

# Internet 建模的关键:研究 AS 间路由器级连接

李鹤帅 朱俊虎 王清贤 邱 茵 周天阳

(数学工程与先进计算国家重点实验室 郑州 450001) (国家数字交换工程技术研究中心 郑州 450001)

**摘 要** AS-域内路由器双层建模方式是目前构建 Internet 规模的路由器级网络模型的最优方案,而该方案需要建模者首先了解域间路由器级连接的特点。指出 AS 类型对域间路由器级连接具有较大影响,通过定义域间参数映射,利用现网数据对域间参数映射进行了现象学分析,获取了不同类型 AS 相关参数的分布函数,解决了双层模型的组合问题。在此基础上,进一步对 Internet 建模尚需解决的若干问题进行了讨论。

**关键词** Internet 建模, AS, 路由器级模型, 双层建模, 域间参数映射

**中图法分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.9.026

## Key of Internet Modeling—Looking Inside Inter-AS Router-level Connection

LI He-shuai ZHU Jun-hu WANG Qing-xian QIU Han ZHOU Tian-yang

(National Key Laboratory of Mathematical Engineering and Advanced Computing, Zhengzhou 450001, China)

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract** Currently, the AS-router double layer modeling is the optimal scheme for constructing Internet-scale router-level topology model, while it needs researchers to understand the characteristics of the Inter-AS router-level network topology. This paper pointed out that the type of AS has a great influence on Inter-AS router-level connection. After defining the mappings of Inter-AS parameters, we analysed the phenomenolog on CAIDA network data and obtained the distribution function of different Inter-AS parameters. And then we solved the problem of the combination of AS-level topology and Inter-AS router-level topology. At last, more problems of the Internet modeling that need to be solved were discussed.

**Keywords** Internet modeling, AS, Router-level model, Double layer modeling, Mappings of inter-AS parameters

## 1 简介

网络建模,特别是路由器级网络建模,对于网络科学研究和相关技术研发是不可或缺的,其中规模达到 Internet 级别的路由器级建模(本文将简称 Internet 建模)对网络协议开发和网络安全技术测试十分重要。尤其是近年来出现了一些针对 BGP 路由器的新型 DDoS 攻击,如 CXPST<sup>[1]</sup>, Coremelt<sup>[2]</sup>等,它们的实施都与 Internet 的路由器级拓扑强相关。为了应对这些威胁,网络安全研究者需要使用高仿真度的 Internet 级网络模型进行防御技术研究。

一般而言,Internet 级网络模型至少需要满足 3 方面的要求:1)与 Internet 高度相似的拓扑特征,主要体现在节点度分布、介数(Betweenness)、网络直径等典型网络参数与实际网络较好地吻合;2)明确的路由协议层次划分,Internet 中运行的路由协议以 AS 为边界明确分为 IGP 和 BGP,网络模型也应当体现这一特征;3)正确的性能赋值,即路由器和路由链路的

性能与实际网络类似。

Internet 拓扑模型是 Internet 级网络建模的基础,网络研究者对 Internet 拓扑模型进行了大量的研究,首先提出了基于度分布的无标度模型,根据实际网络中路由器节点度数呈现幂律分布的基本特征,结合其他网络参数构造模型,对于当时选择的评价参数,其可以得出很理想的效果。无标度模型的问题在于两个方面:1)不能进行 AS 的划分,难以确定路由器类型,也很难进行性能赋值;2)此类模型还会出现某些与 Internet 严重不符的特点,如 Internet 中核心路由器度较小,而无标度模型中核心路由器度很大<sup>[3]</sup>。针对无标度模型的缺点,研究者们进一步提出了一类基于路由器性能包线的启发式优化拓扑模型(Heuristically Optimal Topology, HOT),即首先根据路由器性能对单个 AS 中的路由器进行性能赋值并建立链路,再将这些 AS 连接起来。此类方法构造出的域内模型真实度高,但由于在连接 AS 时缺乏理论依据,构造的域间连接与实际情况并不相符。

