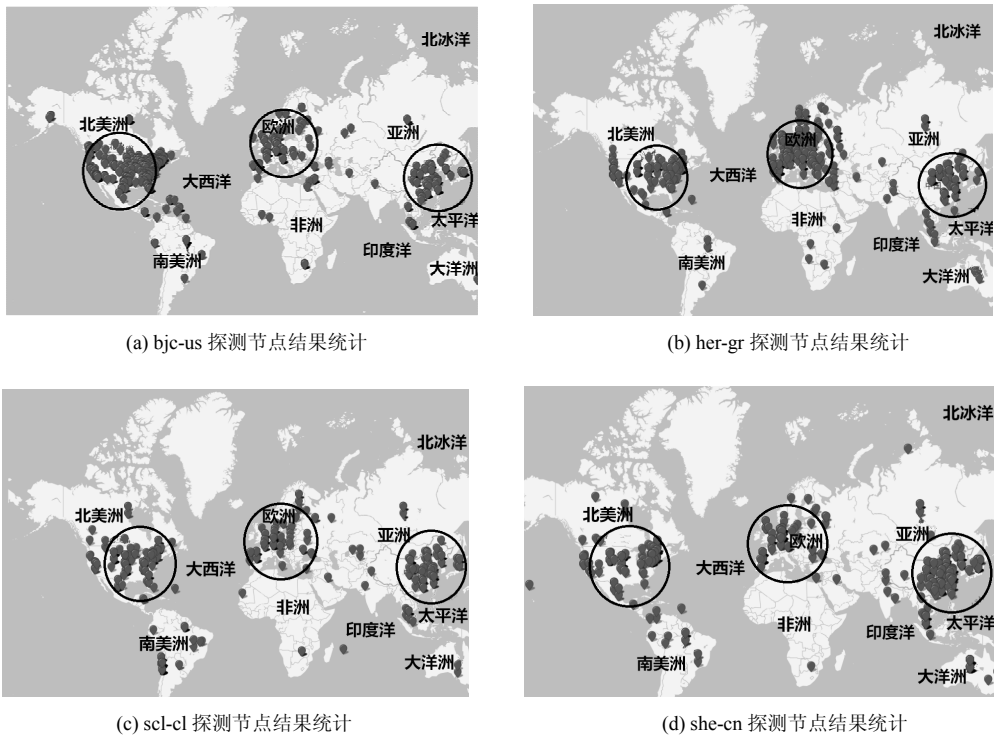


图 12 出现在同一国家的支配时延分布概况

都在同一城市，那么圆点将无限重合。由图 12 可以发现，出现在同一国家的支配时延链路两端大都分布在图中圆圈内，即北美洲的美国，亚洲中国整个东部，以及欧洲的部分国家（不包括俄罗斯全境）。分别对 4 个探测节点探测有效路径中在上述各地区出现支配时延的路径进行统计，统计结果如图 13 所示。

综上，结合图 12、图 13 的统计结果，本文研

究的支配时延以较高概率出现在上述地区，即美国全境，中国沿东海岸地区，以及整个欧洲（不包括俄罗斯全境）。由此可以判断，上述地区不仅是覆盖全球的互联网交互数据的枢纽中心，更是提高互联网数据传输效率的待解决地区。

5.3 支配时延产生原因

接着讨论支配时延链路两端距离小于 5 000 km 的支配时延有效组成成分以及图 8 圆圈所圈特征点

成因。首先，对图 13 所示出现在同一国家的支配时延以较高概率出现在的特殊地区地理特征进行查阅，如表 7 所示。

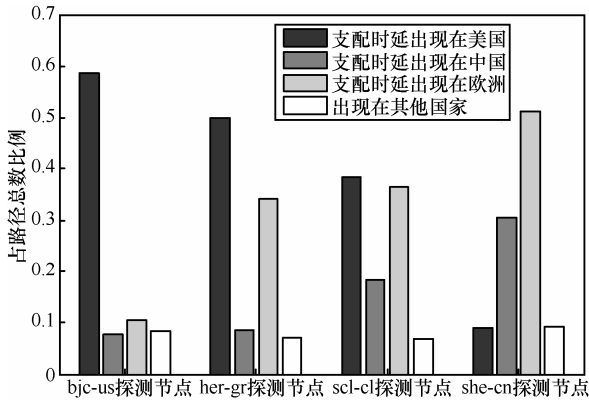


图 13 支配时延出现在特殊地区的比例统计

表 7 中国，美国，欧洲地理概况

地区	东西距离/km	南北距离/km	面积/km ²
中国	5 200	5 500	960 万
美国	4 500	3 000	937 万
欧洲	5 500	4 800	1 016 万

