

如表 3 所示,DTV=4 时, ρ 取得最小值,此时,覆盖链路 285 条,覆盖率 95%,E2E 探测发包路径数为 276 条,需要部署发包探针 30 个.因 Waxman 模型路径较长,途经链路较多,E2E 路径数较链路数少,需要借助本文提出方法对链路拥塞先验概率求解 Boolean 线性方程组补满秩.由于默认参数生成的 Waxman 网络模型中没有度值为 1 的节点,因此传统算法以度值最小的端主机作为 E2E 路径及链路覆盖的路由器,链路覆盖率最低.根据 Waxman 模型结构特点,利用 LCDTV 算法在优选系数 ρ 取得最小值时,链路覆盖范围最广,且兼顾了硬件探针部署开销及发包探测对 IP 网络的额外流量注入.

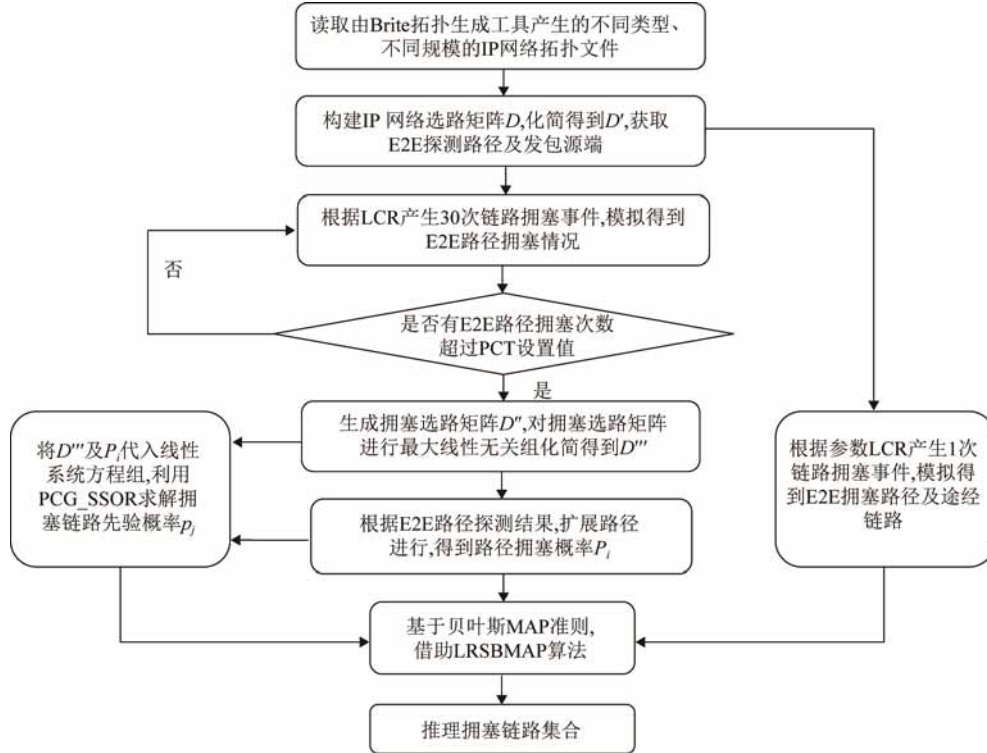


Fig.7 Flow diagram of analog experiment

图 7 模拟实验流程

Table 3 Performance comparison of LCDTV under the different DTV (Waxman model)

表 3 不同 DTV 下 LCDTV 算法性能比较(Waxman 模型)

DTV	E2E 发包探测路径数	覆盖链路数(覆盖率)	发包探针部署数	$\rho (10^3)$
2(文献[2-4])	179	251 (84%)	15	0.429 6
3	266	277 (92%)	26	0.553 3
4	276	285 (95%)	30	0.414 0
5	294	281 (94%)	29	0.511 6
6	272	272 (91%)	27	0.661 0
7	286	280 (93%)	32	0.640 6
8,9,10	284	275 (92%)	29	0.658 9
11	283	274 (91%)	27	0.687 7
12,13,14	253	277 (92%)	25	0.506 0

(2) GLP 模型

由于 IP 网络规模的不断扩大,当前 IP 网络拓扑结构表现出较强的幂率特性.因此,利用 Brite 拓扑生成器以默认参数生成 200 个节点的 GLP 模型(链路 354 条,叶子节点 148 个,节点度数最大值 47).利用传统算法及本文提出的 LCDTV 算法分别进行 E2E 路径及链路获取,通过实验,算法优化前后的 E2E 路径数、覆盖链路数(覆盖率)、发包探针部署数及优选参数 ρ 的计算结果见表 4.

