

通信网络节点重要度评估

李英聪

(中国科学技术大学信息科学技术学院，安徽 合肥，230026)

摘 要： 由于通信网络的无标度小世界特性，一些重要交换节点发生故障会给整个网络系统带来重大传输损耗，会极大影响系统通信的性能。因此本文结合数学拓扑结构相关知识，同时结合一定的传输数据重要性，提出一种基于最小权值平均路径的通信网络节点的重要度评估算法，旨在找到关键节点并进行提前的保护预防措施。文中采用现实通信模型进行仿真来例证算法的有效性。(https://github.com/A-bracadabra/NetCommunication.git)

关 键 词： 节点重要度 无向带权图 最短权值路径

0 引 言

通信技术一直是研究的热门。大数据时代，每时每刻都有成千上万的数据“走”在传输链路上，而通信的目标是快速而准确地对数据进行端到端传输。但是现实世界总会发生一些不可抗力因素，譬如大规模断电事故、自然灾害、仪器故障等，会改变原有的通信网络架构，使得数据传输延迟、数据堵塞甚至无法进行传送。因此我们必须提前对网络采取切实有效的保护措施使得可能损失降到最低。

由于通信终端数量庞大，因此通信网络中大部分节点彼此不想连，但为了实现数据传输的高效性，应该使得大部分的网络节点只要经过少数几个节点就能进行正常通信，因此这就要求通信网络具有小世界特性。同时通信网络不同于一般的随机网络，其中存在关键节点在整个网络系统中起到枢纽作用，因此通信网络又具有无标度特性。现实通信网络拓扑结构可以看成是一个复杂的无标度小世界网络，网络每个节点对于整个网络的重要性存在差异。文中引入基于网络拓扑结构的简单节点重要度评估算法，该算法除了考虑基本的拓扑结构外，还考虑了路径传输权值和节点数据权值，分别对应实际问题中的路径传输延迟和主机终端发送和接受数据量大小。

1 基于通信网络的数学建模

现实中的通信是个复杂抽象的问题，文中将通信网络用数学拓扑模型——“图”结构表示。对于 $G = \{V(G), E(G)\}$ ，其中 $V(G) = \{v_i \mid v_i \in V(G)\}$ 是非空顶点集合，对应通信网络中的交换节点和终端节点； $E(G) = \{e_{ij} \mid e_{ij} = v_i v_j \in E(G)\}$ 是边集合，表示节点 v_i 、 v_j 间连通，对应通信网络中的传输路径。

1.1 通信网络的无向带权图模型

通信网络不是简单的顶点图模型，因为传输性能还和链路类型、链路长度、结点性能等众多参数相关，因此需要对链路和结点都附上相应合理的权值，得到一个通信网络的无向带权图模型，其中边和节点都附有权值。

对每条链路给定权值函数 $weight(e_{ij})$ 表示路径 e_{ij} 的传输延迟（或传输损耗）；同理对每个结点给定重要性函数 $value(v_i)$ 表示节点 v_i 的数据量（或数据重要度）。其中需要注意两点：

- 对于不相连的结点，它们给他们附上极大权值（ ∞ ）确保路径选择时不会选择不存在路径；
- 对于一些特殊节点譬如交换机和路由器，它们在网络中作为节点连接多条链路，却只负责转发和路由，不会自主产生或消耗数据，因此对于此类节点，其重要性函数对应值为 0，以此确保其参与数据分流。

由此可得到节点权值矩阵（*Node*）和边权值矩阵（*Link*）如下（令节点数为 n ）：

$$Node = [va(v_1) \quad va(v_2) \quad \cdots \quad va(v_n)] \quad (1)$$

$$Link = \begin{bmatrix} w(e_{11}) & \cdots & w(e_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w(e_{n1}) & \cdots & w(e_{nn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 模型的理想化假设

由于现实通信网络的复杂性，动态性和不可预知性，我们很难给出完全符合的模型描述。在这里给出文中建模的依据和理想化条件来表明该方法在一定的测量维度和误差范围内是切实有效的。

