基于时序距离的AS级Internet动态性测量方法

张岩庆 陆余良 杨国正
(解放军电子工程学院网络工程系 合肥 230037)

摘 要 随着域间路由安全问题日益突出,AS(Autonomous System)级互联网的动态性测量开始成为研究热点。针对当前的测量方法无法全面度量AS级互联网演化规律的问题,提出了基于时序距离的AS可达距离(ASRD)、AS连通距离(ASCD)两个特征参数,分别从可达性和连通性两个方面度量AS级互联网在不同时刻的差异。通过分析不同时间跨度和时间粒度的路由表数据集,可以对特定AS的动态性进行测量。实验结果表明,对ASRD和ASCD进行时序分析不仅能够准确检测AS级Internet异常事件,而且可以发现AS级Internet的长期演化规律。

关键词 自治域可达距离,自治域连通距离,时序分析,动态性测量
中图法分类号 TP393.4 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.025

Measurement of AS-level Internet Evolution Based on Temporal Distance

ZHANG Yan-qing LU Yu-liang YANG Guo-zheng
(Department of Network Engineering, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract As the inter-domain routing security problem becomes increasingly prominent, the measurement of AS-level Internet variability has become a research hotspot. The existing measurement methods can not reflect the variability of AS-level Internet comprehensively, therefore, this paper introduced AS reachability distance (ASRD) and AS connectivity distance (ASCD) based on temporal distance to characterize the difference of AS reachability and connectivity at different time respectively. Dynamics of a specific AS can be measured by analyzing route information base of different time spans and time granularities. Experimental results show that the time series analysis of ASRD and ASCD can be used to not only detect AS-level network anomalous event accurately, but also reveal the evolution laws of AS-level Internet in a long term.

Keywords AS reachability distance, AS connectivity distance, Time series analysis, Evolution measurement

1 引言

互联网由成千上万个自治域(Autonomous System, AS)相互连接构成,每个AS的动态演化过程不尽相同,由此构成了互联网的动态性特征。近年来,随着域间路由安全问题的日益突出[1],自治域级互联网的动态性测量开始成为研究热点。互联网的正常变化反映了互联网规模、拓扑关系循序渐进的演变规律;但是大规模互联网的剧烈变化通常是由网络异常事件引起的,比如路由器误配置、物理链路故障、网络攻击等,会严重影响互联网的稳定性,对整个互联网造成难以估量的影响。因此,研究AS级互联网的动态性,对于网络异常事件检测、网络安全预警等具有十分重要的意义,并为今后国家级乃至全球互联网动态性测量提供支持。

之前关于互联网动态性的研究通常是以Update报文为基础[2-4],但是使用Update报文存在很多不足之处。首先,Update报文是事件驱动的,无法从拓扑的角度分析互联网的宏观演变趋势;其次,由会话重启引起的Update报文存在重复路由问题,这些无效报文对研究互联网动态性带来很大的不便。本文使用BGP路由表(Route Information Base, RIB)作为研究对象,能够从更宏观的角度研究AS级互联网的动态性。之前提出的基于RIB表的度量指标主要包括时序路由状态距离(TRSD)[5]、AS编辑路径距离(ASPED)[6]两种,但是二者都存在一定的不足。首先,TRSD用于度量同一前缀在不同时刻的下一跳属性的变化程度,这一指标始终在一个平均值附近波动,属于互联网的常态特征,无法反映互联网的长期演化趋势,而且单个AS对TRSD的影响很小,不适用于测量AS级互联网的动态性;其次,ASPED表示两个AS_PATH属性之间最小的插入、删除、替换数,比如,两条路径〈2,1,3〉和〈2,6,1,7,3〉的编辑距离记为2,表示需要2次插入操作,ASPED只度量了单条路径的变化程度,无法全面表征AS级互联网的动态性。上述两种度量指标都只考虑了RIB表的部分属性,无法在最大程度上反映AS的演化态势。此外,文献[7]通过分析网络中节点度数的变化来发现AS级Internet连通性的演变趋势,没有考虑邻居AS的权重对连通性的影响;Oddball算法[8]通过提取"中心图"的密度、权重等特征,能够检测"中心图"中的异常节点,但是无法从动态演化的角度检测图中的异常节点;Leto等人[9]提出了一种针对演化图的异常检测方法,但是该方法假设网络连接概率符合特

