

# 中国 AS 级拓扑测量与分析

张 宇 方滨兴 张宏莉

(哈尔滨工业大学计算机网络与信息安全技术研究中心 哈尔滨 150001)

**摘 要** 为描绘中国自治域(Autonomous Systems, AS)级拓扑图景,文中运用综合集成的思想来考察不同拓扑数据之间在数据本身和统计特征上的差异.首先,采用基于 BGP、基于 traceroute 和基于 IRR 的方法从不同数据源获取了拓扑快照和十年间历史.其次,对快照进行基于集合运算的分组比较,并得到了一幅较完整可信的图.接着,从生灭过程角度,分析三类增长机制,指出了‘灭’过程的缺失.然后,运用复杂网络特征化方法,比较了三幅图的特征及显著性,发现平均度主导了多数差异,并指出有关 Rich-Club 现象的争议根源之一在于数据差异.最后,给出了特征演化的四点观察,包括相关模型中未能重演的平均度增长现象.

**关键词** 拓扑测量;拓扑建模;拓扑演化;复杂网络;自治域;综合集成

**中图法分类号** TP393

## Chinese AS-Level Topology Measurement and Analysis

ZHANG Yu FANG Bin-Xing ZHANG Hong-Li

(Research Center of Computer Network and Information Security Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** To describe the prospect of Chinese autonomous system (AS) level topology, the authors adopt the meta-synthetic methodology to investigate the differences of topology data in themselves and their statistical characterization. Firstly, the topology snapshots and ten-year history are collected from various data sources with the BGP-, traceroute- and IRR-based methods. Secondly, topology snapshots are compared by groups with set operations, and a relatively complete and credible Chinese AS graph is obtained. Three growth mechanisms are analyzed from the view of the birth-death progress. The miss of death progress in related models is pointed out. Then, the topological characteristics and their significances of three typical snapshots are compared with complex network characterization methodologies. The fact that the average degree can determine most of discrepancies is discovered. Finally, four observations on the evolution of topological characteristics are presented, including the phenomenon of average degree growth which wasn't replayed by related models.

**Keywords** topology measurement; topology modeling; topology evolution; complex network; autonomous system; meta-synthetic

## 1 引 言

Internet 宏观结构可被抽象为一幅以自治域

(Autonomous Systems, AS)为点,域际互连关系为边的图. AS 级拓扑测量与分析作为一项互网络基础研究,旨在寻找这幅包含 Internet 结构信息的图并探索其内在规律,从而预测网络结构与技术、政策、经

济之间的互动. 本文以展现中国网络结构的宏观图景为目标, 探讨当前研究中存在的 3 个关键问题:

(1) 测量技术与数据源的多样性改善了完整性问题, 但尚未解决, 同时又增加了提高准确性的难度. 相关问题包括基于 traceroute 测量的失真<sup>[1]</sup>、基于 BGP(Border Gateway Protocol)测量的时间窗选择<sup>[2-3]</sup>、基于 IRR(Internet Routing Registry)测量的可信验证<sup>[2-3]</sup>以及演化拓扑的‘存活性’<sup>[4]</sup>. 目前所达成的一个共识是: AS 级拓扑都只是“推测的”.

(2) 测量数据的差异导致在拓扑特征化上的争议, 这阻碍了复杂网络特征化框架的建立. 例如, 文献[5]指出, 发现度分布幂律<sup>[6]</sup>时所用的 AS 图丢失了 20%~50% 的链接, 而更完整拓扑的度分布并不严格服从幂律. 最近, Colizza 等<sup>[7]</sup>和 Zhou<sup>[8]</sup>就 AS 级拓扑是否具有 RC(Rich-Club)现象展开了争论, 而此现象是 Zhou 等<sup>[9]</sup>提出的 PFP(Positive-Feedback Preference)模型的基础之一.

(3) 尽管现有拓扑演化模型能够再生部分图论特征, 但还无法重现演化过程. 多项工作<sup>[4-5, 10-11]</sup>相继指出 BA(Barabási-Albert)模型<sup>[12]</sup>与观测的历史有较大差异. 一些改进模型, 例如 GLP(Generalized Linear Preference)模型<sup>[11]</sup>和 PFP 模型<sup>[9]</sup>, 虽然引入了新的增长机制, 但与实际历史的匹配程度还有待考察.

我们认为上述问题的症结在于两点: 一是在研究内容上, 对数据间的差异认识不足. 数据在横向上有不同来源的快照, 纵向上有不同时期的历史; 差异

既存在于数据本身, 也存在于统计特征; 二是在研究方法上, 以往工作中缺乏综合, 大多是采用单一方法的测量, 对单一度量的分析, 或在单一快照上对模型验证. 为此, 本文将采用复杂巨系统研究中的综合集成(meta-synthetic)方法论<sup>[13]</sup>, 其关键思想之一在于将各方面的研究综合起来, 在以往彼此孤立的工作之间建立联系. 具体到本文是将各种测量数据和分析方法综合起来, 通过寻找数据间的差异来建立联系. 首先, 采用不同测量方法和数据源来收集拓扑快照与历史; 然后, 通过基于集合运算的分组比较来考察数据本身的差异, 通过观察历史上的生灭过程来验证增长机制; 最后, 运用复杂网络特征化方法分析统计特征及其显著性的差异与演化.

## 2 拓扑测量

### 2.1 快照测量

采用 3 种测量技术得到了 19 幅中国 AS 级拓扑快照, 每幅图按“源-方法”格式来命名, 见表 1.