到稿日期:2015-08-03 返修日期:2015-10-25 本文受国家自然科学基金项目青年基金(61402525,61502528)资助。

李鹤帅(1987—),男,博士生,主要研究方向为网络安全、网络模拟与仿真,E-mail:LHS\_1987@163.com;朱俊虎(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为网络模拟与仿真、网络安全测评,E-mail:zhujunhu74@163.com;王清贤(1960—),男,硕士,教授,博士生导师,主要研究方向为网络安全、网络协议;邱茵(1981—),女,博士,讲师,主要研究方向为网络安全、网络安全测评;周天阳(1979—),男,硕士,讲师,主要研究方向为网络安全、网络安全测评。

针对 HOT 类模型的缺点,更为合理的思路为:首先建立 Internet 的 AS 级模型,再根据域间连接的特点确定那些相连 AS 之间的路由器级连接情况,最后在每一个 AS 内进行 HOT 建模。这就需要研究者了解域间路由器级连接的特征,即域间 BGP 路由器的连接情况,而目前该方面的研究相对匮乏。针对这种需求,本文对现网数据进行分析,对域间路由器级连接进行现象学(Phenomenological)研究并获取其统计学规律,为进一步的 Internet 建模提供理论依据,并根据研究结果对未来的 Internet 建模研究进行展望。

本文第 2 节介绍路由器级模型的研究现状并对其进行分析;第 3 节阐述 Internet 建模路线,定义域间参数映射并指出其是建模的重点;第 4 节通过对现网数据的现象学分析,获取域间参数映射的函数表达;第 5 节指出现有工作的不足和改进方向;最后总结全文。

## 2 相关研究

由于本文讨论的 Internet 建模属于路由器级建模,本节将介绍路由器级模型,特别是 HOT 类模型的研究现状,并分析它们各自的优缺点。

早期的路由器级模型为无标度模型,早在 1999 年,C. Faloutsos 等人就对 Pansiot-Grad 数据集进行了分析,指出了路由器节点度分布符合幂律<sup>[4]</sup>。之后 D. Magnoi 等人<sup>[5]</sup>通过对 Skitter 数据集的分析也得到了类似的结论,这些结论推动了以 BA 模型为代表的无标度模型在路由器级网络建模中的应用。

但是,2002 年 A. Fabrikant 等人指出了路由器级网络建模需要考虑路由器资源消耗,不考虑设计因素的简单模型不适合描述路由器级拓扑<sup>[6]</sup>。类似地,H. Chang 等人也认为成本、性能、结构优化等因素在路由器级 Internet 拓扑建模过程中可能具有极为重要的影响,并指出应该以此为理论基础来解释幂律特性的生成原理<sup>[7]</sup>。在此基础上,L. Li 于 2004 年提出基于网络性能优化设计的路由器级拓扑建模方法,即启发式优化拓扑模型,简称 HOT。HOT 的基本思想是路由器存在一条表征链接数和单线带宽的性能包线,核心路由器往往拥有少数几条高带宽链路,而边缘路由器往往拥有大量低带宽链路,路由器链接数和单线带宽组合不得超越性能包线,以此为基础,结合网络设计的一般原则,即可得到单个 AS 或 ISP 内的路由器级模型<sup>[3]</sup>。但是 HOT 存在的不足也很明显:首先,HOT 只针对 AS/ISP 内部建模,无法实现 Internet 建模;其次,HOT 只使用一种路由器 Cisco GSR 12410,这显然与现实网络不符<sup>[3]</sup>。针对 HOT 的缺点,I. Scholtes 等人提出了一种改进的 HOT 模型 TopGen,相比 HOT,TopGen 的进步主要体现在两方面:1)引入 4 种性能由低到高递进的路由器,即 Edge, Gateway, Border 和 Core,与实际网络更加接近;2)Core 路由器形成 IXP,将各个 AS 连接起来,实现了对整个 Internet 的建模。TopGen 的主要问题在于连接 AS 的过程实际上是在连接 Core 路由器,AS 划分缺乏依据,难以体现实际网络的 AS 度分布特征<sup>[8]</sup>。

之后 B. Quoitin 等人提出了 IGen,其建模过程为:首先,使用 AS 级网络模型或是实际的 AS 级拓扑数据构建 AS 级网络;确定 AS 的规模(即内部路由器个数),并按照 HOT 思