到稿日期:2015-07-22 返修日期:2015-09-08
张岩庆(1988—),男,博士生,CCF会员,主要研究方向为信息安全技术、智能信息处理,E-mail:benqer@126.com;陆余良(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络安全技术;杨国正(1982—),男,博士,讲师,主要研究方向为计算机网络安全技术。

定的分布，这在很多情况下是无法满足的。

本文在已有研究的基础上，从大量 RIB 表数据集中提取 AS 的可达性特征和连通性特征，能够更全面地测量 AS 级互联网的动态演化规律。

2 BGP 路由表分析

每台 BGP 路由器都维护一张 RIB 表，其记录从本地到目标网络地址前缀的 AS 路径和下一跳，用于对数据报文的转发。因此 RIB 表实际上提供了某个时刻路由状态的快照[10]，不仅能够反映正在进行的网络行为，而且能够提供 AS 间连通性的稳态报告，反映互联网的宏观特征，是 AS 级网络测量的重要研究对象。

RIB 表的主要属性包括 Network，Next Hop，Metric，LocPrf，Weight 和 Path。其中，Network 属性记录了路由器能够到达的网络前缀，Next Hop 属性表示路由器到达相应网络前缀的下一跳地址，Path 属性记录了到达该前缀的所有 AS 路径。正常情况下，AS 路径的最后一跳 AS 就是声明该网络前缀的 AS。通过提取 Network 属性和 AS 路径的最后一跳 AS，可以得到特定 AS 声明的可路由网络地址前缀集合，通过分析 AS 路径中相邻 AS 的连接关系可以生成 AS 级互联网拓扑。因此，分析 RIB 表能够从多个角度了解 AS 在特定时刻的状态，进而可以构建 AS 级互联网的特征图，如图 1 所示。

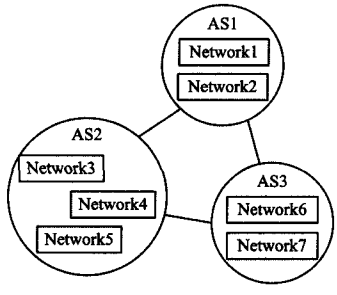


图 1 AS 级互联网的特征图

图 1 中 AS 的特征主要包括两个层面，一个是 AS 的自身特征，主要是 AS 所声明的前缀，可以表征 AS 的可达性；另一个是 AS 的拓扑特征，能够体现 AS 在拓扑中的邻接关系，可以表征 AS 的连通性。

3 AS 动态特征参数

AS 的可达性和连通性共同构成了 AS 在某一时刻的网络状态。为了研究 AS 级互联网随时间演化的动态性，分别从 AS 可达性特征和连通性特征两个方面定义了 AS 动态特征参数。

3.1 AS 可达性特征

AS 在特定时刻的可路由地址集合是该时刻 AS 可达性的重要指标，AS 的可路由地址是随着时间不断变化的，反映了 AS 可达性的动态演化特征。正常情况下，AS 可达性在短时间内的变化很小；而在发生网络攻击、地质灾害等异常事件时，AS 可达性有可能在短时间内发生较大变化，比如针对关键路由器的拒绝服务攻击会导致 AS 内大量网络地址不可达，而前缀劫持攻击会导致 AS 的可路由网络地址明显增加。因此，通过分析比较不同时刻 AS 网络地址集合的差异来测量 AS 可达性的演化规律是可行的。

网络前缀是 RIB 表中表示目的地址的最小单位，AS 声明的前缀数量能够在一定程度上表征 AS 的可达性，但是单独统计 AS 前缀数量的变化无法反映不同时刻 AS 前缀特征的变化情况。首先，掩码不同的前缀所覆盖的网络地址范围不同，前缀聚合后虽然前缀总数减少了，但是覆盖的网络地址范围增大了，反之亦然；其次，如果 AS 中既存在前缀声明也存在前缀撤消行为，则两个时刻的 AS 前缀数量相近。上述两种情况表明，AS 前缀数量无法准确反映特定 AS 在不同时刻可达地址范围的差异，因此，本文定义了 AS 可达距离（AS Reachability Distance，ASRD）。