(1) 基于 BGP 方法. 从 BGP 路由表或更新消息的 AS\_path 条目中提取数据. 主要数据源是 BGP 路由采集器项目, 包括 RouteViews, RIS 和 BGPView. BeyondBGP 项目<sup>[3]</sup>收集上述项目数据, 还收集 IRR 数据, 但其中未包括 APNIC, 所以其中国部分是单纯基于 BGP 的. 从三个采集器项目中各提取了一幅基于路由表的图和一幅基于更新消息的图. 同时, 收集 BeyondBGP 的一幅图, 为与 ZZZ-PTR

表 1 中国 AS 级拓扑快照

名称	点	边	c2p	p2p	日期	源	链接
RV-TB	119	185	179	6	2004-12-18~21	Oregon	www. routeviews. org
RV-UD	126	230	213	17	2004-11-01~12-21	RouteViews	
RIS-TB	118	182	176	6	2004-12-18~21	RIPE NCC	www. ripe. net/ projects/ris/
RIS-UD	130	231	208	23	2004-11-01~12-21	RIS	
CE-TB	121	176	164	12	2004-12-18~21	CERNET	bgpview. 6test. edu. cn
CE-UD	129	228	206	22	2004-11-01~12-21	BGPView	
B04-MAP	126	233	215	18	2004-11-01~12-21	Beyond BGP	www. beyondbgp. net
B05-MAP	129	257	239	18	2005-03-15~05-10		
ZZZ-PTR	84	211	187	24	2005-05-01~05-10	文献[16]	-
S04-PTR	33	41	37	4	2004-12-18~21	CAIDA skitter	www. caida. org
S04-ITR	65	130	118	12	2004-12-18~21		
S05-PTR	29	35	29	6	2005-05-01~05-10		
D04-PTR	87	170	157	13	2004-12-10~31	DIMES	www. netdimes. org
D04-ITR	63	66	58	8	2004-12-10~31		
D05-PTR	96	229	196	33	2005-04-25~05-15	Fastrace	-
FT-ITR	92	306	259	47	2004-12-18~21		
AP-RR	22	17	14	3	2004-10-01~12-21	APNIC	ftp. apnic. net
3C-MAP	131	241	218	23	-	-	-
CN-MAP	134	305	270	35	-	-	-

注: ‘-TB’基于 BGP 路由表; ‘-UD’基于 BGP 更新消息; ‘-ITR’基于 traceroute 的 IP 级数据; ‘-PTR’基于 traceroute 的发布; ‘-RR’基于 IRR; ‘-MAP’由多幅图合成.

比较,还提取了 5 个月后的数据. 更新消息的采纳时间参照文献[2-3]为最近两个月.

(2) 基于 traceroute 方法. 采用 IP 级测量发现从监测点到目标的一组顺序相连路由器的接口 IP 地址,再通过 BGP 路由表中源 AS-前缀对将 IP 地址映射到 AS 号. 此方法主动发现数据包经过的‘实际’路径,而非路由表中的‘计划’路径. 长期测量项目包括拥有 20 余个专用监测点的 skitter<sup>[14]</sup>和由上千台志愿主机参与的 DIMES<sup>[15]</sup>. 从中各提取三幅快照:直接从 IP 级测量数据中提取的、同期发布的以及 5 个月后发布的. 我们也从 12 个国内监测点使用工具 fastrace 测量了 128 万个目标,发现 IP 级节点(边)数 8.2 万(13.3 万)是同期 skitter 的 5 倍(4 倍),DIMES 的 37 倍(49 倍). 5 个月后,Zhou 等<sup>[16]</sup>从 6 个国内监测点测量了 0.74 万个目标.

(3) 基于 IRR 方法. 从路由策略注册数据库中提取数据. 与前两类基于‘机器’的方法不同,其信息由人们自愿填写. 文献[2-3]提出一组启发式规则以确认一条注册记录是可信的,简要归纳为:该记录中的 AS 出现在 BGP 数据中,且边同时出现在该边两端的 AS 记录中. 在 APNIC 的 153 条注册记录中共含 154 个点和 312 条边,其中只有 6 条边满足上述规则. 我们认为更新时间较新的记录也是可信的,并提取了最近一季度内的更新记录.

2.2 历史测量

获取拓扑历史要面对完整性与准确性的两难,即判断点与边的出现或消失是源自实际拓扑变化,还是临时路由变化. 文献[4]提出‘存活性’问题并根

据变化持续时间采纳后验置信度大于 0.9 的变化. 为明确结论,本文采用一种非后验的完整性最大化方法:采纳‘一旦出现’和‘永久消失’的信息. 下节列出了十年来中国 AS 级拓扑历史,来源于两处基于 BGP 的数据:1997~2001 年间的来自于 NLANR 发布的 RouteViews 路由表快照(此时期唯一的数据源);2002~2007 年间的来自于 BeyondBGP. 未采用其他方法的原因在于,基于 traceroute 的历史积累较基于 BGP 的短,且一致性较弱(见 3.1 节),而基于 IRR 的可信性尚存在问题.

此外,为了考察经济因素对拓扑的影响,根据文献[17]的方法和数据对中国 AS 间互连关系进行了推测. 互连关系大致分为两类:客户-提供商(c2p)和对等(p2p). 表 1~表 3 显示 c2p 作为主流关系构造了网络的层次性.

3 基于集合运算的比较

3.1 快照比较

本节基于集合运算对快照进行 7 组比较,并从两个方面进行经验性的定性评价:完整性,即发现拓扑的规模;一致性,即不同数据间的相似程度,分高/中/低(H/M/L)三级,结果见表 2. AP-RR 规模小,未做比较.