由表 7 的统计结果，上述频繁出现支配时延的地区都可以近似抽象为一个以 5 000 km 为直径的圆，而本文所研究的支配时延则以较高的频率出现在这一“圆圈”内。然而，丰富的样本量仍无法解释图 8 圆圈所圈特征点的异常。本文接着分析这类出现在上述“圆圈”内即出现在中国、美国、欧洲（不包括俄罗斯全境）的支配时延的有效组成成分。

上述 3 地区分别地处北美、欧洲、亚洲板块

中部，从地理位置上看，不存在大频率跨海传输现象。而从全球来看，当以光纤做为通信媒介时，距离 5 000 km 的异城传输最多消耗 25 ms 传播时延，而大部分的同城支配时延，即同城数据传播中，传播时延的消耗几乎可以忽略不计。接着分析发送时延对支配时延的影响。在 CAIDA Ark 探测项目下，每一个探测数据分组大小为 56 byte。以因特网主干网 100 Mb/s 的传输线路为通信媒介，在这样的通信环境下，传输 56 byte 的消耗时间约为 5 μs，而随着光纤利用率提高与普及，这一时间将会更短。因此，在 CAIDA Ark 探测项目下，传输时延也不做为影响支配时延的主要因素进行讨论。随着计算机的发展，大型服务器的普遍应用，分组交互网中处理时延的大小几乎趋于稳定，其大小微乎其微，也不做为本文研究支配时延成分的主要讨论对象。那么，只剩下排队时延。5.2 节的统计结果表明支配时延以较大概率出现在同一国家的同一城市某一段链路之间。而由图 14 的统计结果表明，出现在同一城市的支配时延的链路两端其前一跳路由或后一跳路由以超过 70% 的概率出现在这一城市之中即不存在城市链路特殊性。综上，当本文研究的 4 个探测节点探测有效路径时，在不考虑路由回环的前提下，以 1 跳或几跳路由经过图 12 所标注的城市时，其中 1 跳路由由中转会在这一城市中产生本文所研究的支配时延。

在分析了传输时延，处理时延，传播时延的影响之后，本文认为在同城传输时，排队时延成为影响支配时延的关键。在每个城市，每一个因特网服

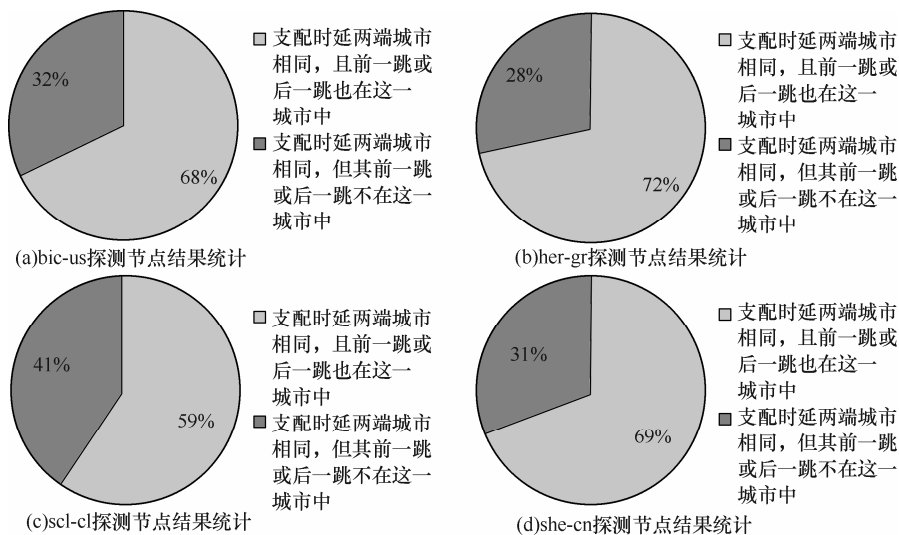


图 14 出现在同一城市的支配时延其前一跳或后一跳链路两端 IP 地址地理映射统计

务提供商 (ISP) 都做为一个分组交互枢纽而独立存在。当某一时间段网络负载上升时, 网络出现拥塞, 这类交换枢纽服务器势必产生很大排队时延, 且其大小呈现无规律的随机性, 最大可至 1~2s。同理, 对于支配时延出现在同一国家不同城市的链路两端, 排队时延也将是影响支配时延的关键。