定义 1 两个时刻的 AS 可达距离是 AS 在两个时刻声明的网络前缀所覆盖的地址集合的杰卡德距离[1]，计算方法如式(1)所示。

$$ASRD(t_1,t_2)=1-\frac{|IP(t_1)\cap IP(t_2)|}{|IP(t_1)\cup IP(t_2)|} \tag{1}$$

其中，$IP(t)=\bigcup_{i=1}^{|prefix(t)|} IP_i(t)$。$prefix(t)$表示 AS 在 t 时刻声明的所有前缀的集合，$IP(t)$表示 AS 在 t 时刻所有可达地址的集合。由式(1)可知，ASRD 的取值范围是[0,1]，而且 ASRD 值越大，表明两个时刻 AS 可达性的区别越大；反之，区别越小。将网络前缀表示为地址集合提高了 AS 可达性的表征粒度，因此 ASRD 能够消除前缀聚合等因素引起的测量误差。通过观察一段较长时间内的 ASRD，可以发现这段时间内 AS 可达距离的常态演化规律，为进一步检测 AS 级互联网可达性异常事件提供支持。

3.2 AS 连通性特征

AS 的拓扑特征能够度量 AS 在特定时刻的连通性，传统图论中度量拓扑特征的参数主要包括度数、核数、介数等。其中，度数表示 AS 的邻居 AS 数，无法反映 AS 与邻居 AS 之间的连通状态；核数表示节点在网络中所处的层次，这一度量通常在一段较长时间内比较稳定，不利于研究 AS 的动态性；介数表示网络的所有最短路径中经过该节点的数目占所有最短路径总数的比例，这一度量运算量大，而且无法直观地度量 AS 的连通性。此外，上述 3 个参数都只能度量 AS 连通性的一个维度，为了更全面地度量 AS 的连通性，本文引入了 AS 邻居子图（Neighborhood Sub-Graph，NSG）的概念。

定义 2 节点 v 的所有邻接顶点与该节点相连构成的无向加权图叫做该节点的邻居子图。

将 t 时刻 AS 编号为 asn 的 AS 邻居子图记作 $NSG_{t,asn}(V,E)$，其中 V 表示邻居子图的节点集合，E 表示邻居子图的边集，边的权重 w 代表两个相邻 AS 在所有 AS 路径集合[2]中出现的次数。

邻居子图不仅能够刻画 AS 的度数，而且能够反映边权的分布情况，因此，与度数、核数等参数相比，AS 邻居子图能够更全面地度量 AS 在特定时刻的连通性。通过分析比较不同时刻 AS 邻居子图的差异，可以测量 AS 连通性的动态演化规律，为此，需要进一步降低邻居子图的维度。

由定义 2 可知，AS 的邻居子图是一个星形图，这种拓扑结构以特定 AS 为中心，只包含与该 AS 直接相连的 AS 及其边的权重，省略了不同邻居 AS 之间的边集，由于邻居子图中

[1] 杰卡德距离（Jaccard Distance）是用来衡量两个集合差异性的一种指标。

[2] 为避免相同 AS 路径中的边重复赋权，将 RIB 表的所有 AS 路径加入 AS 路径集合中，并对 AS 路径集合进行去重处理。

的边权与邻居 AS 一一对应，因此可以将边的权重视为每个邻居 AS 的权重。在邻居子图 $NSG_{t_i,asn}(V,E)$ 中，将 AS 的邻居 AS 集合作为连通性特征，将邻居 AS 的权重作为特征值，构成的特征向量称为 AS 连通向量(AS Connectivity Vector，ASCV)。ASCV 降低了邻居子图的维度，但是 AS 的邻居 AS 会随着时间不断变化，这就导致两个时刻 t_i 和 t_j 的 ASCV 的维度和元素可能不同，因此在度量两个时刻 ASCV 的差异时，单独计算 $ASCV_1(t_i)$ 和 $ASCV_1(t_j)$ 是不可行的。本文在单个时刻 ASCV 的基础上引入了 AS 连通距离(AS Connectivity Distance，ASCD)的度量指标，计算两个时刻 t_i 和 t_j 之间 AS 连通距离 $ASCD(t_i,t_j)$ 的方法可以归结为以下 4 步。