(1) ‘-UD’与‘-TB’. 比较说明基于路由表的测量至少丢失 10%的边. 前者包含后者意味着路由表中每条链接都在两个月内被更新过. 因此,‘-UD’图是采集器的完整视图.

表 2 基于集合运算的快照比较												
	图 X	图 Y	图 X-Y				图 Y-X				完整性	一致性
			点	边	c2p	p2p	点	边	c2p	p2p		
1	* -UD	* -TB	8	31	21	10	0	0	0	0	M	M
2	RV-TB	RIS-TB	1	3	3	0	0	0	0	0	H	H
	RIS-UD	RV-UD	2	10	4	6	0	9	9	0	H	H
3	RV/RIS-TB	CE-TB	2	34	33	1	4	25	18	7	M	M
	RV/RIS-UD	CE-UD	2	13	12	1	1	1	1	0	H	H
4	S04-ITR	S04-PTR	32	98	89	9	0	9	8	1	M	L
	D04-ITR	D04-PTR	4	6	6	0	41	110	105	5	M	L
5	FT-ITR	S04-ITR	27	190	155	35	0	14	14	0	H	L
	FT-ITR	D04-ITR	46	245	206	39	4	5	5	0	H	L
	S04-ITR	D04-ITR	24	78	73	5	9	14	13	1	M	L
6	FT-ITR	ZZZ-PTR	19	152	124	28	11	57	52	5	H	L
	D04-PTR	D05-PTR	6	43	41	2	15	102	80	22	H	L
	B04-MAP	B05-MAP	5	22	18	4	9	46	42	4	H	M
7	B04-MAP	FT-ITR	34	85	79	6	0	158	123	35	H	L
	B04-MAP	D04-PTR	39	116	103	13	0	53	45	8	H	L
	B04-MAP	S04-PTR	98	240	235	15	1	24	23	1	H	L
	B05-MAP	ZZZ-PTR	46	118	111	7	0	72	59	13	H	L

(2) ‘外部’之间. RouteViews 和 RIS 的对等体都不属于中国,称其提供‘外部’视图;国内 BGPView 则提供‘内部’视图. ‘外部’视图差异不大,原因在于大多数国外 AS 都是通过少数国内顶级 AS 进入国内的,这意味着就‘外部’视图来说,现有数据较充分.

(3) ‘外部’与‘内部’. 在‘-TB’图上比在‘-UD’图上呈现更明显的差异,说明内外更新消息已相互传递,但未被全部采纳进路由表. 对于‘-TB’图,‘内部’独自包含的(未被‘外部’采纳的)25 条边中,20 条是与 CERNET 相关的. 原因在于‘外部’路由表只采纳从国外分别进入 CERNET 和其他国内 ISP 的路径,而不会采纳 CERNET 与国内其他 ISP 之间的链接. 同样,CERNET 的路由表也未采纳其他国内 ISP 之间的部分链接.

(4) ‘-ITR’与‘-PTR’. skitter 的前者规模明显大于后者;DIMES 的情况相反. 显然,处理方法差异或许导致边丢失,但不会导致点丢失,进一步发现 S04-PTR 中丢失的 AS 多为最近新分配的以及属于 CERNET 的,从而推测 S04-PTR 未使用最近的路由表. 考虑到 DIMES 按月发布数据中只给出了链接被观测的首末时刻,因此 D04-PTR 包含了更长时期内的测量结果.

(5) ‘-ITR’之间. 更多目标和更具有优势的监测点使得 fastrace 发现了更完整拓扑,特别是 p2p 的;而 DIMES 完整性较低则说明当时志愿主机的数量优势尚未弥补它们较弱的测量能力. 前面基于 BGP 快照的‘内外’差异并未在此体现. 在 ZZZ-PTR 与 S/D05-PTR 之间比较也有类似结果.

(6) FT-ITR 与 ZZZ-PTR. 面向国内的较完整快照间差异的潜在原因有两个: ①实际拓扑变化; ②IP 级测量数据差异. 由于没有 ZZZ-PTR 的 IP 级测量数据,考察①,观察在其他数据源不同时期差异中有多大比例出现在这两者间差异中. 对于边集之差,在 B04/B05-MAP 上未出现;在 D04/D05-PTR

上的出现比例为 30%和 34%. 由此推测①是次要原因,而②是主因.

(7) 基于 BGP 与基于 traceroute. 前者更完整,原因之一是后者的源 AS 都来自于路由表. 但在相同节点集上,后者比前者发现更多边,特别是 p2p 的,这与文献[18]中的发现相一致. 然而,由于前者是可信的,较大差异暗示后者可能含有实际不存在边. 文献[2]对此提出改进方法,但难以应用于本研究.

综上所述,比较(1)~(3)显示基于 BGP 更新消息的方法是完整且一致的;虽然比较(7)说明基于 traceroute 方法发现了基于 BGP 方法之外的大量信息,但比较(4)~(6)指出基于 traceroute 方法的一致性低. 由此,尝试给出一幅相对完整可信的中国 AS 图 CN-MAP;首先,将 6 幅来自采集器的图合成 3C-MAP 作为图的主体;其次,我们认为 FT-ITR 与 ZZZ-PTR 交集较可信,加入后增加 51 条边;最后,添加 AP-RR.

