

基于网络编码的拓扑推断研究综述

徐 静¹ 刘宴涛^{1,2} 夏桂阳¹ Yasser MORGAN²
(渤海大学工学院 锦州 121000)¹ (里贾纳大学 里贾纳 S4S 0A2)²

摘 要 拓扑结构是重要的网络性能参数之一,尤其是对网络监控和管理而言,获取网络拓扑是一个很有意义的基础问题。网络编码技术的出现为网络拓扑推断提供了新的思路,中间节点的网络编码操作使得编码数据与网络拓扑结构之间存在着紧密的联系,基于网络编码的拓扑推断正是利用这种联系对网络拓扑结构进行分析识别。与利用网络层析成像实现拓扑推断相比,基于网络编码的拓扑推断有许多优势,如提高拓扑推断的准确性、降低推断算法的复杂度等。总结了网络编码技术在网络拓扑推断中的应用及研究现状。

关键词 网络拓扑结构,网络编码,网络层析成像,拓扑推断

中图法分类号 TN393 文献标识码 A

Network Coding Based Topology Inference: A Survey

XU Jing¹ LIU Yan-tao^{1,2} XIA Gui-yang¹ Yasser MORGAN²

(College of Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China)¹ (University of Regina, Regina S4S 0A2, Canada)²

Abstract Topology structure is one of the important parameters in a network. Acquiring network topology is a very meaningful fundamental problem, especially for the purpose of monitoring and managing a network. The birth of network coding offers new ideas and methods for network topology inference. There exist close relationships introduced by network coding operations of network nodes between encoded data and network topology, which can be further exploited to acquire network topologies. Compared to network tomography based methods, the network coding based topology inference outperforms them in many aspects, such as improving inference accuracy, lowering algorithm complexity, etc. This paper investigated the state-of-the-art studies of network coding on topology inference.

Keywords Network topology, Network coding, Network tomography, Topology inference

1 引言

准确地掌握网络拓扑结构是实现网络内部性能监控和管理的基础,也是优化网络路由、提高网络安全性与可靠性的重要依据。如何获得网络拓扑已成为网络性能测量与分析的重要研究目标。传统的网络拓扑推断方法大多为基于相关网络协议的拓扑识别方法,且需要借助网络内部节点的协作,这类推断方法包括基于 SNMP 的方法^[1,2]、基于 Traceroute 的方法^[3-6]和基于 BGP 路由表的方法^[7]等。出于商业利益、网络安全性等因素的考虑,网络内部节点的信息通常不对外公布,因此增加了网络拓扑识别的难度。为了更好地实现网络拓扑以及其他网络性能的优化管理,人们不得不另辟它途。1996年, Vardi^[8]将医学领域的计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)思想引入到网络测量中,并首次提出了网络层析成像(Network Tomography, NT)这一新的网络测量技术。文献^[9]对网络层析成像技术进行了全面的介绍和总结,表 1 列出了目前网络层析成像的主要研究内容。

表 1 网络层析成像问题分类

层析问题分类	路由矩阵	参数向量
链路级参数推断	已知	待求
网络拓扑推断	待求	已知
OD 流量估计	已知	待求

网络层析成像的提出开启了网络测量和网络性能监控的新篇章, NT 在网络拓扑推断上的应用更是得到了广泛关注。赵洪华等^[10]对基于网络层析成像技术的拓扑推断作了较为系统的总结。基于 NT 的拓扑推断分为 3 个步骤:首先,利用端到端测量方法获取端到端网络性能参数;其次,根据性能参数的端到端测量数据计算节点间的相关性值;最后,利用得到的相关性值推断节点的连接方式,并最终实现网络拓扑的重构。目前,基于网络层析成像的拓扑推断算法主要包括确定性二叉树推断算法(DBT)、LBT 算法、基于图论的分层推断算法(THE)和 MLT 算法等^[11-14]。纵观基于 NT 技术的拓扑推断算法,在进行端到端的性能测量时大多将探测包的数目、探测包的到达顺序、具有单调性的网络性能参数(如链路丢包率、延时)等作为测量对象,通过对测量结果的统计分析计算

本文受国家自然科学基金项目(61471045, 61227001), 山东航天创新基金(2014JJ005), NSERC, CFI, auto21 资助。

徐 静(1989—), 女, 硕士生, 主要研究方向为网络控制、网络编码、网络拓扑推断, E-mail: 15275057045@163.com; 刘宴涛(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 Ad hoc 网络、网络编码和网络仿真, E-mail: liuyantaocn@163.com; 夏桂阳(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为网络控制、网络编码和网络仿真; Yasser MORGAN 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为自组织网络、网络安全、车际网络、公共安全网络、网络编码等。

出节点间的相关性,进而利用反推法确定网络的拓扑结构。

基于网络层析成像的拓扑推断需要应用统计学理论对大量的统计数据进行分析和计算,此外探测包发送数量多、节点相关性计算复杂、统计推断复杂度高问题也不利于快速、准确地推断网络拓扑。鉴于现有拓扑推断方法存在的不足,研究人员致力于探索测量过程更简单、准确度更高的拓扑推断方法。网络编码的出现为网络拓扑推断的进一步发展提供了新的契机,网络编码是在2000年提出的一项新的信息处理技术,目前对网络编码的研究分为基础理论研究和应用研究两大部分,文献[15-17]对网络编码的理论研究工作进行了较为详尽的介绍,文献[18,19]则综合阐述了网络编码的应用研究情况。本文重点介绍了网络编码在网络拓扑推断中的应用,首先回顾网络编码的基本思想并介绍网络编码用于网络拓扑推断的基本依据,其次从主动拓扑层析、被动拓扑层析以及拓扑推断的对偶问题等方面对基于网络编码的网络拓扑推断进行了详细的介绍,最后对全文进行总结并展望未来的技术发展。

2 拓扑推断基础

2.1 网络编码的基本思想

网络编码的概念是在2000年由 Ahlswede 等[20]正式提出的,网络编码使中间节点不再局限于“存储-转发”操作。下面结合图1中的蝴蝶网络介绍网络编码的基本思想。