想将路由器连接起来;对于相连的 AS,按照规模越大域间路由链路越多的一般特征,根据  $N_{ij} = 1 + aN_iN_j$  ( $N_{ij}$  为  $AS_i$  和  $AS_j$  间的链路数量,  $N_i$  和  $N_j$  分别为  $AS_i$  和  $AS_j$  的规模即 AS 内路由器数量,  $a$  为自定义系数)确定 AS 间链路数量,对每一条链路  $L_{ij}$ ,在  $AS_i$  和  $AS_j$  中各选取一个路由器进行连接<sup>[9]</sup>。相比 TopGen,IGen 可以实现较为真实的 AS 级拓扑,但是其问题在于 AS 级模型和域内路由器级模型的整合过于粗糙:1)对于 IGen 中一对相连的 AS,每一个 BGP 路由器只用于一条链接,这显然与现实网络不符;2)公式  $N_{ij} = 1 + aN_iN_j$  过于简单化,事实上 AS 身份并不完全平等,向其他 AS 提供服务的 Provider 型 AS 的 BGP 路由器多为核心路由器,度数相对较小;而 Customer 型 AS 的 BGP 路由器度数可能较大,简单的链路数量计算公式无法体现出这些特点。类似地,基于 AS 级-域内路由器级双层建模的 A2R 模型<sup>[10]</sup>也存在着域间连接与实际不符的情况。

## 3 Internet 建模路线

针对现有 Internet 建模方法的不足,本节将指出 AS 级-域内路由器级双层建模是实现 Internet 建模的较好路线,并对域间路由器级连接进行形式化表示,指出研究域间路由器级连接所要获取的参数。

### 3.1 几种 Internet 建模思想的比较分析

显然,无标度模型不适合 Internet 建模,这不仅是由于其难以进行 AS 划分,更是由于其呈现出与实际网络不符的特征。这些与实际网络不符的特征本质上是由于模型建立过程中不考虑路由器性能所导致的,这样的缺点难以通过单纯的改进拓扑生成算法消除,因此无标度模型在 Internet 建模领域基本没有发展前景。

相应地,基于路由器性能包线的 HOT 类模型可以很好地再现真实网络的特点,很适合域内建模,但不宜直接用于 Internet 建模,这是由于 HOT 类模型在路由器间建立连接的依据仅仅是路由器性能,而没有考虑连接所使用的协议,这使得 HOT 类模型不能直接实现 AS 的划分。解决这个问题有两种思路:一种是类似 TopGen 的“从低到高”建模,即先建立域内模型,然后依据边界路由器性能把 AS 连接起来;另一种是类似 IGen 的“从高到低”建模,即先建立 AS 级模型,实现 AS 间的路由器级连接,再建立域内模型。显然,前者仅仅从路由器性能出发,没有考虑到实际网络中 AS 级的拓扑;而后者可以同时实现在 AS 级和域内路由器级两个层面的较高真实度,并且还具备一个明显的优势,即两个层面建模算法相对独立,随着 AS 级/域内路由器级建模算法的进步,整体的 Internet 建模算法可以较好地实现升级改造。

很显然,AS 级-域内路由器级双层建模是实现 Internet 建模的较好路线,而实现双层建模的关键则在于实现两个层次模型的整合,这就需要研究者首先对域间路由器级连接的特点有清晰的认识。

### 3.2 模型域间路由器级连接的形式化表示

对于一个 Internet 模型中的某一对相连的自治域  $AS_0$  与  $AS_1$ ,它们的域间链路集合可以表示为:

$$L_{01} = \{(u, v) | u \in Border_0, v \in Border_1\} \quad (1)$$

其中,  $Border_0$  和  $Border_1$  表示自治域 0 和 1 的边界路由器集合。

假设域间边界路由器进行相连时不考虑路由器的地理位置, 则可认为  $AS_0$  与  $AS_1$  间路由器级连接是在  $Border_0$  和  $Border_1$  中随机选点进行指定次数的连接, 那么  $AS_0$  与  $AS_1$  间路由器级连接情况仅取决于 3 个因素, 即  $|L_{01}|$ 、 $|Border_0|$  和  $|Border_1|$ , 由此可以对域间路由器级连接关系进行定义。

**定义 1** 自治域  $AS_0$  与  $AS_1$  的域间路由器级连接关系  $F$  是一对多映射, 定义域为  $|L_{01}|$ 、 $|Border_0|$  和  $|Border_1|$ , 值域是基数为  $|L_{01}| * |Border_0| * |Border_1|$  的连接集合, 映射方法为迭代  $|L_{01}|$  次, 在  $Border_0$  和  $Border_1$  中选择两点进行连接。