- 假设终端节点发送接收数据量相等。由于存在数据的发送和接收，那么数据在链路上传输就具有方向性，因此更加精确的模型结构应该是有向带权图拓扑结构，其中边的方向表示数据传输的方向。将发送量大于接收量的节点称之为源，接收量大于发送量的节点称之为汇，每条边对应的权值称之为边容量，相当于该边在该方向上传输的数据量。则通信网络问题等价为满足网络最大流的最小权值路径问题，极大增大了算法复杂度。因此文中进行节点出入流量等价假设，每个节点都等价为非源非汇的交换节点，引入节点权值代表总出入数据量大小，如此不存在最大流的考量，算法极大简化。
- 假设计算节点属于同一级别网络。所谓同一级别网络是指该网络对应的节点具有相似属性和功能，譬如连通城市的光网络节点远距离传输数据，传输速率在 Tb 量级；而对于公司内部网络，则主要负责内部主机通信，传输速率为 Mb、Gb 量级。如此可见，城市通信节点必然比公司内部节点重要，进行比较没有意义。因此算法要求网络级别相同。
- 不考虑数据在节点的延迟和损耗。现实通信网络节点会有数据处理延迟。终端节点会有数据封装、数据检测等数据处理延时，而交换节点同样存在数据转发、路由、拥塞等导致的延时，并且不同交换机对应不同的性能产生不同的延时。文中忽略节点产生的延时，默认数据传输主要延时是传输延时。

虽无向带权图模型不能与通信网络结构完全等效，但基于以上假设可认为该模型与通信网络有相似性能，因此无向带权图可作为通信网络的近似数学结构，在此模型上进行节点重要度评估算法构建。

2 基于最小带权路径的节点删除算法

高效的通信要求满足最小的数据传输延迟，因此一旦通信网络搭建完成，在不改变其网络结构基础上，理论上对于每两点通信具有一条最短的路径，为了实现数据传输的高效性，文中默认数据传输路径为最短延时路径。

2.1 加权平均最短路径长度

图论中已进行过很多关于带权图最短路径的研究，因此对于任两个节点 i, j ，将其最短加权路径记为 l_{ij} ，则可得到最短加权路径矩阵 (L_{WMI}):

$$L_{WMI} = \begin{bmatrix} l_{11} & \cdots & l_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & \cdots & l_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对节点权值矩阵进行权值联合展开，即将单个节点的权值扩展成于其他 $n - 1$ 个节点的联合权值，由此可得到联合节点权值矩阵 ($Joint_Node^0$):

$$\begin{aligned} Joint_Node^0 &= (Node^T)(Node) \\ &= \begin{bmatrix} va(v_1) \cdot va(v_1) & \cdots & va(v_1) \cdot va(v_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ va(v_n) \cdot va(v_1) & \cdots & va(v_n) \cdot va(v_n) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

将联合矩阵归一化。其中由于节点数据是按权值分配给其他 $n - 1$ 个节点，因此矩阵对角线权值数值上为 0，因此考虑该因素的归一化值为 (SUM):

$$\begin{aligned} SUM &= 2 \sum_{i,j,i \neq j}^n va(v_i) \cdot va(v_j) \\ &= \left(\sum_{i=0}^n va(v_i) \right)^2 - \sum_{i=0}^n va(v_i)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

由此可得到归一化联合矩阵 ($Joint_Node$):

$$Joint_Node = \frac{1}{SUM} \begin{bmatrix} 0 & \cdots & va(v_1) \cdot va(v_n) \\ va(v_2) \cdot va(v_1) & \ddots & \vdots \\ \vdots & va(v_{n-1}) \cdot va(v_n) & \vdots \\ va(v_n) \cdot va(v_1) & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据得到的归一化权值矩阵 ($Joint_Node$) 和最短加权路径矩阵 ($WAMI$), 最终可得到整个网络的加权平均最短路径长度 ($WAMI$):

$$WAMI = \sum_{i,j}^n (l_{WAMI}^{i,j}) (joint_node^{i,j}) \quad (7)$$

其中, $l_{WAMI}^{i,j}$, $joint_node^{i,j}$ 分别表示矩阵 L_{WAMI} , $Joint_Node$ 第 i 行 j 列的值。

2.2 节点重要度评估算法

对于节点的重要度评估, 可以考究结点失效时的效率降低程度, 因此文中引入节点删除法, 即删除评估节点, 并考察变化后网络的加权平均最短路径变化。变化越大, 则说明该结点的重要度越大。同时该方法可在求取多个节点的联合重要度时同样有效。