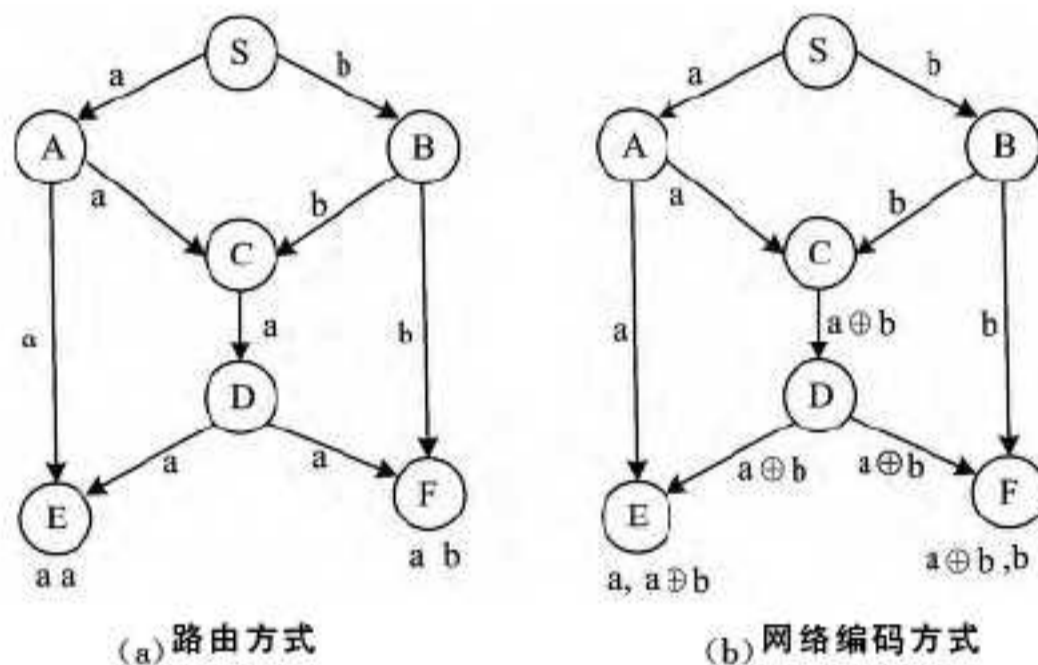


图1 经典蝴蝶网络

设图1中链路的容量均为单位容量, S 为信源节点, E 、 F 为两个信宿节点,其余节点为中间节点, S 通过中间节点向信宿 E 、 F 同时组播符号 a 和 b 。图1(a)利用路由技术实现数据组播,即节点只进行存储转发操作。由于链路的容量为单位容量,中间节点 C 只能转发 a 、 b 中的一个。假设中间节点 C 转发符号 a ,则链路 CD 、 DE 和 DF 上传输的符号均为 a ,最终信宿 F 收到符号 a 、 b , E 却只能收到 a 。可以看出, E 、 F 无法同时接收到信源 S 发送的符号 a 、 b ,因此无法实现最大容量传输。图1(b)采用网络编码,即网络的中间节点对接收到的多个信息进行有限域上的编码组合操作,这里以有限域 $GF(2)$ 上的异或操作为例。中间节点 C 接收到符号 a 、 b 后,进行异或操作并将得到的结果 $a \oplus b$ 转发给节点 D ,然后通过链路 DE 、 DF 发送到信宿 E 、 F 。 E 接收到符号 a 和 $a \oplus b$ 后,通过计算 $a \oplus (a \oplus b)$ 就可以得到符号 b ,同理, F 也能得到所有信息。可见,与路由技术相比,利用网络编码技术能够提高组播通信网络的吞吐量。

尽管网络编码最初被用于提高组播通信网络的容量,但是随着对网络编码研究的深入,研究人员发现网络编码在无线通信网络、网络层析成像、传感器网络、P2P内容分发和网络安全等领域也表现出很大的应用潜力和优势。网络编码在网络层析成像中的应用研究覆盖了该领域的主要研究内容,包括拓扑推断、链路丢包推断[21-26]和延时估计[27]等,文献[28]介绍了网络编码在网络层析成像中的应用。与基于网络层析成像的拓扑推断相比,将网络编码应用于网络拓扑推断具有提高推断准确度、降低推断算法的复杂度等优点,此外,应用网络编码还可以完成网络故障定位、网络瓶颈发现等传统网络层析成像很难完成的功能。

2.2 网络编码与网络拓扑的关系

结合网络编码的网络拓扑推断针对的是静态逻辑拓扑结构,且遵循文献[29]提出的路由策略:

- 1) 每一个源节点到每一个接收节点之间的路径唯一;
- 2) 1-by-2结构(倒“Y”型拓扑),同一源节点到两个不同接收节点之间的路径在遇到分支节点之前是共享的,图2(a)中节点 B 称为分支节点;
- 3) 2-by-1结构(“Y”型拓扑),两个不同的源节点到同一个接收节点间的路径在遇到汇聚节点之后是共享的,图2(b)中的节点 J 称为汇聚节点。

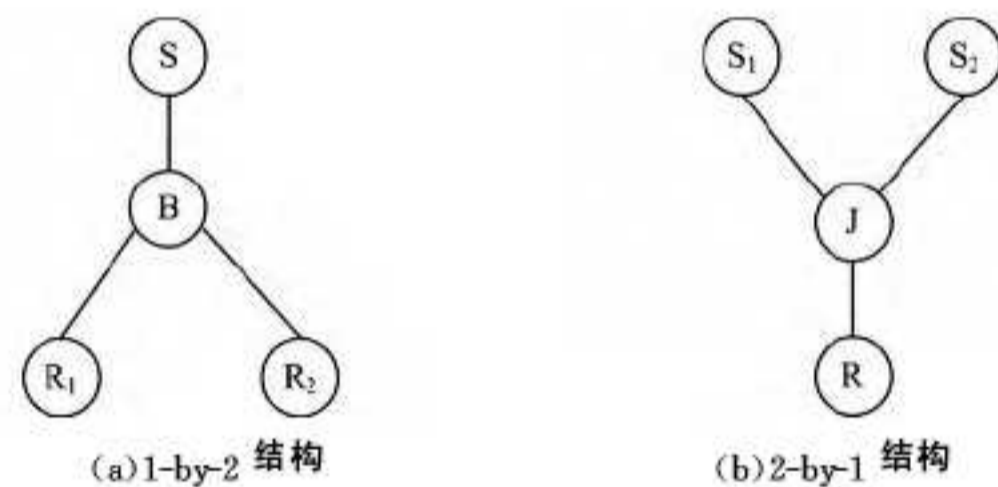


图2 路由策略

网络中入度至少为2、出度至少为1的中间节点具备网络编码能力,称为编码节点¹⁾。重新观察图1可以发现,网络编码主要发生在编码节点处。中间节点的网络编码操作会将网络的拓扑结构信息反映在编码数据中,即编码后的数据隐含了它所经过的网络链路的相关信息。基于网络编码与网络拓扑结构的这种关联性,可以利用网络编码来推断网络的逻辑拓扑结构。例如,在图1(b)中,中间节点 D 接收到编码数据包的内容为 $a \oplus b$, D 根据这一信息就可以断定它本身或者它的某一上游节点至少存在两个“源”节点和一个入度至少为2的中间节点,从而初步断定上游节点的拓扑特点。由此可见,编码数据自身携带拓扑信息的特性是利用网络编码实现拓扑估计的关键。

3 基于网络编码的拓扑推断研究

目前,基于网络编码的拓扑推断研究可以分为3个方面的内容,包括主动拓扑层析(即主动向网络中发送探测数据包)、被动拓扑层析(即利用网络中已存在的网络编码信息推断网络拓扑结构)以及拓扑推断的对偶问题,如图3所示。本文将针对这3方面的研究内容,对基于网络编码的网络拓扑推断的现有研究成果做详尽的介绍。

1) 本文中编码节点与汇聚节点等价使用。

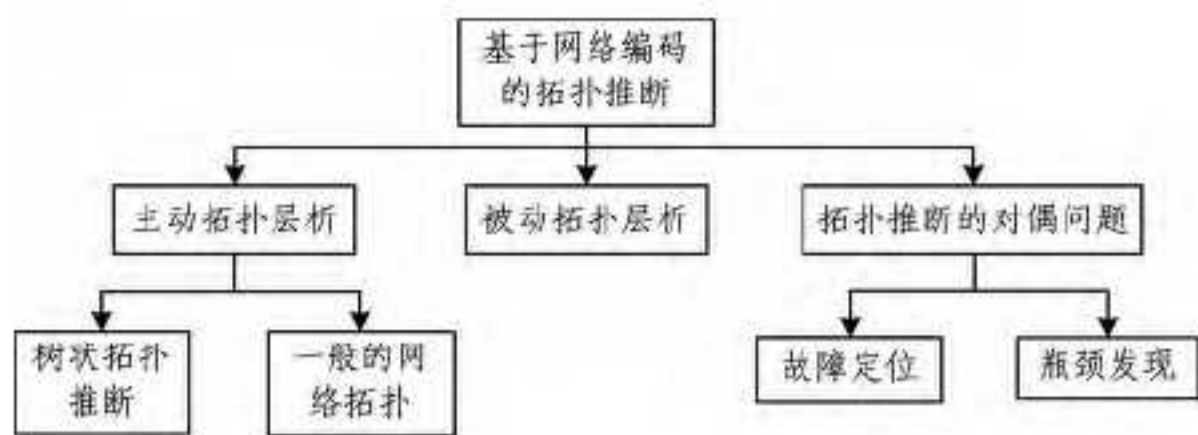


图3 基于网络编码的拓扑推断

3.1 结合网络编码的主动拓扑层析问题

主动拓扑层析成像是利用网络中的边缘节点向待测网络发送探测包,通过主动探测的方式获取待测网络的相关信息,从而实现网络拓扑的重构。基于网络编码的主动拓扑层析问题主要研究在节点执行网络编码的情况下,如何根据网络节点的网络编码行为以及观测到的探测包内容推断出树状拓扑或 M -by- N 网络的拓扑结构。