显然, 模型构建者需要得到的域间连接  $L$  可以表示为:

$$L = F(|L_{01}|, |Border_0|, |Border_1|) \quad (2)$$

B. Quoitin 等人<sup>[9]</sup>已经指出了域间链路数量正相关于两个 AS 的规模, 基于同样的基本思想, AS 边界路由器数量也应当正相关于 AS 的规模。此外, 也需要考虑到 AS 类型 (Provider、Provider/ Customer 以及 Customer, 简称为 P、PC 和 C) 对边界路由器数量的影响, 这样的考虑是出于一个基本假设: Provider 型和 Provider/ Customer 型 AS 的边界路由器大多为高性能的核心路由器, 故此类 AS 的规模与边界路由器数量的比值应当较大, 而 Customer 型 AS 则正好相反。类似地, 域间链路数量应当也受到 AS 类型以及 AS 连接类型 (Peer-Peer 和 Provider-Customer, P-P 和 P-C) 的影响。故式 (2) 中的参数可以进一步表示为:

$$|Border| = f_1(N, Attribute) \quad (3)$$

$$|L_{01}| = f_2(N_0, N_1, Attribute_0, Attribute_1, Property) \quad (4)$$

其中,  $N$  表示 AS 规模,  $Attribute$  表示 AS 属性,  $Property$  表示连接属性, 它们称为域间参数;  $f_1$  和  $f_2$  称为域间参数映射。由于域间参数在 AS 模型建立之后即可获得, 建模者如果可以获取域间参数映射的函数表达, 即可构造域间路由器级连接。

#### 4 域间参数映射的研究

本节将对 Internet 范围的现网数据进行现象学分析, 对域间参数映射进行研究。使用两个数据源进行分析, 分别是 CAIDA-AS-Relationship-20131101<sup>[11]</sup> 和 CAIDA-ITDK-201307<sup>[12]</sup>, 根据前者可以获取各 AS 的类型和 AS 连接类型, 而后者用于获取 AS 规模、边界路由器个数以及域间链路数量。

根据 CAIDA-AS-Relationship-20131101 提供的数据, 本文对号码小于 65535 的各 AS 进行了分析, 其中 P、PC 和 C 这 3 类 AS 的数量分别为 65、6572 和 34594; 由于 CAIDA-ITDK-201307 并不是对 Internet 的完整探测, 实际可供分析的 3 类 AS 的数量分别为 29、6246 和 25519。考虑到 P 型 AS 样本数量较少, 单独进行分析可能会导致较大误差, 将不再区分 P 型 AS 和 PC 型 AS, 而将其统称为 P 型 AS。

##### 4.1 边界路由器数量的现象学分析

无论是 P 型还是 C 型 AS, 其边界路由器数量都应当正相关于 AS 的规模, 故本节将首先研究边界路由器数量与 AS 规模之间的关系。

图 1 和图 2 分别展示了 P 型和 C 型 AS 的规模与边界路由器数量之间的关系, 很显然它们都不能简单地通过曲线方程加以描述。但是通过计算可以发现, P 型 AS 的规模与边界路由器数量的比例 (本文将其简称为路由器系数) 的平均值高达 49.67, 远高于 C 型 AS 的 23.78, 这验证了前文的假设。两类 AS 的显著区别, 使得它们在下面的研究中必须被区别对待。

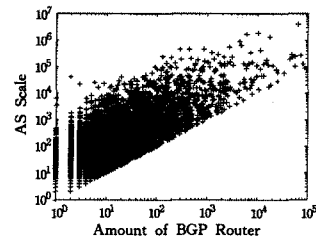


图 1 P 型 AS 的规模与边界路由器的数量关系 (双对数坐标系)

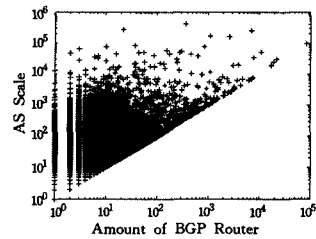


图 2 C 型 AS 的规模与边界路由器的数量关系 (双对数坐标系)

尽管 AS 的规模与边界路由器数量之间的关系不能简单地通过曲线方程来描述, 但是图 1 和图 2 仍基本符合基于 AS 规模越大边界路由器数量越多的基本原理。下面将进一步考查两型 AS 的路由器系数是否服从某种分布。