Table 4 Performance comparisons of LCDTV under the different DTV (GLP model)

表 4 不同 DTV 下算法 LCDTV 优化前后性能比较(GLP 模型)

DTV	探针部署数		E2E 路径数		覆盖链路数(覆盖率)		运行时间(ms)		$\rho(10^3)$ (优化后)
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	
1(文献[2-4])	1	-	147	-	188(58%)	-	17 704	-	-
2	4	4	248	250	220(67.9%)	220(67.9%)	23 548	5 833	0.321
3	7	7	378	393	247(76.2%)	245(75.6%)	26 005	7 692	0.671
4	9	8	494	387	270(83.3%)	253(78.1%)	27 319	8 047	0.678
5,6,7	8	8	442	454	260(80.2%)	260(80.2%)	20 455	8 494	0.719
8	9	8	389	416	247(76.2%)	247(76.2%)	19 768	7 224	0.792
9~47	10	10	352	352	245(75.6%)	245(75.6%)	20 461	7 339	0.859

由表 4 可知,对 200 个节点的 GLP 模型进行链路覆盖,由于强幂率模型下的 IP 网络,路径途径链路数较少,因此,传统算法仅通过叶子节点进行链路覆盖时,因路由算法中最短路径优先原则,不能有效覆盖待测 IP 网络中尽可能多的链路,链路覆盖率为 58%.LCDTV 算法通过改变 DTV 参数,覆盖链路有一定程度的提高.随着 IP 网络规模的激增,实验发现,利用 LCDTV 改进方法,运行时间明显缩短,但链路覆盖率变化不大.当 $DTV=3$ 时, $\min(\rho|_{DTV=3})=0.671$,此时,链路覆盖率为 75.6%,较传统算法提高了 17.6%.虽然 $DTV=2$ 时, ρ 值更小,但是链路覆盖率不超过 70%,为了覆盖 IP 网络中更多的链路,可选择 ρ 次小值作为 LCDTV 算法中最优 DTV 值选取的依据.通过对不同模型下参数 ρ 值计算结果的分析,当 ρ 取得最小或次小值时,能够兼顾链路覆盖率、探针部署及 E2E 发包路径数,验证了本文 E2E 路径及探针部署优化中参数 ρ 设置的有效性.

7.4 PCG_SSOR实验结果分析

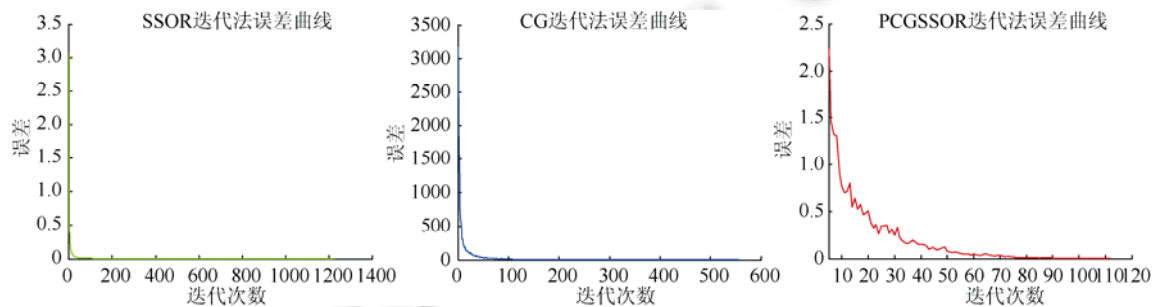
为了验证 PCG_SSOR 迭代算法在一定规模 IP 网络下的链路拥塞先验概率求解性能,模拟 500 个节点的 Waxman(1 000 条链路),BA(997 条链路)及 GLP(923 条链路)IP 网络模型.其中, $CLR=0.1$.首先,对 3 种不同模型基于最优度值进行探针部署,分别覆盖链路数 958,937 及 703 条.利用误差曲线对 PCG_SSOR,CG 及 SSOR 算法进行比较.误差限均设置为 10^{-3} .在不同 IP 网络模型下,模拟 30 次链路拥塞事件,利用 3 种不同迭代算法求解链路拥塞先验概率,各算法的误差曲线如图 8 所示.