3.1.1 树状拓扑的推断问题

Fragouli 等^[30]首次将网络编码应用于网络拓扑推断,并针对二叉树提出了一种基于网络编码的叶节点聚类算法,该算法的主要思想是随机选取两个叶节点作为不同探测包的发送源节点,根据接收的不同探测包数据将叶节点划分到 3 个不同的集合中,然后在每一个集合中再次随机选择两个探测包发送源,通过同样的方式将拓扑划分为更小的结构,直到通过这种迭代的方式将所有叶节点划分到不同的集合中。该算法在每一次迭代中结合所有叶节点接收到的探测数据及编码行为推断出这 3 个不同集合的拓扑连接方式。

例 1 以图 4 所示的无向二叉树形拓扑为例,假设不存在链路丢包。第一次迭代时选择叶节点 A, J 作为探测包的发送源,其余叶节点作为接收节点。如果中间节点仅接收到一个数据包,则只进行转发操作,如果接收到来自不同链路的两个或多个数据包,则进行线性组合后转发给后继节点。 A, J 分别向网络发送数据包 a 和 b ,节点 G 同时接收到 a 和 b ,并将线性组合后的数据包 $a \oplus b$ 发送给后继节点。这样,叶节点 A, B 收到 a , C, D 收到 $a \oplus b$,叶节点 J, K, L 接收到 b ,因此根据叶节点观测到的数据包内容可以将叶节点划分为 3 个不同的集合,即 $L_1 = \{A, B\}, L_2 = \{C, D\}, L_3 = \{J, K, L\}$,如图 5 所示。为了判断 $L_3 = \{J, K, L\}$ 与 H 之间的连接关系还需要再进行一次迭代,任意选择 $L_3 = \{J, K, L\}$ 中的两个叶节点作为数据包 a, b 的发送源(如叶节点 K, L)。数据包在节点 I 处线性组合后转发给其他节点,最终叶节点 A, B, C, D, L 接收到 $a \oplus b, J, K$ 分别观测到 a, b ,因此经过第二次迭代可以得到如图 6 所示的拓扑推断结果。最后删除度数为 2 的中间节点就可以得到最终的网络拓扑结构。

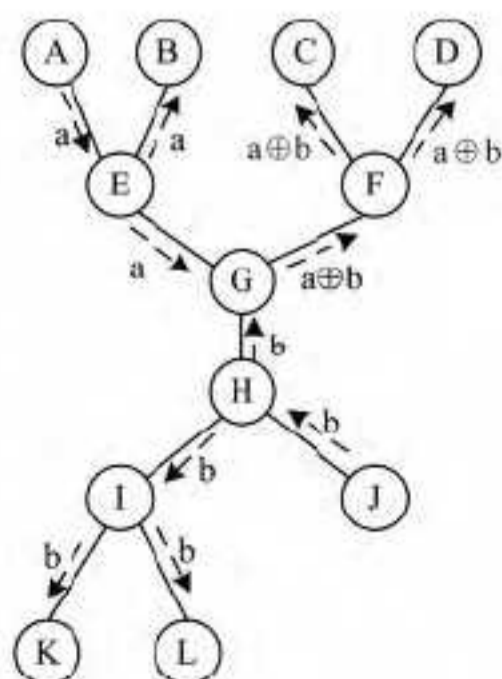


图4 基于网络编码的无向二叉树

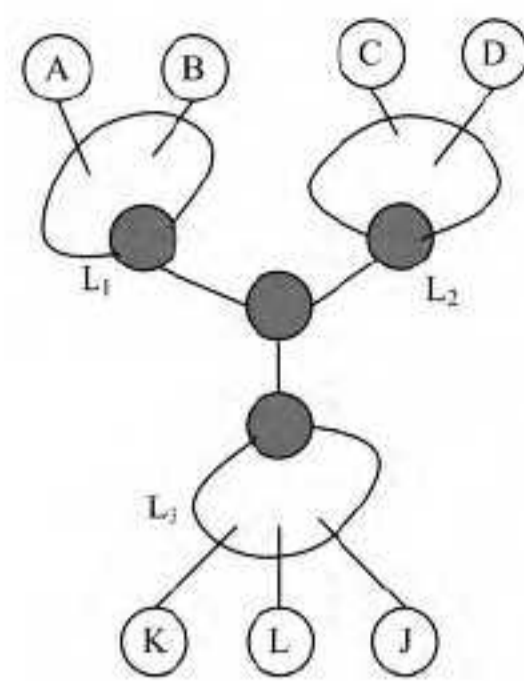


图5 第一次迭代后推断出的拓扑

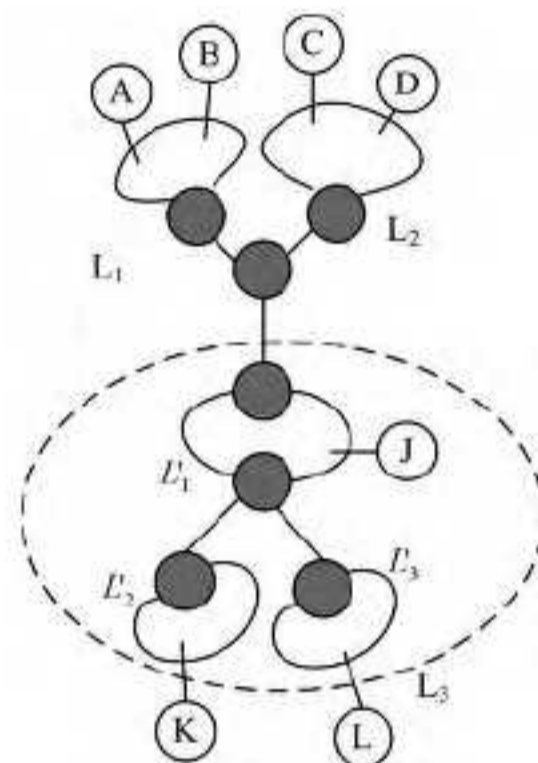


图6 第二次迭代后的拓扑结构

网络中的链路丢包可能会导致叶节点划分出现误差,从而导致拓扑推断出错,为此文献^[30]指出在每次迭代时通过固定探测包的传输方向来降低叶节点的错误划分概率。但是每个中间节点需要维护其邻居节点表,并通过标记“源节点”和“接收节点”来确定每次迭代时探测包的传输方向,这增加了中间节点的运算量。此外上述叶节点聚类算法主要针对二叉树,为此唐东明等^[31-33]改进了探测包的发送方式以及中间节点的编码处理过程,针对无链路丢包和有链路丢包两种情形分别提出了组合包测量法和快速发包算法,他们的算法避免了对中间节点和探测包帧结构上额外的设计开销,将算法的适用范围扩展到一般的树状拓扑。而 Jithin 等^[34]在探测包结构设计、中间节点的编码操作以及节点关系推断方法等方面都做了改进,提出了两种不同的树状拓扑推断算法。