图 3 展示了 P 型 AS 的路由器系数分布情况 (已剔除若干大离群点,  $x$  轴为路由器系数取对数,  $y$  轴为路由器系数分布值取对数), 很显然路由器系数的分布符合幂律, 其拟合曲线方程为  $\log(y) = -1.2408 * \log(x) + 3.1938$ , 即  $y = 1562 * x^{-1.2408}$ 。

图 4 展示了 C 型 AS 的路由器系数分布情况。类似地, 其路由器系数的分布同样符合幂律, 其拟合曲线方程为  $\log(y) = -1.489 * \log(x) + 3.8894$ , 即  $y = 7751 * x^{-1.489}$ 。

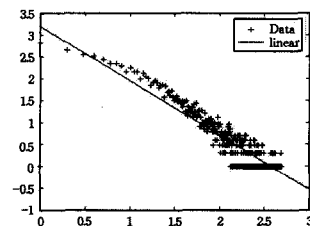


图 3 P 型 AS 的路由器系数分布情况

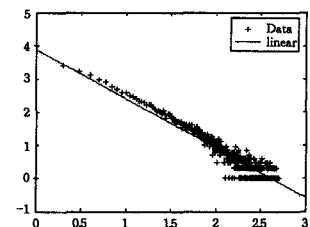


图 4 C 型 AS 的路由器系数分布情况

## 4.2 域间链路数量的现象学分析

前文提出假设:域间链路数量应当受到 AS 类型以及 AS 连接类型的影响。为简单起见,这里将 AS 级连接分为 3 类: Provider-Provider(P 型 AS 之间的连接)、Provider-Customer (P 型 AS 和 C 型 AS 之间的连接)和 Customer-Customer(C 型 AS 之间的连接)。这里的 AS 连接是那些号码小于 65535 的 AS 之间的连接,其中 Provider-Provider 型连接 36754 个, Provider-Customer 型连接 47633 个, Customer-Customer 型连接 1616 个,BGP 链路数量为 2097105 条。图 5—图 7 分别展示 3 类相连 AS 规模乘积与域间链路数量的关系,其中 x 轴表示域间链路数量,y 轴表示相连 AS 规模乘积的万分之一。

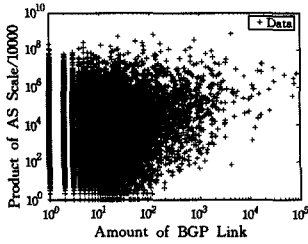


图 5 Provider-Provider 型连接 AS 规模乘积与域间链路数量的关系(双对数坐标)

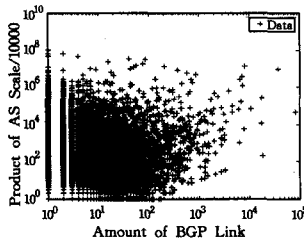


图 6 Provider-Customer 型连接 AS 规模乘积与域间链路数量的关系(双对数坐标)

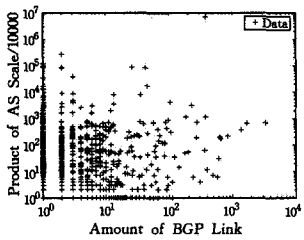


图 7 Customer-Customer 型连接 AS 规模乘积与域间链路数量的关系(双对数坐标)

由以上 3 个图可以发现,数据点散布非常大,直接进行函数拟合求 AS 规模乘积与域间链路数量的关系是不现实的,有必要进一步考查 AS 规模乘积与域间链路的比例(本文将其简称为链路系数)是否服从某种分布。考虑到 Provider-Provider 型和 Provider-Customer 型连接的数据散布很广且数据量十分庞大,它们链路系数以 100 为单位计数,即 0~99 记为 0,100~199 记为 1,以此类推;而 Customer-Customer 型连接的链路系数不作此处理。

图 8 展示了 Provider-Provider 型连接的链路系数分布,x 轴为链路系数取对数,y 轴为路由器系数分布值取对数。可见其分布符合幂律,其拟合曲线方程为  $\log(y) = -1.3279 * \log(x) + 4.2545$ ,即  $y = 18092 * x^{-1.3279}$ 。