Step1：将 t_i，t_j 的节点集合 $V(t_i)$，$V(t_j)$ 合并为一个节点集 $V(t_i,t_j)=V(t_i)\cup V(t_j)$；

Step2：对于 t_i 节点集的补集 $V(t_i,t_j)-V(t_i)$，其节点权重均设为 0，得到 $ASCV_2(t_i)$，由此计算 $ASCV(t_i)=ASCV_1(t_i)\cup ASCV_2(t_i)$；

Step3：$ASCV(t_j)$ 的计算方法同 Step2；

Step4：计算 $ASCV(t_i)$ 和 $ASCV(t_j)$ 的欧氏距离 $ASCD^p(t_i,t_j)$。

在不进行归一化处理的情况下，$ASCD^p(t_i,t_j)$ 的取值范围为 $(0,\infty)$。$ASCD^p(t_i,t_j)$ 能够表征两个时刻 AS 连通性的差异，以图 2 为例，图中所示分别为 AS x 在两个时刻 t_i 和 t_j $(j<i)$ 的邻居子图，表 1 所列为两个时刻的 $ASCV(t_i)$，$ASCV(t_j)$，$ASCD^p(t_i,t_j)$。

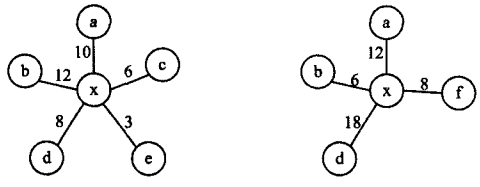


图 2　AS x 在 t_i 和 t_j 的邻居子图

表 1　两个时刻的 ASCV 及其 ASCD

	ASCV						$ASCD^p(t_i,t_j)$
$V(t_i,t_j)$	a	b	c	d	e	f	
$w(t_i)$	10	12	6	8	3	0	15.78
$w(t_j)$	12	6	0	18	0	8	

从长远的角度看，ASCD 在一段时间内的平均值可以表征 AS 连通性的常态特征，为进一步检测 AS 级互联网连通性异常事件提供支持。

4　AS 动态性测量实验

实验所使用的 RIB 表的数据来源于 Route Views 项目[11]，其路由表的采样间隔为 2h，因此，ASRD 和 ASCD 的精度均为 2h。为了验证 ASRD 和 ASCD 的有效性，选取 3 个时间跨度、时间粒度各不相同的数据集进行对比研究，表 2 所列为每个数据集的摘要信息。

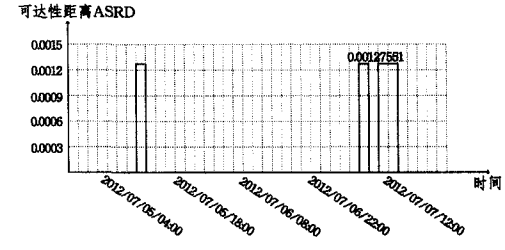
表 2　数据集摘要

	数据集 1	数据集 2	数据集 3
粒度	时	日	月
起始时间	2012/7/4	2014/1/1	2010/1/1
结束时间	2012/7/7	2014/6/1	2015/1/1
大小(GB)	1.17	5.25	2.23
自治域	AS42020 AS4134	AS15169 AS4134	AS15169 AS4134

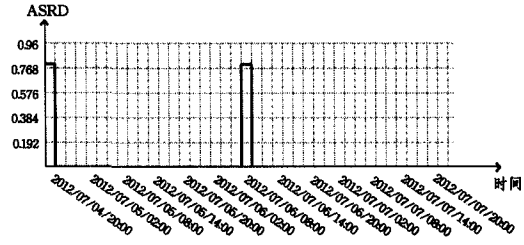
数据集 1 的时间跨度短、时间粒度小，适用于分析特定 AS 在特定网络事件中的演化态势；数据集 2 和 3 的时间跨度长、时间粒度较大，适用于分析 AS 的长期演化态势。同时，为了使分析结果具有普适性，选取黎巴嫩网络服务商 Liban Telecom 的 AS42020、Google 公司的 AS15169 以及中国电信的 AS4134 为研究对象，它们分别代表了小、中、大 3 种规模的 AS。