令原通信网络为图 G , 删除结点的集合为 DN , 删除节点后的网络为图 G' , 同时引入图 G 网络的最长最短加权路径进行归一化, 则有:

$$l_{max} = \max_{i,j=1,2,\dots,n} l_{ij}(G) \quad (8)$$

最终得到重要度评估算法:

$$\alpha(DN) = \frac{WAMI(G') - WAMI(G)}{l_{max}} \quad (9)$$

由于不同网络的最长最短加权路径存在较大差异, 因此评估结果的比较只在当前网络有意义。

3 实例分析

本文采用 C++ 进行算法实现, 其中最短权值路径采用荷兰科学家 Dijkstra 于 1956 年提出的 Dijkstra 算法进行计算。

3.1 实验数据

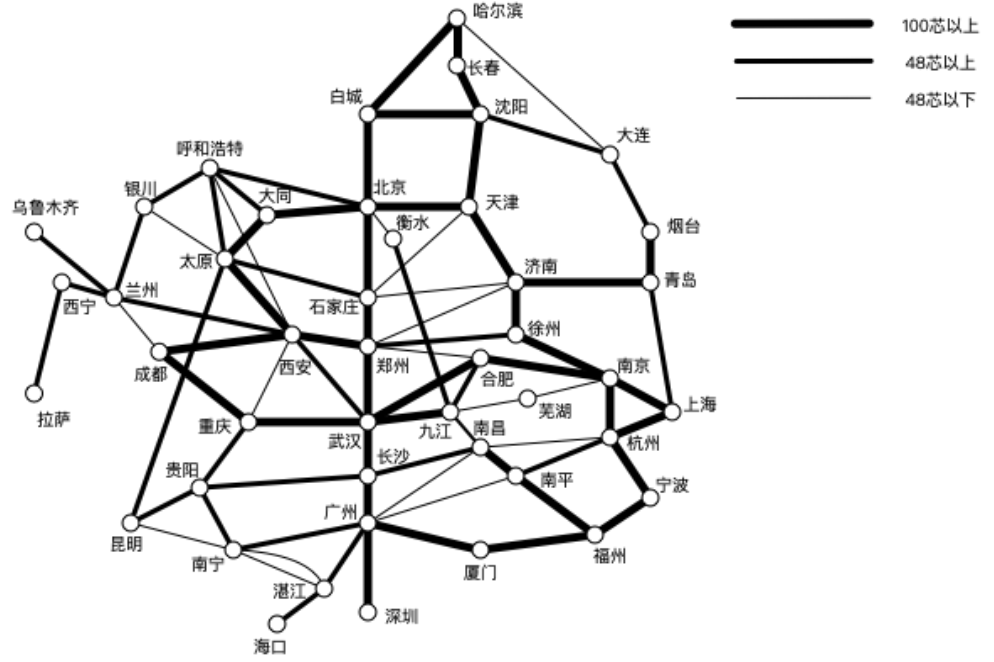


图 1 中国城市光缆大致分布网络图

采用图 1 所示的通信网结构进行实验，该图展示的是中国城市高速光纤网的大致搭建情况。其中存在三种光缆类别分别为 100 芯以上光缆、48 芯以上 100 芯以下光缆和 48 芯以下光缆，不同光缆的传播速度有很大差别，其中假设三种光纤的传播速度比值为：100 : 48 : 24，将其作为节点间传播延迟的考量。其次由于城市间远距离传播，链路上存在延迟，因此同样将城市间距离（ d ）作为链路传播延迟考量，最终得到链路权值公式：

$$w(e_{ij}) = \frac{d_{ij}}{K} \quad K = 100, 48, 24 \quad (10)$$

其中 $w(e_{ij})$ 表示连接节点 i, j 的链路权重, d_{ij} 表示节点 i, j 的实地直线距离, K 表示光缆类型参数, K 值为 100 表示该光缆为 100 芯以上光缆, K 值为 48 表示该光缆为 48 芯以上 100 芯以下光缆, K 值为 24 表示该光缆为 48 芯以下光缆。

节点权值应对于节点数据量。由于该部分数据获取困难，文中参考 2017 年度全年城市 GDP 作为节点权值参数。

3.2 实验结果

建立算法计算不同城市光纤网节点的重要度，得到结果。根据实验结果数据可将节点类型分为三类：

1. 改变原图连通性的桥节点

根据运算结果，有部分节点计算得到重要度大于 1，不在归一化范围内。这是由于这一类节点破坏了原有图结构的连通性，导致不同连通片间节点无法正常通信，称这类节点为桥节点。程序中给不连通的节点赋予极大路径权值（1000000），一旦变化后网络不连通，平均路径长度必然会大大超过原网络的最长最短路径（ l_{max} ），因此计算得到结果不在 [0,1] 区间。下面给出例子中的桥节点及其重要度。