3.2 生灭过程

本文将历史数据本身的差异抽象为一个生灭过程,并将‘生’或‘灭’的边集  $E$  划分为两个子集: ‘外’边集  $E_o$ ,即与生灭节点相连的边;‘内’边集  $E_i$ ,即非生灭节点之间的边. 这样,相关拓扑演化模型中的‘增长’机制可被重新描述为 3 类: ①只有  $E_o$ ,例如 BA 模型<sup>[12]</sup>; ②有  $E_o$ 与  $E_i$ ,例如 GLP 模型<sup>[11]</sup>; ③ $E_i$ 中每条边都与  $E_o$ 中一条边有一个公共端点,例如 PFP 模型<sup>[9]</sup>. 3 个模型本身都只有‘生’过程,不过三类机制对‘生’或‘灭’都适用.

为特征化‘增长’机制,针对①和②,统计  $E_o$ 在  $E$ 中所占的比例  $P_o$ . 针对③,一方面,统计  $E_i$ 中实际满足③的边在  $E_i$ 中所占的比例  $P_i$ ;另一方面,判断③是否是②的附带结果,计算  $E_i$ 中的边在非生灭节点中随机选择两端时满足③的概率  $P_R$ ,并比较  $P_i$ 与  $P_R$ ,令  $P_{i-R}=P_i-P_R$ . 将每幅拓扑与其前一年拓扑进行集合运算,结果列于表 3.

表 3 基于 BGP 的拓扑历史

日期	点	边	c2p	p2p	生					灭				
					点	边	$P_o$	$P_i$	$P_{i-R}$	点	边	$P_o$	$P_i$	$P_{i-R}$
19971110	2	1	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19981125	7	4	4	0	5	3	1.00	-	-	0	0	-	-	-
19991108	9	7	7	0	2	3	1.00	-	-	0	0	-	-	-
20001118	20	22	18	4	11	15	1.00	-	-	0	0	-	-	-
20010228	28	30	26	4	9	10	0.90	0.00	0.00	1	2	0.50	0.00	0.00
20021029	70	99	86	13	45	81	0.83	0.93	-0.02	3	12	0.42	0.57	0.21
20031029	95	143	123	20	30	71	0.79	1.00	0.20	5	27	0.15	0.30	0.03
20041103	110	168	153	15	27	88	0.50	0.70	0.14	12	63	0.29	0.49	0.13
20051110	123	203	179	24	23	77	0.49	0.82	0.06	10	42	0.45	0.61	0.09
20061103	156	260	239	21	42	94	0.59	0.90	0.14	9	37	0.24	0.21	0.12
20070418	164	280	258	22	14	53	0.47	0.82	0.17	6	33	0.18	0.30	0.04

(1) 网络表现出持续增长,且新互连关系主要为 c2p,但这并非如 3 个模型所说的只源于‘生’过程,而是在‘生灭’共同作用下的结果. 尽管‘灭’过程在 2001 年以前不存在,但之后却是不可忽视的,例如 2003 年的边中有 44% 在 2004 年消失.

(2) ‘生’过程的  $P_0$  始终高于‘灭’过程的,这就是说‘生’过程中 AS 加入时所带来的比例高于‘灭’过程中 AS 离开时所带走的,同时也说明‘生’过程中内部产生的比例低于‘灭’过程中内部消失的.

(3) ‘生’过程的  $P_1$  较高,说明为新 AS 提供服务的提供商同时也倾向于与其他 AS 建立新链接;而‘灭’过程的  $P_1$  较低,说明一个 AS 消失时其提供商并不倾向于断开与其他 AS 间的链接. 同时,‘生灭’过程的  $P_{1-R}$  几乎都大于零,即上述倾向性高于随机化结果.

综上所述,三类增长机制并不完全符合中国网

络演化过程. 中国网络在经历一段只含‘生’过程的孕育期之后,进入具有‘新陈代谢’的发展期. 其增长主要来源于新 AS 的直接加入以及通过其提供商间接带来新的互连协议,而协议终止并不完全是受 AS 退出的影响.

4 复杂网络特征分析

4.1 特征化方法

复杂网络特征化研究提出了大量图论度量来描述网络结构,文献[19-20]对此进行了全面综述. 表 4 中列出了节点相关度量. 以此为基础,表 5 中给出了统计特征度量. 其中,一个图  $G$  含  $n$  个节点和  $m$  条边. 节点为一个整数  $i=1,2,\cdots,n$ ; 边为一个对  $(i,j)$ .  $G$  表示为邻接矩阵  $A$ : 若  $(i,j) \in G$ , 元素  $a_{ij}=1$ ; 否则  $a_{ij}=0$ .

表 4 节点相关度量

名称	定义	含义
节点度(node degree)	$d_i=\sum_j a_{ij}$	连通性
平均邻居度	$n_i=\sum_j a_{ij} d_j/d_i$	邻居连通性
局部聚集(local clustering)	$c_i=\sum_{j,k} a_{ij} a_{ik} a_{jk}/(d_i(d_i-1)), d_i>1.$	邻居互连程度
核数(coreness)	$k_i=k$ , 当且仅当 $i \in H_k$ 且 $i \notin H_{k+1}$ . 诱导子图 $H_k$ 中 $i: d_i \geq k$ , 且 $H_k$ 是满足此性质的最大子图.	层次性
平均距离	$l_i=\sum_j l_{ij}/(n-1)$ . $l_{ij}$ 是 $i$ 和 $j$ 间最短路径长度.	通信代价
介数(betweenness)	$b_i=\sum_{i \neq j \neq k} \sigma_{jik}/\sigma_{jk}$ . $\sigma_{jik}$ 是 $j$ 和 $k$ 间经过 $i$ 的最短路径数, $\sigma_{jk}$ 是 $j$ 和 $k$ 间最短路径数.	承载流量

在度分布幂律被发现后,一些其他的更复杂的特征被相继提出,随之产生了一个新问题:现实网络具有某个特征是否只是节点度形成过程中的‘副产品’? 判断方法之一是检查该特征的实际度量值  $v$  在具有相同节点度序列的网络总体中的  $Z$ -记分 ( $Z$ -Score)  $Z_v$ . 通常认为当  $|Z_v|>2$  时答案是否定的并且相应特征是显著的.  $Z$ -记分还有另一个重要应用,即判断  $v$  相对于平均水平的高低.