前面提到的网络拓扑推断算法虽然能准确地估计网络拓扑,但是针对的网络主要是二叉树、 m 叉树等树状拓扑结构,不适用于推断更为一般的网状拓扑结构。

3.1.2 M -by- N 网络的拓扑层析问题

多源网络也称 M -by- N 网络,是指包含 M 个源节点、 N 个接收节点的网络, M -by- N 网络拓扑可以划分为更小的拓扑结构的集合,如 m -by- n ($2 < m < M, 2 < n < N$) 的集合、 2 -by- 1 拓扑和 1 -by- 2 拓扑的集合、 2 -by- 2 拓扑的集合等。由于 2 -by- 2 拓扑是能够同时描述汇聚节点和分支节点相对位置关系的最小拓扑结构,因此 2 -by- 2 拓扑的识别是多源拓扑层析问题的基础问题。根据分支节点和汇聚节点的相对位置可以将 2 -by- 2 拓扑划分为共享式结构和非共享式结构共 4 种基本的 2 -by- 2 结构,如图 7 所示。共享式拓扑结构具有 2 个中间节点和 5 条链路,且 2 个源节点具有相同的分支节点和汇聚节点,如图 7(a) 所示;非共享式结构有 4 个中间节点和 8 条链路,不同的路径都拥有至少一个独立的汇聚、分支节点,在

类型 2 中路径 S_1R_1 和 S_2R_2 无共享链路, 路径 S_1R_2 和 S_2R_1 有共享链路 J_1B_1 , 如图 7(b) 所示; 在类型 3 中路径 S_1R_1 和 S_2R_2 有共享链路 J_2B_1 , 路径 S_1R_2 和 S_2R_1 无共享链路, 如图 7(c) 所示; 在类型 4 中路径 S_1R_1 和 S_2R_2 无共享链路, 路径 S_1R_2 和 S_2R_1 也无共享链路, 如图 7(d) 所示。

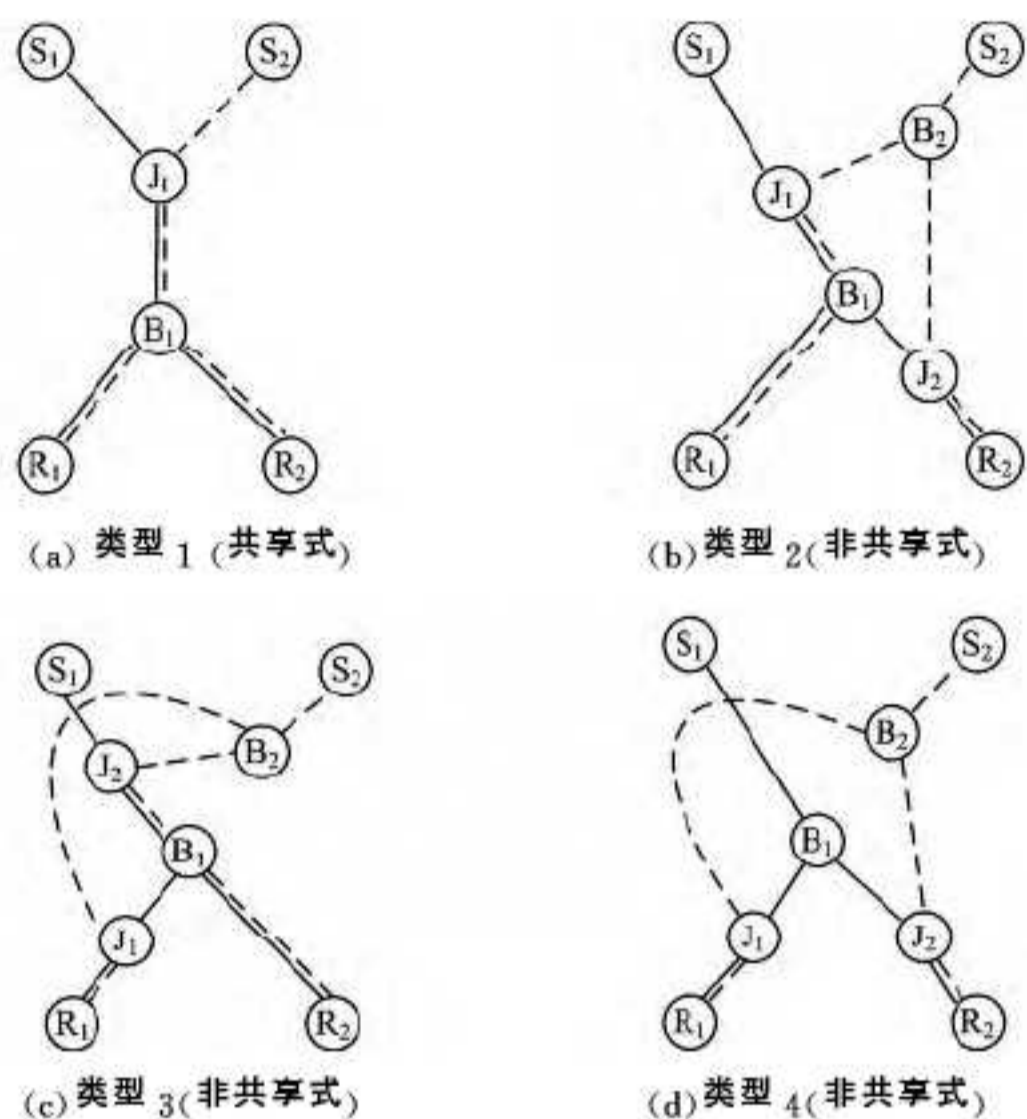


图 7 4 种基本 2-by-2 结构

从理论上讲, 多源网络拓扑层析成像能够获得更多网络的链路信息和更准确的网络拓扑信息。Rabbat 等^[29,35]率先研究了多源网络拓扑层析成像问题, 并将多源网络的拓扑层析成像问题分为拓扑分解和拓扑合并两个求解过程^[35,36], 其中拓扑分解过程是指将 M -by- N 网络拓扑分解为多个 2-by-2 拓扑, 并通过一定的测量方法和推断方法确定每个 2-by-2 拓扑的具体结构; 而拓扑合并过程是指利用拓扑合并算法依次合并所有的 2-by-2 拓扑, 从而重构原网络拓扑。但是 Rabbat 等人提出的方法只能确定某一个 2-by-2 拓扑类型是共享式或是非共享式的, 而不能进一步区分 3 种非共享式结构。为了解决 M -by- N 网络估计问题, 文献^[37-39]借鉴 Rabbat 等关于 M -by- N 网络分解、合并的思想, 提出了基于网络编码的拓扑测量及推断方法, 该算法首先利用网络编码实现 2-by-2 拓扑类型的准确区分, 然后通过合并算法重构多源网络。

(1) 基本 2-by-2 拓扑识别

下面具体解释如何利用网络编码准确地识别 2-by-2 拓扑结构。假设图 7 中的源节点 S_1, S_2 分别向接收节点 R_1, R_2 组播 x_1 和 x_2 , 中间节点执行有限域 $GF(3)$ 上的线性网络编码, 那么在 2-by-2 拓扑中 R_1, R_2 收到的数据为 x_1, x_2 的线性组合, 分别用 $R_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2$ 和 $R_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2$ 表示, 线性组合系数 $c_{ij} (i, j=1, 2)$ 均取自有限域 $GF(3)$ 。

1) 无链路丢包情形

在没有链路丢包的情形下, 源节点发送探测数据 x_1 和 x_2 , 不同类型的 2-by-2 拓扑中汇聚节点位置的不同使得 x_1 和 x_2 进行线性组合时系数不同, 最终使得不同 2-by-2 拓扑的接收节点 R_1, R_2 观测到不同的数据。通过多次探测并对比编码系数 c_{12} 和 c_{22} 的大小来确定 2-by-2 结构的类型。