表 5 为 500 个节点规模、不同类型的网络模型下,拥塞先验概率迭代求解运行时间结果.实验结果均是在 i7-5600U CPU,8G 内存,64 位 Win7 操作系统 LenovoX250 下运行所得.

Table 5 Comparisons between iterations and operation time under the different algorithms

表 5 不同算法迭代次数及运行时间比较

迭代算法 模型类型	SSOR		CG		PCG SSOR	
	迭代次数	运行时间(s)	迭代次数	运行时间(s)	迭代次数	运行时间(s)
Waxman	1 228	2.717 8	556	2.000 3	112	1.238 5
BA	702	1.544 9	607	2.066 4	103	1.184 7
GLP	661	0.852 9	401	0.627 9	88	0.564 8



(a) Waxman 模型

Fig.8 Comparisons of iteration algorithm error curves under the different models

图 8 不同模型下各迭代算法误差曲线比较

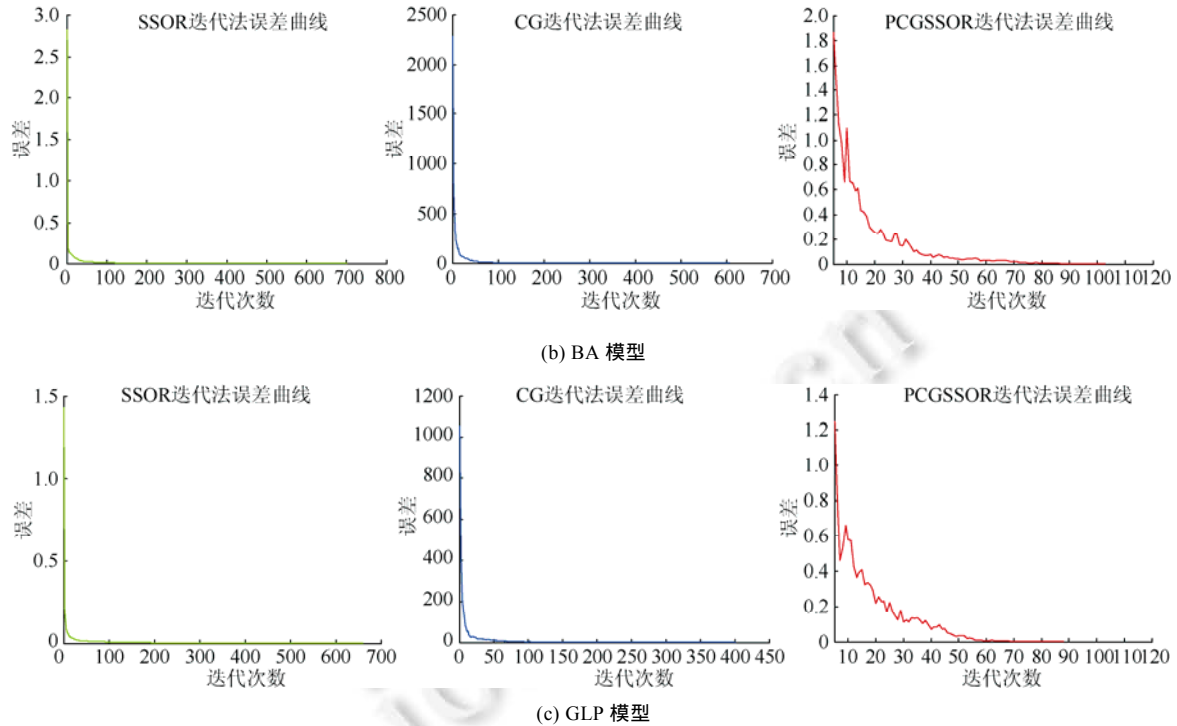


Fig.8 Comparisons of iteration algorithm error curves under the different models (Continued)

图8 不同模型下各迭代算法误差曲线比较(续)

由表5可知,在相同误差限 10^{-3} 下,在3种不同类型的网络模型下,SSOR,CG及PCG_SSOR迭代算法均能在2000次迭代内实现算法收敛.PCG_SSOR算法迭代次数最少,收敛速度最快,运行时间最短.通过实验发现,在一定规模的IP网络多链路拥塞场景下,传统Gauss消元法及Jacobi迭代算法不能有效地实现链路拥塞先验概率的求解.