4.1　基于 ASRD 的 AS 可达性测量

首先分析 AS 可达性的短期演化态势。以数据集 1 为基础，分析得到 AS4134、AS42020 的 ASRD 时序数据，如图 3 所示。



(a) AS4134 在数据集 1 上的 ASRD 时序



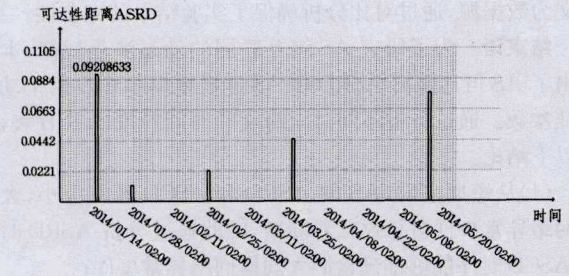
(b) AS42020 在数据集 1 上的 ASRD 时序

图 3　AS 的短期 ASRD 时序

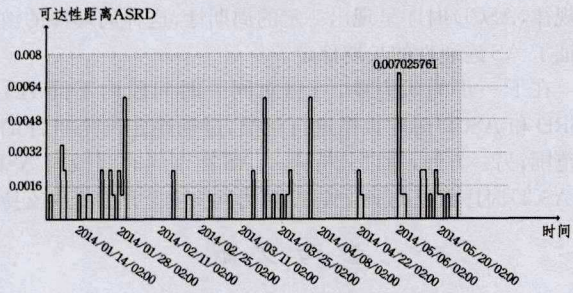
由图 3(a)可知，AS4134 可达性在一段较短时间内的变化不大，ASRD 的最大值为 0.00127551。通过分析 AS4134 的 ASRD 在相应时间段内发生变化的原因，发现造成 AS 可达性发生轻微变化的原因主要包括两个方面，一个是 AS 声明或撤销了前缀地址，另一个是前缀发生聚合或分解。与之形成鲜明对比的是，图 3(b)中显示 AS42020 可达性在 2012 年 7 月 4 日 16 时～18 时、7 月 6 日 6 时～8 时两个时间段内发生了剧烈变化，ASRD 高达 0.8。据 BGPMon 报道[12]，从 2012 年 7 月 4 开始，黎巴嫩的海底光纤被切断，互联网服务中断长达数日，其中黎巴嫩最大的网络服务商 Liban Telecom 受影响最大，这一断网事件解释了 AS42020 的 ASRD 时序发生剧烈变化的原因。通过更广泛的分析可知，造成 AS 可达性发生剧烈变化的原因主要是 AS 内的链路或路由器因网络攻击等异常事件被阻瘫，导致前缀地址不可达。

接下来分析 AS 可达性的长期演化态势。根据数据集 2 得到的 AS15169、AS4134 的 ASRD 时序如图 4 所示。

图 4(a)显示 AS15169 的可达性每隔一个月左右便会发生一次较大的变化，通过对比每次变化前后 AS15169 的可达地址集合，发现 AS15169 通过前缀聚合、声明新地址空间的方式，使可达地址集合不断增长，这种有规律的增长说明 Google 公司在定期扩展可路由地址空间。图 4(b)显示 AS4134 的 ASRD 最大值约为 0.007，说明 AS4134 在 2014 年 1 月至 6 月之间的可达地址空间基本稳定。



(a)AS15169 在数据集 2 中的 ASRD 时序



(b)AS4134 在数据集 2 中的 ASRD 时序

图 4　AS 的长期 ASRD 时序

上述两个实验综合说明，ASRD 时序不仅能够有效反映 AS 可达性在特定网络事件中的变化，而且能够用于分析 AS 可达性的长期演化规律。

4.2　基于 ASCD 的 AS 连通性测量

ASCD 是两个长度、元素均相同的 ASCV 之间的欧氏距离，因此 ASCD 只能表征特定 AS 在不同时刻的连通性，将不同 AS 的 ASCD 进行对比是没有意义的。为了衡量 ASCD 的大小，需要得到每个 AS 的长期 ASCD 平均值，表 3 所列为每个 AS 在不同数据集中的 ASCD 最大值、最小值和平均值。