2) 存在链路丢包的情形

由于链路丢包具有随机性, 无法保证数据 x_1 和 x_2 在编码节点处相遇, 因此每次测量都会产生不同的结果, 表 2 列出了网络中存在链路丢包时 4 种 2-by-2 拓扑的所有可能观测结果。这些探测数据可以划分为 3 个分组: 分组 (i) 至少有一个接收节点没有收到任何探测包; 分组 (ii) 两个接收节点观测到相同的数据, 即 $R_1 = R_2$; 分组 (iii) 两个接收节点观测到不同的数据, 即 $R_1 \neq R_2$ 。观察探测结果可以发现接收节点所观测到的数据 $R_1 = c_{11}x_1 + c_{12}x_2$ 和 $R_2 = c_{21}x_1 + c_{22}x_2$ 中 x_2 的编码系数差 $c_{12} - c_{22}$ 与网络拓扑结构相关, $c_{12} - c_{22} < 0$ 仅发生在类型 2 或类型 4 中, $c_{12} - c_{22} > 0$ 仅发生在类型 3 或类型 4 中。由于分组 (i) 的观测数据在 4 种 2-by-2 拓扑中具有普遍性, 在具体推断时忽略分组 (i) 的数据。经过 n 次测量后, 如果观测到的数据为分组 (ii) 或 (iii) 中的数据且都满足 $c_{12} - c_{22} \leq 0$, 则判定为类型 2; 如果观测到的数据为分组 (ii) 或 (iii) 中的数据且都满足 $c_{12} - c_{22} \geq 0$, 则判定为类型 3; 如果观测到的数据为分组 (ii) 或 (iii) 中的数据, 且既有 $c_{12} - c_{22} > 0$, 又有 $c_{12} - c_{22} < 0$, 则判定为类型 4; 如果经过 n 次测量后只观测到分组 (ii), 则判定为类型 1。由此可见, 与 Rabbat 等利用包的到达顺序作为度量来判断 2-by-2 拓扑结构的方法相比, 基于网络编码的拓扑推断仅需要发送少量的探测包数就可以准确地识别不同类型的 2-by-2 拓扑, 而不仅仅是判定为共享式结构或非共享式结构。

表 2 存在链路丢包时 4 种 2-by-2 拓扑的所有可能观测结果 (表中“-”表示未收到任意数据包)

#	分组	类型 1		分组	类型 2		分组	类型 3		分组	类型 4	
		R_1	R_2		R_1	R_2		R_1	R_2		R_1	R_2
1	(i)	-	-	(i)	-	-	(i)	-	-	(i)	-	-
2		-	$x_1 + x_2$		-	$x_1 + 2x_2$		$x_1 + 2x_2$	-		-	$x_1 + x_2$
3		-	x_1		-	$x_1 + x_2$		$x_1 + x_2$	-		-	x_1
4		-	x_2		-	x_1		x_1	-		-	x_2
5		$x_1 + x_2$	-		-	x_2		x_2	-		$x_1 + x_2$	-
6		x_1	-		$x_1 + x_2$	-		-	$x_1 + x_2$		x_1	-
7		x_2	-		x_1	-		-	x_1		x_2	-
8	(ii)	$x_1 + x_2$	$x_1 + x_2$		x_2	-		-	x_2	(ii)	$x_1 + x_2$	$x_1 + x_2$
9		x_1	x_1	(ii)	$x_1 + x_2$	$x_1 + x_2$	(ii)	$x_1 + x_2$	$x_1 + x_2$		x_1	x_1
10		x_2	x_2		x_1	x_1		x_1	x_1		x_2	x_2
11					x_2	x_2		x_2	x_2	(iii)	x_1	$x_1 + x_2$
12				(iii)	$x_1 + x_2$	$x_1 + 2x_2$	(iii)	$x_1 + 2x_2$	$x_1 + x_2$		$x_1 + x_2$	x_1
13					x_1	$x_1 + x_2$		$x_1 + x_2$	x_1		x_1	x_2
14					x_1	x_2		x_2	x_1		x_2	x_1
15					$x_1 + x_2$	x_2		x_2	$x_1 + x_2$		$x_1 + x_2$	x_2
16											x_2	$x_1 + x_2$

(2) M-by-N 拓扑合并算法

与 Rabbat 等的多源拓扑推断思路相同, Sattari 等^[37-39] 同样将 2-by-2 拓扑作为基础结构, 设计合并算法重建 M-by-N 网络拓扑, 并探讨了不同情形下的拓扑合并问题, 如表 3 所列。

表 3 不同场景下的拓扑合并问题

拓扑合并	已知的拓扑结构	所需探测次数
情形 1: 测量所有 2-by-2 结构	条件 1: 1-by-N 已知, 2-by-2 测量得知	$\binom{N}{2}$
	条件 2: 1-by-N 未知, 2-by-2 测量得知	$\binom{N}{2}$
情形 2: 有选择地测量 2-by-2 结构	1-by-N 已知, 部分 2-by-2 测量得知	N-1

情形 1 中的条件 1: 假设源节点 S_1 与 N 个接收节点之间的拓扑 T_{S_1} 即 1-by-N 结构, S_1 、另一源节点与任意一对接收节点间的 2-by-2 拓扑已知, 确定 2-by-2 拓扑中的汇聚节点在 T_{S_1} 上的位置, 从而在已知的树状拓扑 T_{S_1} 上加入其他源节点到各接收节点之间的拓扑。

情形 1 中的条件 2: 在任意 1-by-N 结构未知的情况下, 研究如何合并测量得到的所有 2-by-2 结构, 从而重建 M-by-N 拓扑。

情形 2: 已知 1-by-N 结构, 在进行测量时有目的地选择哪两个节点发送探测数据包, 哪两个节点作为接收节点, 而不是测量所有的 2-by-2 结构, 从而最小化为估计 M-by-N 拓扑所需要的探测次数。算法需要执行“边删除”和“边压缩”两种操作, 在进行合并时一般选择兄弟节点作为接收节点。

文献^[35,36] 提出的合并算法仅能确定汇聚节点位置的大致范围(即汇聚节点位置的上界节点和下界节点), 而基于网络编码的合并算法能够准确地推断汇聚节点相对于分支节点的位置。出现这种结果的主要原因是基于 NT 的拓扑推断只能确定 2-by-2 结构是共享式的或是非共享式的, 而基于 NC 的拓扑推断却能够准确地区分不同类型的 2-by-2 拓扑, 这恰恰为拓扑合并过程提供了很好的保证。

3.2 被动拓扑层析成像问题

与主动拓扑探测不同, 基于网络编码的被动式拓扑层析成像不需要主动向待测网络发送探测包, 而是在网络端点处收集待测网络中已有的网络编码信息, 然后利用编码向量或由编码向量张成的子空间性质与网络拓扑间的关系推断出最终网络拓扑。

3.2.1 无网络错误时的拓扑层析

随机线性网络编码(RLNC)^[40] 是一种分布式网络编码方案, 在每一个数据包的包头都会追加一个编码向量以记录数据包在传输过程中所经历的编码操作。对于不同的网络拓扑, 编码向量所经历的编码操作与网络结构密切相关, Ho 等^[41] 的研究表明在足够大的有限域上, 编码向量可以用作区分不同网络拓扑的标志。

定理 1^[42] 对于具有至多 $|V|$ 个节点、至多 $|E|$ 条链路的单播网络, 如果所有局部编码向量都是在有限域 $GF(q)$ 上独立随机取值的, 那么不同网络拓扑结构具有不同转移矩阵的概率至少为

$$1 - |V|^{4|E|} (1 - (1 - 1/q)^{|V|}) \quad (1)$$

定理 1 表明当网络具有强连通性且有限域足够大时, 不同转移矩阵 T 以较高的概率对应于不同网络拓扑结构。基于此, Sharma 等^[42] 对随机线性网络编码算法^[40,41] 中接收节