7.5 LRSBMAP实验结果比较分析

为了验证本文提出的LRSBMAP算法在拥塞链路推理中的有效性及准确性.利用Brite拓扑生成器以默认参数模拟不同类型,规模的IP网络模型Waxman、BA及GLP,并与CLINK算法进行推理性能比较.

(1) 不同CLR对算法推理性能的影响

对于150个节点规模的IP网络模型,CLR从0.05~0.6发生变化,两种算法在最优DTV下DR及FPR如图9所示.

在不同类型的IP网络模型下,LRSBMAP算法的推理性能优于CLINK算法.随着CLR的增大,DR均呈下降趋势.两种算法的DR均在GLP模型下最高,其次是BA及Waxman模型.这与IP网络模型拓扑结构有直接关系,因Waxman为随机模型,路径较长,而BA及GLP为幂率模型,网络中部分路由器度值较大,共享链路数较Waxman模型中要多.因此,在Waxman模型下,DR较GLP及BA模型有明显下降.当 $CLR < 0.2$ 时,LRSBMAP及CLINK算法在GLP及BA模型下的推理性能相差不多.但是,当 $CLR > 0.2$ 时,LRSBMAP算法在Waxman,BA及GLP模型下,其推理性能均优于CLINK算法,并且随着CLR的增大,推理性能的优势更加明显.体现出LRSBMAP算法在多链路拥塞下的性能优势.随着CLR的增大,LRSBMAP算法的性能下降较CLINK算法趋缓.当 $CLR = 0.5$ 时,CLINK算法在GLP及BA模型下的DR不足55%,在Waxman模型下仅有40%;LRSBMAP算法在GLP模型下的DR仍保持在75%左右,在BA及Waxman模型下分别为65%和55%以上.两种算法均在GLP模型下的FPR最低,其次是BA及Waxman模型.随着CLR的增大,FPR均先呈缓慢上升趋势,当CLR达到一定

比例时,FPR 呈下降趋势.

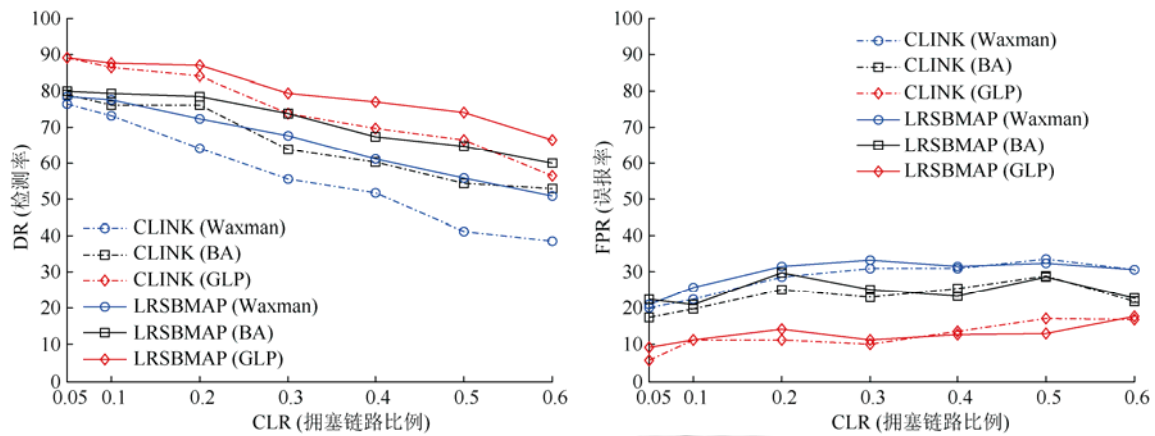


Fig.9 Inference performance comparisons under the different CLR (*node number=150*)

图 9 不同 CLR 下,两种算法的推理性能比较(节点数=150)

(2) 不同网络规模对算法的影响

为了验证算法在不同 IP 网络类型、不同规模下的推理性能.利用 Brite 生成节点数 50~500 的 Waxman、BA 及 GLP 网络拓扑模型.设置多链路拥塞场景,CLR=0.5.LRSBMAP 算法及 CLINK 算法的 DR 及 FPR 如图 10 所示.