表 3　AS 连通距离统计

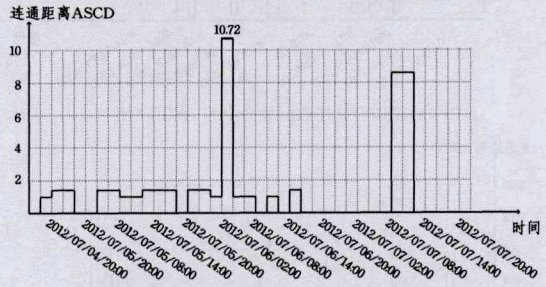
自治域		数据集 1	数据集 2	数据集 3
AS42020	最大值	1091.84	713.61	450.94
	最小值	0	0	36.5
	平均值	96.64	50.07	136.45
AS15169	最大值	10.72	62.01	75.63
	最小值	0	0	1.41
	平均值	1.26	5.23	22.01
AS4134	最大值	57.39	555.36	1271.42
	最小值	0	0	60.65
	平均值	16.39	71.83	290.16

通过表中的统计数字可以直观地发现，不仅同一 AS 在不同时间段内的连通性变化情况不同，而且同一时间段内不同 AS 的连通性变化情况也不相同。

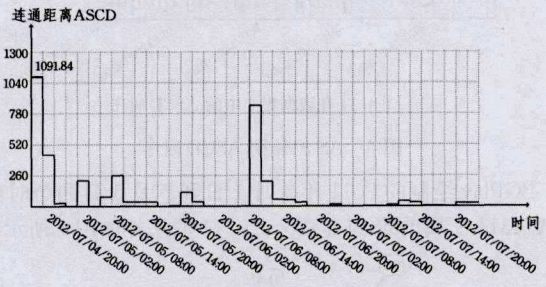
首先，对于同一 AS，测量的时间粒度越大，ASCD 的平均值就越大，说明 ASCD 与时间跨度呈正相关，这很容易理解，通常情况下，两个时刻越接近，AS 的连通性发生变化的概率越小；通过观察数据集中的最小值是否为 0 可以进一步分析 AS 连通性的变化周期，数据集 2 中每个 ASCD 的最小值均为 0，说明 AS 连通性的变化周期大于一天，而数据集 3 中每个 ASCD 的最小值均大于 0，说明不论 AS 的规模有多大，其连通性变化的周期至多为一个月。

其次，通过对比同一数据集中不同 AS 的 ASCD，发现 ASCD 的大小与 AS 的规模无关。AS15169 的邻居 AS 数量介于 AS42020、AS4134 之间，但是在每个数据集中，AS15169 的 ASCD 平均值都比 AS42020、AS4134 的小。从长远的角度看，ASCD 的平均值可以表征 AS 连通性的常态特征。有的 AS 的 ASCD 能够长期维持在一个很小的范围内，说明该 AS 的连通性很稳定；相反，有的 AS 的 ASCD 长期处于高位，说明该 AS 的转发策略经常变更，或者经常发生网络异常事件，甚至可能是一个恶意 AS。