图 9 展示了 Provider-Customer 型连接的链路系数分布,x 轴为链路系数取对数,y 轴为路由器系数分布值取对数,其分布也符合幂律,其拟合曲线方程为  $\log(y) = -1.5783 * \log(x) + 4.1979$ ,即  $y = 15772 * x^{-1.5783}$ 。

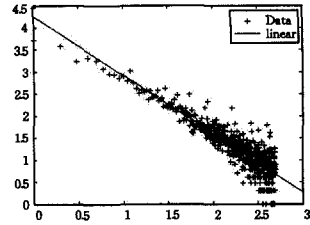


图 8 Provider-Provider 型连接的链路系数分布

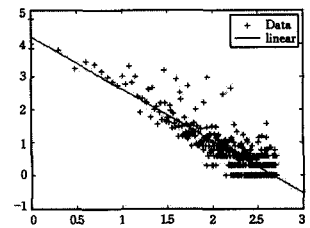


图 9 Provider-Customer 型连接的链路系数分布

图 10 展示了 Customer-Customer 型连接的链路系数分布,x 轴为链路系数取对数,y 轴为路由器系数分布值取对数,其拟合曲线方程为  $\log(y) = -0.77307 * \log(x) + 1.9362$ ,即  $y = 86 * x^{-0.77307}$ 。但需要注意其分布相当不规律,使用幂律方程表达很勉强,该幂律方程缺乏参考价值。

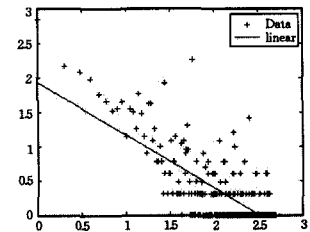


图 10 Customer-Customer 型连接的链路系数分布

显然,相比路由器系数呈现出的典型幂律分布,链路系数分布的规律性较差,这也许可以解释为:对于一个 AS,其进出流量必然要经过边界路由器,因此路由器系数呈现较强的规律性;而 AS 往往有不止一个 AS 邻居,一个 AS 连接对应的流量的不确定性较大,故链路系数的规律性也较差。

根据上面的一系列结论,结合路由器系数和链路系数分布的函数表达式,即可获得域间参数映射的概率函数表达,进而可以根据域间参数有效构造域间路由级连接(尽管 Customer-Customer 型连接的链路系数分布函数缺乏参考价值,但 Customer-Customer 型连接的比例相当小,故对建模影响不大)。

## 5 关于 Internet 建模的进一步的讨论

获取域间参数映射的函数表达之后,即可根据域间参数构造域间路由级连接,这是否意味着我们可以很快获取一个十分完善的 Internet 模型?至少在现在答案是否定的,这是由 3 方面的原因导致的。

首先,现有的 AS 相关研究难以较好地兼顾 AS 类型、AS 规模和度分布 3 方面。现有的绝大多数 AS 级模型不区别

AS 类型,虽然可以根据 AS 度数来进行识别(P 型 AS 的度数相对较高),但效果不佳;而某些区别 AS 类型的模型,如 GHITLE<sup>[13]</sup>,度分布特性较差。H. Tangmunarunkit 发现 AS 规模与度数之间存在正相关关系并将其关系函数化<sup>[14]</sup>,但并未考虑到 AS 类型对相关关系的影响。构造更加完备的 AS 级模型是未来研究者们需要解决的问题。

其次,现有的 HOT 类模型适合 AS 内部建模,但是同样没有考虑到 AS 类型对模型的影响。考虑到 AS 不同的功能,P 型 AS 需要转运过路流量而 C 型 AS 不需要,那么两类 AS 的内部结构应当是有所区别的,很有可能呈现出这样的现象:P 型 AS 内部更接近网状,而 C 型 AS 内部更接近树状。是否确实存在这样的现象以及这样的现象对建模的影响,都需要研究者们进行更多的研究。

第三,ITDK 数据库尽管提供了几乎是现有最完善的路由器级拓扑信息,但是仍有所遗漏,这对域间参数映射函数化造成了不利影响,我们期待 ITDK 和其他网络研究组织能够提供更加完善的网络拓扑数据。

**结束语** 域间路由器级连接是 AS 级拓扑与域内拓扑的连接桥梁,研究域间路由器级连接特点对 Internet 建模具有重要意义。本文提出了域间参数映射概念,通过对现网数据的分析实现了域间参数映射的函数表达,并指出了在 Internet 建模方面应当进一步解决的问题。