点的操作进行了改进, 使得接收节点在进行网络译码的同时推断出满足网络传输的转移矩阵。这样, 在不需额外消耗网络资源的情况下, 接收节点就可以利用观测到的转移矩阵确定网络的拓扑结构。他们还进一步指出网络中的每一个节点都可以利用输入边上传的数据包包头信息判断其上游节点的数量和连接状况, 从而实现其上游拓扑的被动估计。

3.2.2 存在网络错误时的拓扑层析

网络中出现的敌方攻击或随机错误等网络错误会影响网络的拓扑推断过程, 因此 Yao 等^[43,44] 将 Sharma 等提出的基于 RLNC 的被动式拓扑层析延伸到差错控制网络, 深入地研究了存在网络错误时的网络拓扑估计问题。他们在假定所有中间节点都知道自己周围的一跳邻居节点, 而且网络中的所有节点公共随机性(common randomness)的条件下, 提出了相应的被动式网络拓扑推断方法。

(1) 存在随机错误时的拓扑推断问题

针对存在随机错误时的拓扑推断, 文献^[43,44] 提出了基于随机线性网络编码(RLNC)的多项式时间算法, 推断算法包括 FIND-IRV 和 FIND-TOPO 两个过程。

1) FIND-IRV: 在 t 次成功的通信过程中, 对于每一个 $i \in [1, t]$, 接收节点 r 利用接收到的 $Y(i)$ 及网络纠错码计算消息矩阵 $M(i)$ 以及差错矩阵 $E(i)_r = Y(i)_m - Y(i)_h M(i)$, 其中 $Y(i)_m$ 由 $Y(i)$ 的前 C 列构成, $Y(i)_h$ 由 $Y(i)$ 的后 $n-C$ 列构成。对于任意 $i, j \in [1, t], i \neq j$, 如果 $\text{rank}(E(i)_r \cap E(j)_r) = 1$, 则将 $E(i)_r \cap E(j)_r$ 加入到冲击响应向量集 I_{IRV} 中;

2) FIND-TOPO: 利用随机码本 $R = \{R_v, v \in V\}$ 以及 1) 中得到的 I_{IRV} 估计网络拓扑。

(2) 存在网络攻击错误时的拓扑推断问题

文献^[42] 还对网络拜占庭攻击下的网络拓扑识别问题进行了一定的研究, 并指出只要网络具有充分的连通性, 即使存在拜占庭攻击也可以利用网络纠错码可靠地推断出正确的拓扑结构, 但是文献^[42] 提出的方法需要节点在通信过程中主动增加一定的冗余信息。而 Yao 等^[43,44] 针对网络攻击错误下的拓扑推断问题提出了一种被动推断算法, 假设当存在网络攻击错误时被测网络的接收节点观测到的转移矩阵为 T_e , 他们指出接收节点可以根据矩阵的秩距离标准找到与 T_e 最接近的转移矩阵 $T(G)$, 如果秩距离 $r(T_e - T(G))$ 小于或等于网络中的攻击错误数目 z , 那么就将 $T(G)$ 所对应的网络拓扑 G 判定为被测网络的拓扑结构。

3.2.3 基于 RLNC 子空间性质的拓扑层析

在随机线性网络编码中, 编码向量记录数据包所经历的编码操作, 文献^[45,46] 指出每个网络节点观测到的编码向量所构成的子空间与网络拓扑结构有着明确的对应关系。

定理 2^[45] (针对深度为 D 的树状拓扑) 设树的深度为 D , 每一条边的容量均为 c , 子空间维数为 m 。当中间节点接收到的向量张成的子空间的维数为 m 时才向后继节点转发。时刻 $t((D-1)m \leq t \leq n/c)$ 时网络的静态全局快照(即 t 时刻节点所观测到的所有子空间)唯一确定树状网络拓扑结构当且仅当

$$c+1 \leq m \quad (2)$$

定理 3^[45] (针对一般的网络拓扑) 网络中的节点执行随机线性网络编码操作, 当 q 远远大于 1 时, 能够以较高的概率唯一识别网络拓扑结构的充分条件是对于某一时刻 t , 有:

$$\prod_i(t) \neq \prod_j(t), \forall i, j \in V, i \neq j \quad (3)$$

其中, $\Pi_i(t)$ 为节点 i 在时刻 t 观测到的子空间。基于此, 可以通过节点在两个连续时刻观测到的子空间来实现拓扑推断。

定理 2 和定理 3 给出了节点观测到的子空间与网络拓扑结构之间的关系, 而且不同的子空间以较高的概率对应于不同的网络拓扑结构, 因此可以利用节点观测到的子空间推断网络的拓扑结构。Koetter 等^[47]提出的子空间编码将待发送的信息用有限域上的线性子空间表示, 源节点向网络中发送消息所对应的子空间的基向量。子空间编码巧妙地利用 RLNC 的子空间保持特性进行网络纠错, 因此本节提到的拓扑推断思想同样适用于采用子空间编码的网络。

3.3 拓扑推断的对偶问题

网络故障定位或拜占庭攻击位置定位问题被称为网络拓扑推断的对偶问题或反问题。

网络层析成像问题的数学模型^[9]可以简化为线性模型 $Y=AX$, 其中 Y 为在边缘节点处观测到的端到端测量结果, A 为路由矩阵, 能够反映出被测网络的拓扑结构, X 为参数向量, 主要为与时间相关的测量参数, 如平均时延、排队时延等。对于大多数网络, 边缘节点的数目远小于网络内部链路的数目, 因此在利用 NT 监控网络内部链路状态时会出现链路可辨识性问题, 难以推断网络的链路状态。网络编码在网络拓扑推断中的应用能够提高网络链路的可辨识性, 这是因为在基于网络编码的方案中, 编码向量所记录的编码操作不但与网络结构密切相关, 而且与网络的工作状态有关。网络中出现的链路故障或链路丢包会对接收节点观测到的编码向量或数据包造成不同的影响。基于这一思想, 文献^[48, 49]指出可以利用网络编码实现网络链路状态的监控。Ho 等^[48]指出通过在接收节点处观测随机网络编码的编码向量可以区分网络中的各种错误模式, 但他们并没有考虑网络识别问题。为了利用网络编码实现故障链路的定位, Firooz 等^[49, 50]利用线性网络编码研究了不同链路故障对接收节点观测到的数据包的影响, 并证明了存在线性网络编码方案, 使得接收节点能够根据观测到的数据包内容推断出故障链路的位置。Firooz 等通过网络编码系数以及训练序列的合理选取保证在不同链路故障下接收节点观测到不同的数据包, 如例 2 所示。

例 2 在图 8 所示的网络 G 中, 源节点 s 到接收节点 r 的路径有 3 条, 分别为 $P_1 = \{e_1, e_4\}$, $P_2 = \{e_1, e_3, e_5\}$, $P_3 = \{e_2, e_5\}$ 。节点执行 $GF(2^2)$ 上的线性网络编码操作, 每条链路上的数字表示取自 $GF(2^2)$ 上的局部编码系数, 源节点 s 向 r 发送 $GF(2^2)$ 上的数据 a_1, a_2 , 那么图 8 中, r 接收到的数据为

$$y = a_1(1 \times 1 + 1 \times 2 \times 2) + a_2(3 \times 2) = 2a_1 + a_2$$

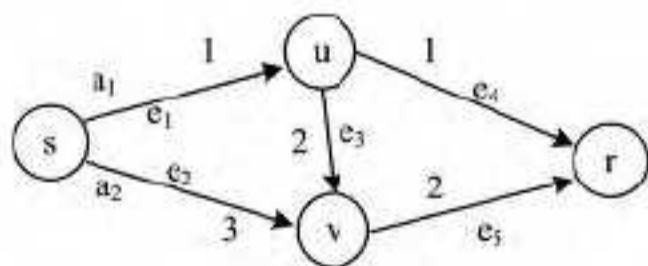


图 8 利用线性网络编码定位故障链路

训练序列的第 i 行是由源节点 s 在第 i 个时隙发送到不同 $s-r$ 路径上的数据构成的, 在例 2 中, 假设在第一个时隙 s 发送 $a_1 = 1, a_2 = 2$; 在第 2 个时隙 s 发送 $a_1 = 3, a_2 = 3$ 时, 可以得到训练序列 A 为 $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}$, 那么当网络中所有链路状态正常时, r 接收到的数据为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}}_{\text{训练序列 } A} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}$$