以数据集 1 为基础，分析 AS 连通性的短期演化态势，得到 AS4134、AS42020 的 ASCD 时序，如图 5 所示。



(a)AS4134 在数据集 1 中的 ASCD 时序



(b)AS42020 在数据集 1 中的 ASCD 时序

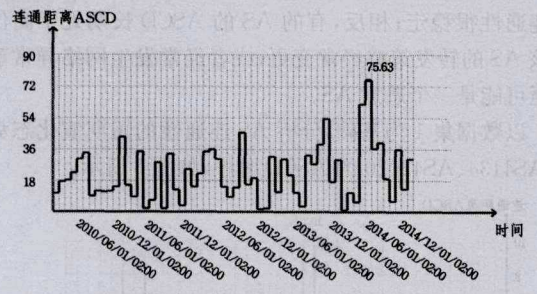
图 5　AS 的短期 ASCD 时序

图 5(a)显示 AS4134 的 ASCD 最大值为 10.72，低于长期 ASCD 平均值，说明 AS4134 在这段时间内的连通性比较稳定，ASCD 的轻微变化主要是由 AS 转发策略调整引起的。对比图 3(b)和图 5(b)中 AS42020 的 ASRD 时序和 ASCD 时序，发现二者在时间分布上存在一定程度的相似性，在 7 月 4 日 16 时～18 时、7 月 6 日 6 时～8 时两个时间段内，AS42020 的 ASRD 和 ASCD 都出现明显的上升，说明在这两个时间段内 AS42020 的可达性和连通性均发生了变化，在实际的报道中，前一时间段正是网络中断事件发生的时间，后者是网络重新恢复的时间，与实际情况一致，说明 ASRD 时序和 ASCD 时序能够有效检测 AS 级网络中断事件，与 ASRD 时序类似，AS 连通性的剧烈变化通常是由网络异常事件引起的；此外，在发生断网事件的过程中，ASRD 始终为 0，而 ASCD 时序的起伏十分频繁，说明在发生断网事件的过程中，虽然 AS42020 与邻居 AS 之间的连接情况在不断变化，但是 AS42020 中的部分前缀地址始终可达。

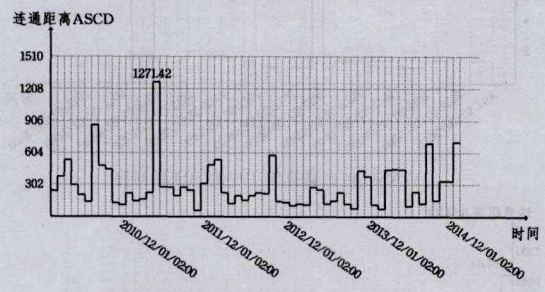
然后分析 AS 连通性的长期演化态势。以数据集 3 为基础，AS15169、AS4134 的 ASCD 时序如图 6 所示。

图 6(a)和 6(b)显示出 ASCD 在长期的演化态势中呈现出一定的周期性，AS15169 和 AS 4134ASCD 时序的波动周期大约都是 6 个月，AS15169 的 ASCD 时序始终在平均值 22.01附近波动，AS4134 的 ASCD 的平均值为 290.16，这种周期性的波动是由 AS 转发策略调整引起的，AS 转发策略的弹性微调保证了 AS 连通性的长期稳定。值得一提的是，图 6(b)显示 2011 年 4 月至 5 月期间，AS4134 的 ASCD 陡增到 1271.42。为了验证 ASCD 时序的有效性，将 ASCD 时序与相同时间段内 BGPlay[13] 生成的拓扑图进行对比，BGPlay 以