4.2 拓扑快照特征比较

本节比较合成的 CN-MAP、基于 BGP 的 3C-MAP 和基于 traceroute 的 FT-ITR 三幅有代表性快照的复杂网络特征化结果,见表 5. 为方便描述,在上下文中,直接以快照名来表示度量值.

(1) 平均度. 有  $FT-ITR>CN-MAP>3C-MAP$ . 我们发现三幅图在这个最基本度量上的差异对随后的多个度量上的差异产生深刻影响,因此将 FT-ITR、CN-MAP、3C-MAP 的度量值递减的顺序,称为‘ $\bar{d}$  序’;反之称为‘逆  $\bar{d}$  序’.

(2) 度分布. 文献[6]发现度分布服从幂律,即

$P(d) \sim d^{-\gamma}$ . 绘制  $P(d)$  的补累积分布函数于图 1(a), 并以双对数相关系数  $\theta$  来评价拟合程度. 图 1(a) 显示幂律并不严格,  $\theta$  绝对值小于 0.96, 印证了 Chen 等<sup>[5]</sup> 的结论. 曲线高度以及最大度呈  $\bar{d}$  序, 曲线越高表示低度节点比例的曲线头部下降越缓慢, 斜率  $\gamma$  也就呈逆  $\bar{d}$  序. 由于节点度是有限的, 较高曲线尾部衰减得较快, 即越弯曲, 所以  $\theta$  呈逆  $\bar{d}$  序.

(3) 度相关性. 描述不同度的节点间如何互连, 以  $n(d)/(n-1)$  正规化  $n(d)$  并绘制于图 1(b). 近似的,  $n(d) \sim d^{-\alpha}$ . 图 1(b) 显示三幅快照都具有明显的非相配性, 即低度节点倾向于与高度节点相连. 对于 A,  $CN-MAP>3C-MAP$  表明前者比后者多出的边倾向位于度相近的节点之间. 3C-MAP 的  $Z_A$  表明非相配性不仅不是‘副产品’并且较显著, 而另两幅图的情况则相反.

(4) Rich-Club. 对于高度节点间的互连程度, 观察图 1(c) 中的 RC 连通性, 有  $\varphi(r/n) \sim r^{-\lambda[9]}$ . 较大的  $\bar{d}$  使得高度节点间互连概率较大, 令  $R$  和  $\lambda$  都呈  $\bar{d}$  序, 同时说明在 CN-MAP 比 3C-MAP 多出的边

表 5 快照拓扑特征

特征	定义	度量	符号	FT-ITR	CN-MAP	3C-MAP
连通性	$\bar{d}=\sum_i d_i/N=2m/n$	平均度	$\bar{d}$	6.652	4.552	3.679
度分布	$P(d)= \{i d_i=d\} /n$	幂律指数	$\gamma$	2.068	2.193	2.203
		相关系数	$\theta$	-0.869	-0.930	-0.950
		最大度	$D$	46	36	29
度相关性	$n(d)=d$ 度节点 $n_i$ 的期望 $A$ =边两端度的相关系数	幂律指数	$\alpha$	0.255	0.243	0.307
		相配系数	$A$	-0.331	-0.271	-0.301
		Z-记分	$Z_A$	-0.068	-0.273	-2.062
Rich-Club	$\varphi(r/n)=\frac{\text{度最大的 } r \text{ 个点间边数}}{r(r-1)/2}$ $R=\varphi(10/n)$	RC 系数	$R$	0.822	0.689	0.489
		Z-记分	$Z_R$	0.426	0.103	-1.518
		幂律指数	$\lambda$	1.285	1.262	1.144
核数分布	$P(k)= \{i k_i=k\} /n$	$P[k>1]$	-	0.793	0.763	0.679
		最大核数	$K$	7	6	4
		Z-记分	$Z_K$	-0.788	0.953	-0.670
聚集性	$C=\sum_i c_i/n$ $T$ =三角数/连通三元组数	聚集系数	$C$	0.451	0.248	0.164
		传递性	$T$	0.263	0.152	0.0897
		Z-记分	$Z_T$	1.484	0.965	-1.206
距离分布	$P(l)= \{(i,j) l_{ij}=l\} /(n(n-1))$	均值	$L$	2.406	2.826	3.033
		Z-记分	$Z_L$	-1.967	-1.574	-0.404
		标准差	$\sigma$	0.677	0.741	0.823
度与介数	$b(d)=d$ 度节点 $b_i$ 的期望	幂律指数	$\beta$	2.095	1.974	1.992