其中, $\beta(G)$ 中的每一个元素 ^{$\beta(G)$} 等于对应路径上所有链路的编码系数的乘积(如对于路径 P_2 , $\beta_2(G) = 1 \times 2 \times 2 = 3$)。当链路 e_1 发生故障时, $\beta_1(G) = \beta_2(G) = 0, \beta_3(G) = 3 \times 2 = 1$, 此时 r 收到的数据为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix}}_{\text{训练序列 } A} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

同理, 可以得到网络中单条链路故障时, r 观测到的不同的数据, 如表 4 所列。因此, 接收节点 r 就可以根据接收到的数据判断出究竟是哪条链路发生了故障, 比如 r 接收到 $\{2, 3\}$ 时就可以断定链路 e_1 出现故障。

表 4 单条链路出现故障时接收节点观测到的数据

故障链路	无	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
第 1 个时隙	0	2	2	3	1	1
第 2 个时隙	2	3	1	0	1	3

另外, 随机线性网络编码的子空间与网络拓扑结构之间的对应关系还能够被应用于网络瓶颈发现和拜占庭攻击定位等问题的研究中^[45, 46, 51, 52]。

4 研究展望

目前研究人员从不同视角对结合网络编码的拓扑层析进行了深入的研究, 并取得了一定的研究成果, 但是网络编码在拓扑推断中的应用仍然还有很多问题有待探讨。

1) 2-by-2 拓扑的共享式和非共享式结构包含了大量的网络拓扑信息, 充分挖掘并利用 2-by-2 结构提供的拓扑信息对于提高多源网络层析成像的可辨识性大有裨益, 然而目前提出的基于网络编码的拓扑推断把本文提到的 4 种 2-by-2 拓扑作为基本结构, 而并没有考虑^[53]提出的另外两种不同的 2-by-2 拓扑, 因此 2-by-2 拓扑问题仍然是一个值得探讨的开放性问题。2) 针对多源网络层析成像问题所提出的合并算法虽然能够确定汇聚节点相对于分支节点的位置, 但当网络同一层中存在多个汇聚节点时, 合并算法不能确定这些汇聚节点的准确位置, 因此仍然需要探索新的推断方法。3) 针对网络成员动态加入或退出造成网络拓扑动态变化这一问题, 文献^[54]研究了结合网络编码的动态网络拓扑层析方法, 这一方面的研究工作仍然有待进一步的探索。4) 利用网络编码实现链路故障检测、定位和网络瓶颈发现是一个颇具前景的发展方向。5) 无论是基于 NT 的拓扑推断, 还是基于 NC 的拓扑推断实现的是逻辑拓扑结构的推断, 探寻能够实现真实物理拓扑结构估计的方法仍然是值得思考的问题。

结束语 作为一项新的信息处理技术, 网络编码突破了传统路由技术对节点行为的限制, 同时编码数据包与网络拓扑结构之间的紧密联系构成了网络编码在网络拓扑推断中的应用基础。本文讨论了基于网络编码的拓扑推断, 具体针对基于 NC 的主动拓扑层析、基于 NC 的被动拓扑层析以及拓扑推断的对偶问题这 3 个方面进行了介绍。与基于网络层析成像的拓扑推断相比, 基于网络编码的拓扑推断充分利用网络编码的优势, 避免了大量的统计分析, 在推断准确性、

推断算法复杂度等方面都有较大的优势。最后,本文对该技术的未来研究方向进行了探讨。

参 考 文 献

- [1] Lowekamp B, O'Hallaron D R, Gross T. Topology discovery for large Ethernet networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2001, 31(4): 237-248
- [2] Breitbart Y, Garofalakis M, Martin C. Topology discovery in heterogeneous networks [C] // Proceedings of IEEE, INFOCOM' 00. 2000: 265-274
- [3] Cheswick B, Burch H, Branigan S. Mapping and visualizing the Internet [C] // Proc of the USENIX Annual Technical Conference. San Diego, CA, 2000
- [4] Donnet B, Raouf P, Friedman T, et al. Deployment of an Algorithm for Large-Scale Topology Discovery [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(12): 2210-2220
- [5] Huffaker B, Plummer D, Moore D, et al. Topology discovery by active probing [C] // Proceedings. Symposium on Applications and the Internet (SAINT) Workshops, 2002. IEEE, 2002: 90-96
- [6] Spring N, Mahajan R, Wetherall D, et al. Measuring ISP topologies with rocketfuel [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(1): 2-16
- [7] Andersen D G, Feamster N, Bauer S, et al. Topology inference from BGP routing dynamics [C] // Proceeding of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement ACM, 2002: 234-248
- [8] Vardi Y. Network tomography: estimating source-destination traffic intensities from link data [J]. Journal of the American statistical association, 1996, 91(433): 365-377
- [9] Castro R, Coates M, Liang G, et al. Network tomography: recent developments [J]. Statistical Science, 2004, 19(3): 499-517
- [10] 赵洪华, 陈鸣. 基于网络层析成像技术的拓扑推断 [J]. 软件学报, 2010, 21(1): 133-146
- [11] Duffield N, Horowitz J, Presti F L, et al. Multicast topology inference from end-to-end measurements [C] // Proc. of the ITC Seminar on IP Traffic, Measurement and Modeling. Monterey, 2000: 1-10
- [12] Castro R, Coates M, Nowak R, et al. Likelihood based hierarchical clustering [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(8): 2308-2321
- [13] Shih M F, Hero A O. Hierarchical inference of unicast network topologies based on end to end measurements [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 1708-1718
- [14] Coates M, Castro R, Nowak R. Maximum likelihood network topology identification from edge based unicast measurements [J]. SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2002, 30(1): 11-20
- [15] Yeung R W, Li S Y R, Cai N, et al. Network Coding Theory [M]. Foundations and Trends in Communications and Information Theory, Now Publishers Inc, 2006
- [16] Ho T, Lun D S. Network Coding: An Introduction [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008
- [17] Yeung R W. Information Theory and Network Coding [M]. New York, Springer Science & Business Media, 2008
- [18] Fragouli C, Soljanin E. Network Coding Applications [J]. Foundations and Trends in Networking, 2007, 2(2): 136-269
- [19] Dimakis A G, Ramchandram K, Wu Y, et al. A survey on network codes for distributed storage [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(3): 476-489
- [20] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [21] Fragouli C, Markopoulou A. A network coding approach to overlay network monitoring [C] // Proceedings of the 43rd Allerton Conference of Communication, Control and Computing. 2005: 774-783
- [22] Fragouli C, Markopoulou A, Srinivasan R, et al. Network monitoring: It depends on your points of view [C] // Proceedings of the ITA Workshop. San Diego, CA, USA, January 2007
- [23] Gjoka M, Fragouli C, Sattari P, et al. Loss tomography in general topologies with network coding [C] // Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2007). Washington DC, USA, Nov 2007: 381-386
- [24] Lin Y, Liang B, Li B. Passive loss inference in wireless sensor networks based on network coding [C] // INFOCOM 2009. IEEE, 2009: 1809-1817
- [25] Shah-Mansouri V, Wong V W. Link loss inference in wireless sensor networks with randomized network coding [C] // Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010). IEEE, Dec 2010: 1-6
- [26] Gui J, Shah-Mansouri V, Wong V W. A linear algebraic approach for loss tomography in mesh topologies using network coding [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2010). South Africa, May 2010: 1-6
- [27] Qin P, Dai B, Wu K, et al. Dce: A novel delay correlation measurement for tomography with passive realization [OL]. <http://arxiv.org/abs/1307.5085>, July 2013: 1-5
- [28] Qin P, Dai B, Huang B, et al. A Survey on Network Tomography with Network Coding [J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2014, 16(4): 1981-1995
- [29] Rabbat M, Coates M, Nowak R. Multiple source Internet tomography [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(12): 2221-2234
- [30] Fragouli C, Markopoulou A, Diggavi S N. Topology inference using network coding [C] // Proceedings of the 44th Allerton Conference on Communication, Control and Computing. 2006
- [31] Tang Dong-ming, Lu Xian-liang, Li Ju-guang. An Improved Topology Inference Algorithm via Network Coding [J]. Journal of Information and Computational Science, 2012, 9(17): 5111-5118
- [32] 唐东明, 卢显良, 李驹光. 网络编码在拓扑推断中的应用研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11): 960-965
- [33] 唐东明. 网络编码关键问题研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013
- [34] Jithin R, Dey B K. Exact topology inference for DAGs using network coding [C] // 2012 International Symposium on Network Coding (NetCod). 2012: 73-78
- [35] Rabbat M, Nowak R, Coates M. Multiple source multiple destination network tomography [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM. Hong Kong, 2004: 1628-1639
- [36] Coates M, Rabbat M, Nowak R. Merging logical topologies using end-to-end measurements [C] // Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. 2003: 192-203