## 参 考 文 献

- [1] Schuchard M, Vasserman E, Mohaisen A. Losing control of the internet; using the data plane to attack the control plane [C]// NDSS. The Internet Society, 2011; 101-116
  - [2] Studer A, Perrig A. The Coremelt attack [M]// Computer Security-ESORICS 2009. 2009; 37-52
  - [3] Li L, Alderson D, Willinger W, et al. A first-principles approach to understanding the internet's router-level topology[J]. *Acem Sigcomm Computer Communication Review*, 2004, 34(4): 547-560
  - [4] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of tile internet topology[J]. *Sigcomm*, 1999, 29: 251-262
  - [5] Magoni D, Pansiot J J. Internet topology modeler based on map sampling [C] // International Symposium on Computers and Communications. 2002; 1021-1027
  - [6] Fabrikant A, Koutsoupias E, Papadimitriou C H. Heuristically Optimized Trade-Offs; A New Paradigm for Power Laws in the Internet[C]// 29th International Colloquium Conference on Automata, Languages and Programming. 2002; 110-122
  - [7] Chang H, Jamin S, Willinger W. Internet connectivity at the AS-level; An optimization-driven modeling approach [C]// Proc. of the ACM SIGCOMM Workshop on Models, Methods and Tools for Reproducible Network Research. 2003; 210-225
  - [8] Scholtes I, Botev J, Esch M, et al. TopGen-Internet Router-Level Topology Generation Based on Technology Constraints [C]// Proc of the 1<sup>st</sup> International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops. 2008; 102-112
  - [9] Quoitin B, Van V, Francois P, et al. IGen: Generation of Router-level Internet Topologies through Network Design Heuristics [C]// Proceedings of 21<sup>st</sup> International Teletraffic Congress. 2009; 109-117
  - [10] Liu Y, Pan L, B Li. Complex Internet route-level topology model [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(28): 1-5
  - [11] AS-Relationship [DB/OL]. (2013-11-01). <http://www.caida.org/data/as-relationships>
  - [12] The Internet Topology Data Kit [DB/OL]. (2013-07). <http://topo-data.caida.org/>
  - [13] Launois C. Generator of Hierarchical Internet Topologies using LEvels (GHITLE) [OL]. (2001). <http://openresources.info.ucl.ac.be/ghitle>
  - [14] Tangmunarunkit H, Doyle J, Govindan R, et al. Does AS size determine degree in as topology? [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2001, 31(5): 7-8
- 
- [9] Wang Zhao-yuan, Li Tian-rui, Yi Xiu-wen. Approach for Development of Ant Colony Optimization Based on MapReduce[J]. *Computer Science*, 2014, 41(7): 261-265 (in Chinese)  
王诏远, 李天瑞, 易修文. 基于 MapReduce 的蚁群优化算法实现方法[J]. *计算机科学*, 2014, 41(7): 261-265
  - [10] Zhou C. Fast parallelization of differential evolution algorithm using MapReduce [C]// Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. ACM, 2010; 1113-1114
  - [11] Pavlech M. Framework for Development of Distributed Evolutionary Algorithms Based on MapReduce [C] // Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing & Automation; Power of Knowledge and Creativity. Vienna; DAAAM International Vienna. 2011; 1475-1476
  - [12] 夏俊鸾, 刘旭辉, 邵赛赛, 等. Spark 大数据处理技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015
  - [13] Zaharia M, Chowdhury M, Das T, et al. Resilient distributed datasets; A fault-tolerant abstraction for in-memory cluster computing [C] // Proceedings of the 9th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association, 2012; 1-16
  - [14] Jumonj T, Chakraborty G, Mabuchi H, et al. A novel distributed genetic algorithm implementation with variable number of islands [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007 (CEC 2007). IEEE, 2007; 4698-4705
  - [15] Yao X, Liu Y, Lin G. Evolutionary programming made faster [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(2): 82-102
  - [16] Yang Z, Tang K, Yao X. Large scale evolutionary optimization using cooperative coevolution [J]. *Information Sciences*, 2008, 178(15): 2985-2999
  - [17] Kiyoharu T, Takashi I. Concurrent Differential Evolution Based on MapReduce [J]. *International Journal of Computers*, 2010, 4(4): 161-168

(上接第 119 页)