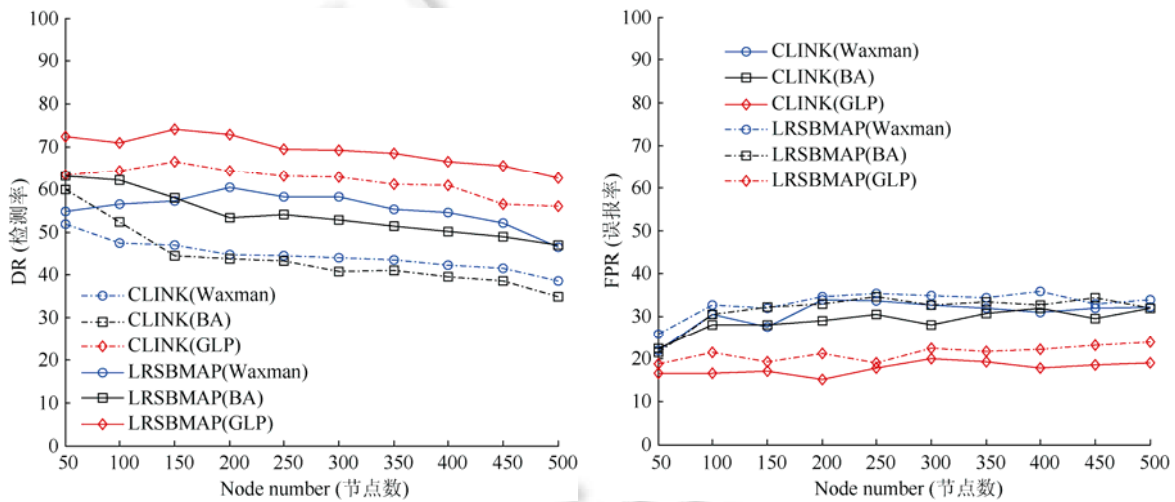


Fig.10 Inference performance comparisons under the different network scales (*CLR=0.5*)

图 10 不同网络规模下,两种算法的推理性能比较(*CLR=0.5*)

由图 10 可见,在不同类型、不同规模的 IP 网络模型下,两种算法的推理性能均随网络规模的扩大呈缓慢下降趋势.其中,LRSBMAP 算法对 Waxman,BA 及 GLP 模型推理性能均优于 CLINK 算法,在 GLP 模型下,DR 最高,其次是 BA 及 Waxman 模型.在 GLP 模型下,FPR 最低,其次是 BA 及 Waxman 模型.两种算法在 Waxman,BA 及 GLP 模型下的推理 FPR 均随着 IP 网络规模的扩大,基本保持稳定.在 GLP 模型下的 FPR 均较 BA 及 Waxman 模型下要低.在 3 种不同网络模型下,LRSBMAP 与 CLINK 算法的拥塞链路推理 FPR 差距不大,当 CLR=0.5 时,LRSBMAP 算法的 FPR 平均值略高于 CLINK 算法.

(3) 不同 DTV 对算法推理性能的影响

假设 IP 网络 $CLR=0.5$, 通过本文优选 E2E 探测路径及部署点方法, DTV 从模型最小度值增大到待推理 IP 网络中路由器最大度值. 得到不同的链路覆盖范围, 借助 CLINK 及 LRSBMAP 算法分别进行拥塞链路推理. 在利用 Brite 拓扑生成器以默认参数生成的 Waxman 模型中, 路由器度值范围为 2~14, BA 模型中, 路由器度值范围为 2~33, GLP 模型中, 路由器度值范围为 1~33. 因此, 选取 $DTV_{Waxman} \in [2, 14]$, $DTV_{BA} \in [2, 33]$, $DTV_{GLP} \in [1, 33]$. 按照本文对 E2E 路径获取优化策略进行 E2E 路径获取及链路覆盖. 对 Waxman 模型, 当 $DTV=8\sim 10$ 及 $12\sim 14$ 时, E2E 探测路径数及覆盖链路保持不变; 对 BA 模型, 当 $DTV=12\sim 15$ 及 $16\sim 33$ 时, E2E 探测路径数及覆盖链路保持不变; 对 GLP 模型, 当 $DTV=5\sim 7$ 及 $9\sim 33$ 时, E2E 探测路径数及覆盖链路不变. 因此, 为了便于在同一坐标系下比较 LRSBMAP 算法在 3 种不同网络模型下的拥塞链路推理性能, 以 DTV 选取 1~16 作为横轴坐标刻度点. 当 $CLR=0.5$ 时, 在 3 种不同的网络模型下, LRSBMAP 及 CLINK 算法的推理性能如图 11 所示.