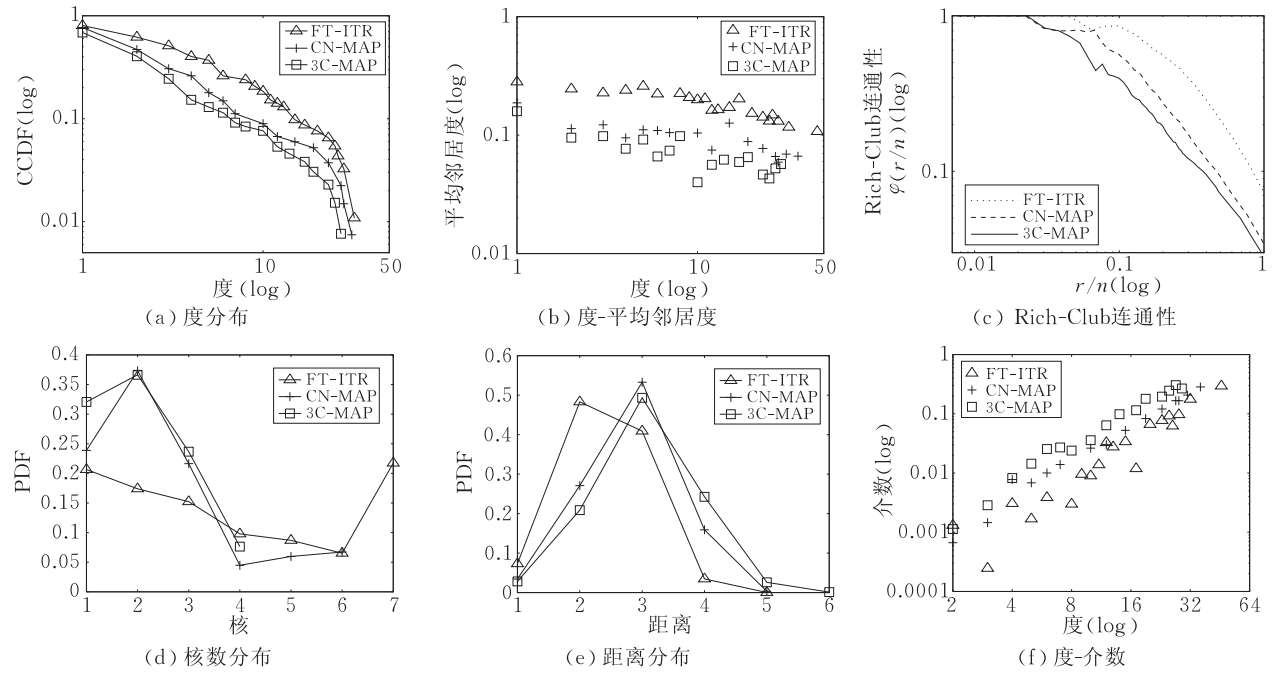


图 1 快照拓扑特征绘图

中一部分位于高度节点之间.  $Z_R$ 表明 RC 现象显著性较弱,而且 3C-MAP 甚至要低于平均水平.

因此,对于 RC 现象是否存在的争论<sup>[7-8]</sup>,其答案一方面要看所讨论的是特征本身还是特征显著性,另一方面在于所使用的是哪份数据,Colizza 等<sup>[7]</sup>所用的基于 BGP 的数据的 RC 连通性及显著性都低于 Zhou 等<sup>[9]</sup>所使用的基于 traceroute 的数据.

(5)核数分布. 最大核数  $K$  和非树节点比例  $P[k>1]$ 又都呈  $\bar{d}$  序,但图 1(d)显示  $P(k)$ 明显不

同:FT-ITR 呈谷状,3C-MAP 呈峰状,CN-MAP 呈波状. 这表明 FT-ITR 与另两幅图相比,边缘节点少而核心链接密集.  $Z_K$ 说明层次性并不显著,但 CN-MAP 略高于平均水平.

(6)聚集性. 高聚集性和短距离是小世界现象的典型特征<sup>[21]</sup>. 在节点数相近时, $\bar{d}$  较大意味着邻居间较高的互连概率,因此  $\bar{c}$  和  $T$  都呈  $\bar{d}$  序.  $Z_T$  的情况与  $Z_A$  和  $Z_R$  的类似.

(7)距离分布. 图 1(e)显示  $P(l)$ 类似高斯分

布. 在节点数相近时,  $\bar{d}$  较大意味着有更多捷径可走, 所以,  $L$  和  $\sigma$  都呈逆  $\bar{d}$  序.  $Z_L$  一致表明网络实际距离要小于平均水平, 意味着拓扑中存在着对通信效率的优化.

(8) 度与介数. 考察节点度与介数的关系, 用  $b(d)/n(n-1)$  正规化  $b(d)$  并绘制于图 1(f), 有  $b(d) \sim d^\beta$ . CN-MAP 的  $\beta$  值最小说明单一方法的两幅图都高估了流量分布的不均衡性.

综上所述, 对于特征本身, 除核数分布外, 三幅快照在定性上是相似的, 但定量上却不同, 并且多数大小关系与平均度相关. 对于特征显著性, 三幅快照存在明显的定性差异, 特别是 3C-MAP 在度相关性和聚集性方面低于平均水平; 在定量上, 除  $Z_K$  外, 其他  $Z$ -记分也都呈逆  $\bar{d}$  序或  $\bar{d}$  序, 但目前缺乏直观解释. 总之, 相对于更完整可信的 CN-MAP, 基于 traceroute 方法的 FT-ITR 高估了连通性, 而基于 BGP 方法的 3C-MAP 则低估了连通性.

### 4.3 特征历史

早期拓扑规模较小, 结构类似树, 特征化的统计意义较弱. 自 2002 年起的拓扑特征历史列于表 6, 从中总结出 4 点观察:

(1) 除  $Z_L$  有波动外, 网络拓扑在整个演化过程中始终呈现与 4.2 节中 3C-MAP 相类似的特征.