Route Views 项目中提供的 Update 报文为基础，能够生成特定前缀地址在一段时间范围内的可达路径。



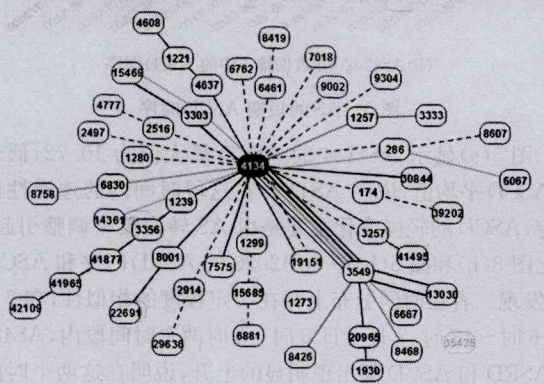
(a) AS15169 在数据集 3 中的 ASCD 时序



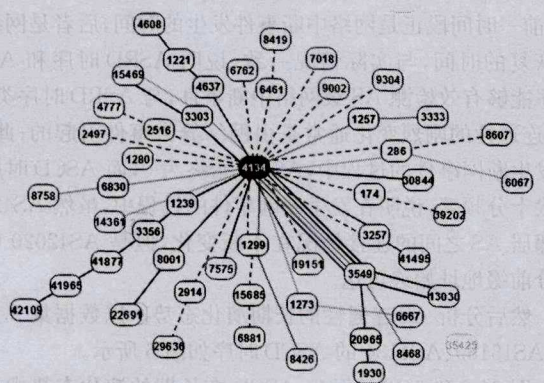
(b) AS 4134 在数据集 3 中的 ASCD 时序

图 6　AS 的长期 ASCD 时序

BGPlay 绘制的 2011 年 4 月 1 日和 5 月 1 日两个时刻到达 AS4314 所属前缀 111.120.0.0/14 的拓扑如图 7 所示。



(a) 2011 年 4 月 1 日的拓扑图



(b) 2011 年 5 月 1 日的拓扑图

图 7　BGPlay 生成的 AS 拓扑

由图 7 可知，AS4134 的邻居节点集合中增加了 AS1273，变化很小，导致 ASCD 增加的直接原因是邻居 AS 的权重分布发生了较大的变化，说明邻居 AS 的增加或减少对 ASCD 的变化贡献很小，ASCD 的显著提高通常是由邻居 AS 权重的变化引起的，这一结论为检测 AS 级网络异常事件提供了新的思路。此外，ASCD 时序、BGPlay 分别以 RIB 表、Update 报文为数据源，通过对比分析确保了实验结果的完备性。

结束语　为了研究 AS 级互联网的动态演化规律，本文提出了 AS 可达距离 ASRD 和 AS 连通距离 ASCD 两个动态特征参数。通过分析不同时间跨度和时间粒度的 RIB 表，得到以下结论：

(1)从短期来看，AS 的 ASRD 和 ASCD 通常很小，大规模网络异常事件会导致二者陡增，因此通过分析 ASRD 时序和 ASCD 时序能够准确检测大规模网络异常事件；

(2)从长期来看，ASRD 时序能够有效反映 AS 规模的增长规律，ASCD 时序呈现出一定的周期性，这种周期性的波动保证了 AS 连通性的长期稳定。

在下一步的研究中，可以对同一时间段内不同 AS 的 ASRD 和 ASCD 时序数据进行聚类，进而确定网络事件的影响范围；另一方面，通过分析同一 AS 在不同时间段内 ASRD 和 ASCD 时序数据的演化规律，可为网络安全预警提供支持。

参 考 文 献

[1] Li S, Zhuge J W, Li X. Study on BGP Security [J]. Journal of Software, 2013, 24(1): 121-138 (in Chinese)
黎松，诸葛建伟，李星. BGP 安全研究[J]. 软件学报，2013，24(1)：121-138

[2] Deshpande S, Thottan M, Ho T K, et al. An online mechanism for BGP instability detection and analysis[J]. IEEE Transactions on Computers, 2009, 58(11): 1470-1484

[3] Rimondini M, Squarcella C, Di Battista G. Towards an automated investigation of the impact of bgp routing changes on network delay variations[M]// Passive and Active Measurement. Springer International Publishing, 2014: 193-203

[4] Li Y, Xing H J, Hua Q, et al. Classification of BGP anomalies using decision trees and fuzzy rough sets[C]// 2014 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). IEEE, 2014: 1312-1317

[5] Comarela G, Gursun G, et al. Studying interdomain routing over long timescales[C]// Proceedings of the 2013 Conference on Internet Measurement Conference. ACM, 2013: 227-234

[6] Al-Rousan N M, Trajković L. Machine learning models for classification of BGP anomalies[C]// 2012 IEEE 13th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). IEEE, 2012: 103-108

[7] Fu D Y, Zhao H, Ge X. AS-level Internet Topology Degree and Connectivity Analysis[J]. Computer Science, 2009, 36(10): 104-105(in Chinese)
付大愚，赵海，葛新. AS 级 Internet 拓扑度和连通性演化分析[J]. 计算机科学，2009，36(10)：104-105

[8] Akoglu L, McGlohon M, Faloutsos C. Oddball: Spotting anomalies in weighted graphs[M]// Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 410-421

[9] Peel L, Clauset A. Detecting change points in the large-scale structure of evloving networks[C]// Proc. of the 29th International Conference on Artificial Intelligence. 2015: 2914-2920

[10] 杨家海，吴建平，安常青. 互联网络测量理论与应用[M]. 北京：人民邮电出版社，2009

[11] University of Oregon Route Views project [EB/OL]. http://www.routeviews.org/

[12] BGPMon [EB/OL]. http://www.bgpmon.net/internet-outage-in-lebanon-continues-for-days/

[13] Bgplay [EB/OL]. http://bgplay.routeviews.org