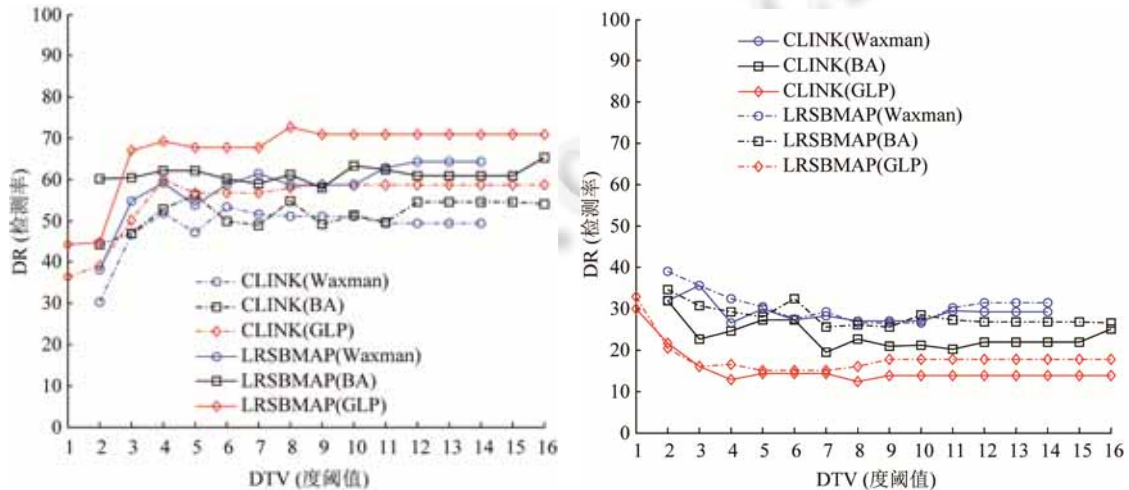


Fig. 11 Inference performance comparisons under the different DTV ($CLR=0.5$)

图 11 不同 DTV 下, 两种算法的推理性能比较 ($CLR=0.5$)

由图 11 可见, 当 DTV 选取叶子节点或端主机进行探针部署, 通过 snapshots 对各 E2E 路径发包探测时, 对 GLP 及 Waxman 模型的链路覆盖范围不足, DR 下降得明显, FRP 较高. 而对于 150 个节点的 BA 模型, 当进行 DTV 优选时, 因 $DTV_{optimal}=2$, 是 BA 模型中路由器度值的最小值. 此时, 链路覆盖率高, 算法推理性能不受影响. 通过对不同 DTV 的选取发现, 当推理算法对链路覆盖比例达到一定范围后, 推理算法对 IP 网络拥塞链路推理性能均趋于稳定, 算法推理性能与算法链路覆盖范围之间有一定的联系.

实验结果表明, 本文提出的 LRSBMAP 算法在推理性能上较 CLINK 算法有一定程度的提高. 原因如下.

- (1) CLINK 算法认为, 链路包含在越多的 E2E 路径中, 越有可能是发生拥塞的链路;
- (2) CLINK 算法推理过程中, 如已确定某 E2E 路径途经的某条链路为拥塞链路, 则该路径及包含该链路的其他路径将从待推理的候选路径集合中去除. 显然, 这两个拥塞链路推理策略是存在一定问题的.

虽然共享路径最多的链路是最容易拥塞的链路(瓶颈链路). 但是, 如非瓶颈链路或共享路径较少的链路发生拥塞时, 如其拥塞先验概率较大, CLINK 算法中通过引入共享数目 $|\text{domain}(e_k)|$ 的权重, 即便瓶颈链路的拥塞先验概率较小, 加权后仍被认为是最容易拥塞的链路, 推理结果可能存在误差. 另外, 由于确定某路径中最有可能发生拥塞的链路后, 该路径将不再作为候选路径进行该路径下其他链路性能的推理, 除非被去除的链路仍存在于其他待推理的候选路径中, 否则, 将也不再被作为候选链路被推理. 因此, LRSBMAP 算法的推理精度较 CLINK 算法有一定程度的提高, 特别是当 IP 网络 E2E 路径中同时存在多条链路拥塞的场景下, CLINK 算法的推理性能较本文提出的 LRSBMAP 算法有一定幅度的降低.