(2) 最基本的特征  $\bar{d}$  并非如 BA, GLP 及 PFP 三个拓扑模型那样固定不变, 而是持续增长.

(3)  $D$  增长速度快于  $\bar{d}$ , 即度分布尺度在增大, 并且  $2 < \gamma < 3$ , 说明网络演化具有典型的‘无尺度’网络特征<sup>[12]</sup>.

(4)  $Z_A, Z_T, Z_K$  三个  $Z$ -记分都略微表现出增长趋势, 意味着外在机制对结构的影响在不断积累.

由此可见, 中国网络是一个持续膨胀(观察 2)的耗散结构, 正处在一个‘相’内演化(观察 1), 受到外在机制作用而逐渐远离平衡态(观察 4), 并朝着‘无尺度’网络发展(观察 3).

表 6 拓扑特征历史

日期	$\bar{d}$	$D$	$\gamma$	$A$	$Z_A$	$R$	$Z_R$	$T$	$Z_T$	$L$	$Z_L$	$K$	$Z_K$
20021029	2.83	17	2.92	-0.33	-2.28	0.24	-3.25	0.07	-0.93	3.28	-0.28	3	-0.14
20031029	3.01	19	2.98	-0.30	-2.54	0.33	-1.37	0.06	-1.42	3.45	-0.23	3	-0.43
20041103	3.05	22	2.33	-0.27	-1.76	0.29	-2.59	0.05	-2.18	3.36	-0.82	3	-0.67
20051110	3.30	22	2.51	-0.34	-3.50	0.29	-3.14	0.06	-1.72	3.41	0.14	3	-1.57
20061103	3.33	30	2.53	-0.34	-4.00	0.33	-2.92	0.06	-2.41	3.37	-0.12	3	-3.41
20070418	3.41	30	2.39	-0.34	-3.78	0.36	-2.54	0.06	-2.01	3.42	0.57	3	-3.48

## 5 讨 论

在拓扑测量方面, 基于 BGP 和基于 traceroute 的方法本质上是对协议行为的观测, 而 Internet 协议行为具有高度的复杂性, 所以不仅真实拓扑是难以获取的, 并且对测量数据的评价也摆脱不了经验因素. 除此根本问题外, 相关研究都是集中在改进测量技术本身, 而我们认为还应该关注另两个问题: 一是测量过程与数据处理需要规范化, 否则影响数据的可用性, 例如, ‘-ITR’与‘-PTR’的不一致; 二是不同数据之间需要综合, 因为比较结果显示任何单一方法或数据源都存在不足, 应该通过现有数据的互补来提高数据质量. 另外, 若采用单一数据源进行研究, 应谨慎考察所得结论是否对数据完整性敏感, 并且不建议对基于 traceroute 和基于 IRR 方法的数据不加筛选的使用.

在拓扑特征化方面, 本文的结果说明任何关于 Internet 拓扑具备某项特征的结论都应该与其所使用的数据联系在一起, 否则将不可避免地产生类似

RC 现象是否存在的争论; 同时, 也意味着以单幅快照的特征化结果为依据的结论都需要更全面的验证. 对于主导不同数据特征差异的‘主特征’, 文献[22]和文献[23]分别认为是度相关性和 RC 连通性, 而本文观察到的是平均度. 原因之一显然是三个研究的所用数据不同, 但有一点需要强调: 当节点数一定时, 平均度是最简单的度量, 而另两个度量很大程度上限制了图的自由度, 因此更易于限制其他特征, 但同时也付出了代价, 即令其他特征的比较失去了统计意义. 尽管由平均度所解释的差异也可以由其他更复杂的特征重新解释, 但正如奥卡姆剃刀原理所说的, ‘如无必要, 勿增实体’.

在拓扑演化建模方面, BA、GLP 和 PFP 模型都忽略了‘灭’过程和平均度的持续增长. 虽然任何模型都不得不在真实性与简单性之间做出取舍, 但本文结果表明‘灭’过程和平均度不仅是最基本的, 而且它们对结构的影响都是不可忽视的. 将来的改进模型应考虑到这两点. 本文还观察到基于 BGP 历史数据的特征未发生定性变化, 这意味着演化模型在特定时刻快照上进行图论特征验证在定性上是较充

分的. 最近的财富模型<sup>[24]</sup>和互连决策模型<sup>[25]</sup>虽然提出了新的演化机制, 但这两个模型中的参量难以被直接观测, 因而还都属于概念上的.

## 6 结束语

在建立 Internet 理论基础的过程中, 研究人员已经逐步认识到从复杂系统角度借鉴物理、生物等自然科学研究方法的必要性, 但还应该注意到各项研究本身也需从综合集成的角度建立联系. 本文是在综合集成思想指导下在中国网络拓扑研究上的一次尝试, 今后会将其应用于整个 Internet 的拓扑、流量、协议行为的测量与分析之中.