(下转第 264 页)

网络生存期内成功的路由请求数目,如表 3 所列。

表 3 两种路由协议在网络生存期内成功的路由请求数目

	基于 Max-Min 模型的路由协议	基于 Min 模型的路由协议
网络生存期内成功的路由请求数目(个)	480	164

从表 3 可以看出在网络生存期内,基于 Max-Min 模型的路由协议成功的路由请求数目明显多于基于 Min 模型的路由协议。因此,基于 Max-Min 模型的路由协议要优于基于 Min 模型的路由协议。

结束语 本文在分析国内外 WBAN 能效路由协议的基础上,提出一个基于多径路由协议和 Max-Min 模型的能效路由协议,该协议能够均衡网络中节点的能耗,延长网络生存时间,然后从理论上验证了该路由协议的完整性和正确性;最后通过 MATLAB 对该路由协议进行仿真,并与基于 Min 模型的路由协议进行对比,结果表明,基于 Max-Min 模型的路由协议相对于基于 Min 模型的路由协议来说,能够更好地延长网络生存时间。

参 考 文 献

[1] Ullah S, Higgins H, Braem B, et al. A Comprehensive Survey of Wireless Body Area Networks: On PHY, MAC, and Network Layers Solutions [J]. *Journal of Medical Systems*, IN PRESS, 2010, 36

[2] Latr'e B, Braem B, Moerman I, et al. A Survey on Wireless Body Area Networks [J]. *Wireless Network*, 2010

[3] 王颖. 基于能效均衡的 WSN 多径路由算法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013

[4] Culpepper J, Dung L, Moh M. Hybrid Indirect Transmission (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks with biomedical applications [C] // Proc. IEEE 18th Annu. Workshop on Computer Communications. 2003

[5] Kim K, Lee I S, Yoon M, et al. An efficient routing protocol based on position information in mobile wireless body area sensor networks [C] // Proc. 1st Int. Conf. on Networks and Communications. 2009

[6] 陈良文, 李敬兆. 无线传感器网络多径路由机制研究 [J]. *云南民族大学学报(自然科学版)*, 2014, 23(3): 208-212

[7] 王小永. WSN 中基于最大最小化的优化路由算法 [J]. *工矿自动化*, 2011(12): 34-39

[8] Mounsla H, Touati N, Salem O. et al. A Min-Max multi-commodity flow model for Wireless Body Area Networks routing [J]. *IEEE CCNC*, 2012(1): 424-428

[9] 刘汉春, 刘静, 徐友云, 等. 基于临时节点的无线体域网高效节能路由算法 [J]. *信息科技*, 2010(6): 1-5

[10] 何尚录, 白利华. 解一类最大值最小化问题的线性规划方法 [J]. *兰州铁道学院学报*, 1997, 16(3): 83-86

[11] 董荣胜, 马争先, 郭云川, 等. 一种基于马尔科夫博弈的能量均衡路由算法 [J]. *计算机学报*, 2013, 36(7): 1500-1508

(上接第 248 页)

[37] Sattari P, Markopoulou A, Fragouli C. Multiple source multiple destination topology inference using network coding [C] // NetCod'09 Workshop on Network Coding, Theory and Applications. 2009: 36-41

[38] Sattari P, Fragouli C, Markopoulou A. Active topology inference using network coding [J]. *Physical Communication*, 2012, 6(5): 142-163

[39] Sattari P. Network coding for network tomography [D]. University of California, 2012

[40] Ho T, Koetter R, Medard M, et al. The Benefits of Coding over Routing in a Randomized Setting [C] // ISIT. 2003

[41] Ho T, Medard M, Koetter R, et al. A Random Linear Network Coding Approach to Multicast [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 52(10): 4413-4430

[42] Sharma G, Jaggi S, Dey B K. Network tomography via network coding [C] // Proceedings of the Information Theory and Applications Workshop 2008. San Diego, CA, USA, February 2008: 151-157

[43] Yao H, Jaggi S, Chen M. Network coding tomography for network failures [C] // INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE. San Diego, CA, USA, March 2010: 1-5

[44] Yao H, Jaggi S, Chen M. Passive network tomography for erroneous networks: A network coding approach [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(9): 5922-5940

[45] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S. Subspace properties of randomized network coding [C] // 2007 IEEE Information Theory Workshop Information Theory for Wireless Networks. 2007:

1-5

[46] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S. Subspace Properties of Network Coding and their Applications [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(5): 2599-2619

[47] Koetter R, Kschischang F. Coding for errors and erasures in random network coding [J]. *IEEE Transactions Information Theory*, 2008, 54(8): 3579-3591

[48] Ho T, Leong B, Chang Y, et al. Network monitoring in multicast networks using network coding [C] // Proc. of IEEE ISIT. 2005: 1977-1981

[49] Firooz M H, Roy S, Bai L, et al. Link status monitoring using network coding [R]. UW Technical Report, Sept 2009

[50] Firooz M H, Roy S, Bai L, et al. Link Failure Monitoring via Network Coding [C] // 2010 IEEE 35th IEEE Conference on Local Computer Networks. 2010: 1068-1075

[51] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S, et al. Bottleneck discovery and overlay management in network coded peer-to-peer systems [C] // Proceedings of the 2007 SIGCOMM Workshop on Internet Network Management ACM. Aug. 2007: 293-298

[52] Siavoshani M J, Fragouli C, Diggavi S. On locating byzantine attackers [C] // Fourth Workshop on Network Coding Theory and Applications, 2008 (NetCod 2008). 2008: 1-6

[53] Duan Q, Cai W, Tian G. A simple graph-structure network tomography topology identification method [C] // Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2009). Hainan Island, China, April 2009: 337-340

[54] 戴斌, 秦鹏, 等. 基于网络编码的被动式动态网络拓扑层析方法, CN201110254234. 5 [P]