8 总结及展望

本文提出一种大规模 IP 网络多链路拥塞场景下的拥塞链路推理算法 LRSBMAP.通过度阈值优选,兼顾链路覆盖率,E2E 探测路径数及探针部署开销,尽可能多地覆盖待测链路;借助矩阵特性,基于 Boolean 代数线性方程组系数矩阵稀疏性提出 PCG_SSOR 算法,迭代求解各链路拥塞先验概率近似唯一解;基于推理时刻剩余拥塞选路矩阵及 BMAP 准则,提出利用改进的拉格朗日松弛次梯度算法推理最有可能发生拥塞的链路集合.实验验证了本文提出算法的准确性及鲁棒性.

考虑到当前 IP 网络中各 AS 区域多为动态路由算法,在可用带宽下降的情况下,将引起路由的动态变化.而当路由改变时,拥塞链路推理时拥塞路径途经的链路可能并不包含在链路拥塞概率学习时的链路集合中.因此,根据 IP 网络选路矩阵构建的贝叶斯网模型结构可能会发生变化,导致推理性能下降.如何准确学习动态路由下各链路的拥塞先验概率,并进行当前时刻拥塞链路定位推理和性能推断,是未来课题的研究方向.

References:

- [1] Pan SL, Yang XR, Zhang ZY, Qian F, Hu GM. Congestion link identification under multipath routing for single-source networks. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015,37(9):2232–2237 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11999/JEIT150058]
- [2] Padmanabhan VN, Qiu LL, Wang HJ. Server-Based inference of Internet performance. Technical Report, MSR-TR-2002-39, Redmond: Microsoft Corporation, 2002. 1–12.
- [3] Duffield NG. Network tomography of binary network performance characteristics. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(12):5373–5388. [doi: 10.1109/TIT.2006.885460]
- [4] Nguyen HX, Thiran P. The Boolean solution to the congested IP link location problem: Theory and practice. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications, INFOCOM 2007*. Alaska: IEEE, 2007. 2117–2125. [doi: 10.1109/INFCOM.2007.245]
- [5] Coates M, Hero A, Nowak R, Yu B. Internet tomography. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002,19(3):47–65. [doi: 10.1109/79.998081]
- [6] Zarifzadeh S, Gowdagere M, Dovrolis C. Range tomography: Combining the practicality of Boolean tomography with the resolution of analog tomography. In: *Proc. of the ACM Conf. on Internet Measurement, IMC 2012*. Boston: ACM, 2012. 385–398. [doi: 10.1145/2398776.2398817]
- [7] Ma L, He T, Leung KK, Swami A, Towsley D. Monitor placement for maximal identifiability in network tomography. In: *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Communications, INFOCOM 2014*. Toronto: IEEE, 2014. 1447–1455. [doi: 10.1109/INFCOM.2014.6848079]
- [8] Rong ZZ, Jin YH, Cui YD, Yang T. An optimization algorithm for measurement nodes' automatic deployment in distributed network measurement. *Chinese High Technology Letters*, 2014,24(11):1147–1152 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3772/j.issn.1002-0470.2014.11.008]
- [9] Matsuda T, Nagahara M, Hayashi K. Link quality classifier with compressed sending based on ℓ_1 - ℓ_2 optimization. *IEEE Communications Letters*, 2011,15(10):1117–1119. [doi: 10.1109/LCOMM.2011.082911.111611]
- [10] Pepe T, Ericsson R, Italy P, Puleri M. Network tomography: A novel algorithm for probing path selection. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications, ICC*. London: IEEE, 2015. 5337–5341. [doi: 10.1109/ICC.2015.7249172]
- [11] Adams A, Bu T, Friedman T, Horowitz J. The use of end-to-end multicast measurements for characterizing internal network behavior. *IEEE Communications Magazine*, 2000,38(5):152–159. [doi: 10.1109/35.841840]
- [12] Bu T, Duffield FL, Towsley PD. Network tomography on general topologies. In: *Proc. of the SIGMETRICS 2002, ACM SIGMETRICS Int'l Conf. on Measurement and Modeling of Computer Systems*. London: ACM, 2002,30(1). [doi: 10.1145/511334.511338]
- [13] Lawrence E, Michailidis G, Nair V, Xi B. Network tomography: A review and recent developments. *Frontiers in Statistics*, 2005,345–366. [doi: 10.1142/9781860948886_0016]
- [14] Duffield NG, Presti FL, Paxson F, Towsley D. Inferring link loss using striped unicast probes. In: *Proc. of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2001*. Anchorage: IEEE, 2001. 915–923. [doi: 10.1109/INFCOM.2001.916283]
- [15] Malekzadeh A, MacGregor M. Network topology inference from end-to-end measurements. In: *Proc. of the 27th IEEE Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA*. Barcelona: IEEE, 2013. 1101–1106. [doi: 10.1109/WAINA.2013.215]
- [16] Duffield NG. Simple network performance tomography. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM Conf. on Internet Measurement, IMC*