综上, 支配时延以较高概率出现在同一国家中, 且出现在同一国家的支配时延两端大都集中在中国东部沿海地区、美国全境及欧洲 (不包括俄罗斯全境) 的部分国家, 而经过分析该类地区的支配时延主要由排队时延组成, 且排队时延呈现无规律随机性, 这也解释了图 8 圆圈所圈特征点无规律的随机现象。综上, 本文研究认为支配时延出现链路两端距离小于 5 000 km 的支配时延主要由排队时延组成, 而链路两端距离大于 5 000 km 的支配时延主要由传播时延组成。

6 结束语

本文以空间为主线统计了 CAIDA Ark 项目下分别位于 4 个不同地点的探测节点的探测数据, 系统分析网络时延特性。对比不同时间段 (2009 年 6 月至 2013 年 6 月) 4 个不同地点的探测节点的探测数据, 探测有效路径数达 900 万之多, 经过统计分析得出如下结论。

从同一探测节点获取的不同年份的网络时延分布具有一定的自相似性且发现网络时延的分布呈现双峰重尾分布特性。在此基础上证明了网络时延与通信直径之间的极弱相关性。对链路时延进行特征分析, 发现平均有 70% 的有效路径产生支配时延。经分析, 正是支配时延的普遍存在使通信直径相差不大的有效路径, 网络时延相差很大进而影响网络时延与通信直径之间的关系。对产生支配时延链路两端 IP 地址进行地理映射, 发现支配时延以超过 70% 的概率出现在同一国家同一城市链路之间, 且主要集中在美国, 中国以及欧洲 (不包括俄罗斯全境) 的部分国家。对于链路两端 IP 地址距离小于 5 000 km 的支配时延, 排队时延是影响支配时延的关键, 而对于链路两端 IP 地址距离大于 5 000 km 的支配时延, 传播时延是影响支配时延的关键。

参考文献:

[1] YOON S H, JEONG H, BARABÁSI A L. Modeling the Internet's large-scale topology[J]. Proceedings of the National Academy of Sci-

- ences, 2002, 99(21): 13382-13386.
- [2] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Internet: Diameter of the world-wide web[J]. Nature, 1999, 401(6749): 130-131.
- [3] PASTOR-SATORRAS R, VESPIGNANI A. Evolution and Structure of the Internet: A Statistical Physics Approach[M]. Cambridge University Press, 2007.
- [4] MILLS D L. Internet Delay Experiments[R]. RFC-889, 1983, 12.
- [5] MOON S B, KUROSE J, SKELLY P. Correlation of packet delay and loss in the Internet[R]. Department of Computer Science, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, 1998: 98-11.
- [6] ACHARYA A, SALTZ J A. A study of Internet round-trip delay[R]. Technical Report CS2TR23736, University of Maryland, College Park 20742, 1997.
- [7] JUN A, HAI Z, CARLEY K M. Evolution of IPv6 Internet topology with unusual sudden changes[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(7): 078902.
- [8] BRADLEY H, MARINA F, DANIEL J. Distance metrics in the Internet[A]. Proceedings of the IEEE International Telecommunications Symposium 2002[C]. Natal, Brazil, 2002: 200-202.
- [9] 毕经平, 吴起, 李忠诚. Internet 延迟瓶颈的测量与分析[J]. 计算机学报, 2003, 26(4): 406-416.
- BI J P, WU Q, LI Z C. Measurement and analysis of internet delay bottlenecks[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(4): 406-416.
- [10] 李超, 赵海, 张昕. Internet 中支配延迟的特征行为研究[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1063-1067.
- LI C, ZHAO H, ZHANG X. Research on the characteristic behavior of Internet dominant delay [J]. Journal of Electronics, 2008, 36(6): 1063-1067.
- [11] 苏威积, 赵海, 徐野. 基于 hops 的 Internet 复杂网络分割度分析[J]. 通信学报, 2005, 26(9): 1-8.
- SU W J, ZHAO H, XU Y. Internet complex network separation degree analysis based on hops[J]. Journal of communication, 2005, 26(9): 1-8.
- [12] CAIDA Ark Project [EB/OL]. <http://www.CAIDA.org/projects/Ark/>.
- [13] HOOGHIEMSTRA G, VAN M P. Delay distributions on fixed Internet paths[R]. Delft University of Technology, report 200111031, 2001.
- [14] 谢希仁. 计算机网络 (第五版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006, 19-22.
- XIE X R. Computer Network Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006, 19-22.

作者简介:



林川 (1988-), 男, 辽宁凤城人, 东北大学博士生, 主要研究方向为复杂网络、互联网时延复杂性、软件定义网络。

赵海 (1959-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂网络、数据融合。

毕远国 (1980-), 男, 辽宁东港人, 东北大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络、车联网。

贾思媛 (1986-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学博士生, 主要研究方向为计算机网络、复杂网络。