## 参 考 文 献

- [1] Mao Z M, Rexford J, Wang J, Katz R H. Towards an accurate AS-level traceroute tool//Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. Karlsruhe, Germany: ACM Press, 2003: 365-378
- [2] Chang H, Govindan R, Jamin S, Shenker S J, Willinger W. Towards capturing representative AS-level Internet topologies. *Computer Networks*, 2004, 44(6): 737-755
- [3] Zhang B C, Liu R, Massey D, Zhang L X. Collecting the Internet AS-level topology. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2005, 35(1): 53-61
- [4] Oliveira R V, Zhang B-C, Zhang L-X. Observing the evolution of Internet as topology. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007, 37(4): 313-324
- [5] Chen Q, Chang H, Govindan R, Jamin S. The origin of power laws in Internet topologies revisited//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2002. 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York, NY: IEEE, 2002: 608-617
- [6] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 1999, 29(4): 251-262
- [7] Colizza V, Flammini A, Serrano M A, Vespignani A. Detecting richclub ordering in complex networks. *Nature Physics*, 2006, 2(2): 110-115
- [8] Zhou S. Structural constraints in complex networks. *New Journal of Physics*, 2007, 9(172): 1-11
- [9] Zhou S, Mondragon R J. Accurately modeling the Internet topology. *Physical Review E*, 2004, 70(6): 066108-8
- [10] Park S T, Khrabrov A, Pennock D M, Lawrence S, Giles C L, Ungar L H. Static and dynamic analysis of the Internet's susceptibility to faults and attacks//Proceedings of IEEE INFOCOM 2003. 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, CA, US: IEEE, 2003: 2144-2154
- [11] Bu T, Towsley D. On distinguishing between Internet power law topology generators//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2002. 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York, NY: IEEE, 2002: 638-647
- [12] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512
- [13] Xu Guo-Zhi, Gu Ji-Fa, Che Hong-An. *Systems Science*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2000 (in Chinese)  
(许国志, 顾基发, 车宏安. *系统科学*. 上海: 上海科技教育出版社, 2000)
- [14] Broido A, Claffy K. Internet topology: Connectivity of IP graphs//Proceedings of the SPIE International Symposium on Convergence of IT and Communication 2001. Denver, CO: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001: 172-187
- [15] Shavitt Y, Shir E. Dimes: Let the Internet measure itself. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2005, 35(5): 71-74
- [16] Zhou S, Zhang G Q, Zhang G Q. The Chinese Internet as-level topology. arXiv:cs.NI/0511101. 2005
- [17] Dimitropoulos X, Krioukov D, Huffaker B, Claffy K, Riley G. Inferring as relationships: Dead end or lively beginning?//Proceedings of the 4th Workshop on Efficient and Experimental Algorithms (WEA) 2005. Lecture Notes in Computer Science. Berlin/Heidelberg: Springer, 2005: 113-125
- [18] He Y-H, Siganos G, Faloutsos M, Krishnamurthy S V. A systematic framework for unearthing the missing links: Measurements and impact//Proceedings of the 4th USENIX Symposium on Networked Systems Design & Implementation. Cambridge, MA: USENIX, 2007: 187-200
- [19] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chaves M, Hwang D U. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*, 2006, 424(4-5): 175-308
- [20] Costa L d F, Rodrigues F A, Traverso G, Boas P R V. Characterization of complex networks: A survey of measurements. *Advances in Physics*, 2007, 56(1): 167 - 242
- [21] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442
- [22] Mahadevan P, Krioukov D, Fomenkov M, Dimitropoulos X, Claffy K C, Vahdat A. The Internet AS-level topology: Three data sources and one definitive metric. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2006, 36(1): 17-26
- [23] Zhou S, Mondragón R J. Topological discrepancies among Internet measurements using different sampling methodologies//Proceedings of the International Conference on Information Networking (ICOIN 2005). Lecture Notes in Computer Science. Berlin/Heidelberg: Springer, 2005: 207-214
- [24] Wang X M, Loguinov D. Wealth-based evolution model for the Internet AS-level topology//Proceedings of the INFOCOM 2006. Barcelona, Spain: IEEE, 2006: 1-11



[25] Chang H, Jamin S, Willinger W. To peer or not to peer: Modeling the evolution of the Internet's AS-level topology//

Proceedings of the IEEE INFOCOM 2006. Barcelona, Spain: IEEE, 2006: 1-12



**ZHANG Yu**, born in 1979, Ph. D. candidate. His research interests include network topology measurement and complex network.

**FANG Bin-Xing**, born in 1960, professor, Ph. D. supervisor, member of Chinese Academy of Engineering. His research interests include network information security and parallel processing.

**ZHANG Hong-Li**, born in 1973, professor, Ph. D. supervisor. Her research interests include network measurement, parallel processing and grid computing.

Background

Internet AS-level topology is a graph of thousands of networks each of which is constituted by many routers and maintained by a single political or economical entity. The structural and dynamical characteristics of Internet topology have received a great interest from the computer science, physics, and mathematics. Researchers generally believe that understanding Internet topology will be a key of discovering universal laws inside complex networks and developing scalable next generation Internet. In the computer networking, topology measurement and analysis are the basic research to enable prediction of how new technologies, policies, or economic conditions will impact the Internet's connectivity structure. Unlike the most of fields in the computer science deal with the formalized problems and develop their corresponding algorithms, the research on network topology follows methodologies in physics, i. e. observation, hypothesis, and experiments. Three open problems need to be solved; (1) There is a lack of comprehensive and realistic topological data; (2) The

framework of describing massive graphs hasn't been constructed; (3) The first principles of the origin and evolution of inter- and intra-AS topologies seem to be outside topologies themselves.

To describe the landscape of Chinese AS-level network, the authors adopt the meta-synthetic methodology to analyze the differences among a comprehensive set of Chinese AS-level topology snapshots and history. One of key ideas in the meta-synthetic methodology is to build the relationship between the previous isolated works. Although Chinese AS-level topology is only about 3% of the global topology, the investigation on this small part gave us some insights into the macroscopic picture, which may be concealed by the population statistics in the previous works. This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (60203021) and the National Basic Research Program (973 Program) of China (2007CB311100).