2003. Miami Beach: ACM, 2003. 210–215. [doi: 10.1145/948205.948232]
- [17] Ghita D, Argyraki K, Thiran P. Network tomography on correlated links. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Conf. on Internet Measurement, IMC 2010. Melbourne: ACM, 2010. 225–238. [doi: 10.1145/1879141.1879170]
- [18] Ghita D, KaraKus C, Argyraki K, Thiran P. Shifting network tomography toward a practical goal. In: Proc. of the 7th Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies, CoNEXT. Tokyo: ACM, 2011. 1–12. [doi: 10.1145/2079296.2079320]
- [19] Augustin B, Friedman T, Teixeira R. Measuring multipath routing in the Internet. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2011,19(3): 830–840. [doi: 10.1109/TNET.2010.2096232]
- [20] Kim MS, Kin T, Shin Y, Lam SS, Powers EJ. A wavelet-based approach to detect shared congestion. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008,16(4):763–776. [doi: 10.1109/TNET.2007.905599]
- [21] Liu XH, Yin JP, Lu XC, Zhao JM. A monitoring model for link bandwidth usage of network based on weakvertex cover. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2004,15(4):545–549 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/545.htm>
- [22] Shavitt Y, Sun X, Wool A, Yener B. Computing the unmeasured: An algebraic approach to internet mapping. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004,22(1):67–78. [doi: 10.1109/JSAC.2003.818796]
- [23] Garey MR, Johnson DS. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York: Freeman Press, 1979. 109–118.
- [24] Xing WX, XIE JX. Modern optimization algorithm. 2th ed., Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 210–236 (in Chinese).
- [25] Shakeri M, Pattipati R, Raghavan V, Patterson-Hine A. Optimal and near-optimal algorithms for multiple fault diagnosis with unreliable tests. IEEE Trans. on Systems Man & Cybernetics (Part C: Applications & Reviews), 1998,28(3):431–440. [doi: 10.1109/5326.704583]
- [26] Waxman BM. Routing of multipoint connections. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1989,6(9):1617–1622. [doi: 10.1109/49.12889]
- [27] Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999,286(5439):509–512. [doi: 10.1126/science.286.5439.509]
- [28] Albert R, Barabási AL. Topology of evolving networks: Local events and universality. Physical Review Letter, 2000,85(24): 5234–5237. [doi: 10.1103/PhysRevLett.85.5234]
- [29] Bu T, Towsley D. On distinguishing between Internet power law topology generators. In: Proc. of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2002. New York: IEEE, 2010. 638–647. [doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019309]
- [30] Medina A, Lakhina A, Matta I, Byers J. BRITE: An approach to universal topology generation. Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2001,28(2):346–353. [doi: 10.1109/MASCOT.2001.948886]

附中文参考文献:

- [1] 潘胜利,杨析儒,张志勇,钱峰,胡光岷.单源多径路由网络拥塞链路识别.电子与信息学报,2015,37(9):2232–2237. [doi: 10.11999/JEIT150058]
- [8] 荣自瞻,金跃辉,崔毅东,杨谈.分布式网络测量的测量节点自动部署优化算法.高技术通讯,2014,24(11):1147–1152. [doi: 10.3772/j.issn.1002-0470.2014.11.008]
- [21] 刘湘辉,殷建平,卢锡城,赵建民.基于弱顶点覆盖的网络链路使用带宽监测模型.软件学报,2004,15(4):545–549. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/545.htm>
- [24] 邢文训,谢金星.现代优化计算方法.第2版,北京:清华大学出版社,2005.210–236.



陈宇(1978 -),男,河南浚县人,博士生,副教授,主要研究领域为数据采集与信号处理,网络信息安全.



段哲民(1953 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为电路与系统,集成电路分析设计.



温欣玲(1979 -),女,副教授,主要研究领域为数据采集,信号处理.



李宇翀(1980 -),男,博士,主要研究领域为网络测量,网络安全.