表 1 桥节点重要度排序

排序 (由高至低)	桥节点	
	节点名称	重要度
1	广州	1791.96
2	兰州	360.551
3	湛江	111.966
4	西宁	38.5114

以“广州”节点为例，一旦该节点失效，则原图产生两个连通片，其中一个连通片中只含有深圳这一个节点，导致深圳与所有其他城市链接阻断，损失巨大。由于桥节点的特殊性，因此通信网络架构设计时应尽量避免出现桥节点。

桥节点重要度算法评估会相对高于正常节点，因此不能拿来与一般节点进行比较，但桥节点之间则可以进行比较判断不同桥节点的重要度。上例中存在四个桥节点，其中“广州”桥节点重要度最高，“西宁”则重要度最低。

2. 不影响其他城市通信的边缘节点

根据运算结果，有部分节点计算得到重要度值为 0。这是由于这部分节点只会影响自己与其他节点的通信，不会影响除自身之外的其他任意两个节点的通信，简而言之，

其他任一节点的最小权值路不经过该节点。由于该节点一般位于网络边缘位置，将其称之为边缘节点。下面给出例子中的边缘节点及其节点权值。

表 2 边缘节点重要度（节点权值）排序

排序 (由高到低)	边缘节点（重要度=0）		排序 (由高到低)	边缘节点（重要度=0）	
	节点名称	节点权值		节点名称	节点权值
1	上海	30633.0	5	乌鲁木齐	2743.8
2	深圳	22490.1	6	衡水	1550.1
3	昆明	4857.6	7	海口	1390.6
4	芜湖	3065.5	8	拉萨	479.3

对于边缘节点而言，计算出的节点重要度为 0，因此同样无法与一般节点进行比较。但是边缘节点之间可以根据节点权值进行比较。实验中采用 2017 年城市全年 GDP 作为节点权值（单位：亿元），由于归一化算法中有进行归一化处理，因此在此不限制节点权值范围，但需要保证所有节点具有统一的权值考量标准。由此可看出，在边缘节点中，由于城市发展水平最高，“上海”节点具有最高重要度，相反的“拉萨”节点重要度最低。

其中边缘节点又可以分为两类：叶子节点和非叶子结点。上表中，结构网络图结构，“深圳”、“乌鲁木齐”、“海口”和“拉萨”四个节点为叶子节点，都分别只与一个城市直接相连，其余四个是非叶子结点。其中由于图本身拓扑结构的性质，叶子节点一定属于边缘节点。

3. 不属于第一类和第二类的中心节点

除了桥节点和边缘节点，网络图中大部分节点既不会影响网络连通性，又与其他节点间的通信相关。由于该类节点大部分位于网络的中心位置，因此称该类节点为中心节点。中心节点的重要度评估算法结果一般处在 $[0,1]$ 范围内，根据结果排序可以得到不同节点的重要度。其中需要注意的事，由于每个网络的归一化标准有很大差异，因此计算数值不存在太大参考意义，但是单个网络的节点间可以进行排序比较。下面给出例子

中的中心节点及其重要度排序。

表3 中心节点重要度排序

排序 (由高到低)	中心节点		排序 (由高到低)	中心节点	
	节点名称	重要度/ 10^{-2}		节点名称	重要度/ 10^{-2}
1	武汉	3.2839	18	沈阳	0.2826
2	南京	2.9965	19	宁波	0.2457
3	济南	2.0785	20	九江	0.2122
4	徐州	1.5605	21	厦门	0.2017
5	天津	1.3798	22	南昌	0.1177
6	长沙	1.3302	23	南平	0.1103
7	合肥	1.2269	24	大同	0.1019
8	青岛	1.0300	25	呼和浩特	0.0614
9	杭州	0.9249	26	太原	0.0445
10	西安	0.7809	27	贵阳	0.0429
11	北京	0.7599	28	白城	0.0370
12	郑州	0.6918	29	长春	0.0227
13	重庆	0.4595	30	南宁	0.0142
14	烟台	0.3532	31	大连	0.0096
15	石家庄	0.3382	32	银川	0.0013
16	福州	0.3298	33	哈尔滨	0.0002
17	成都	0.3092			

根据节点的重要的排序，绘制图 2 观察不同重要度节点的分布情况。

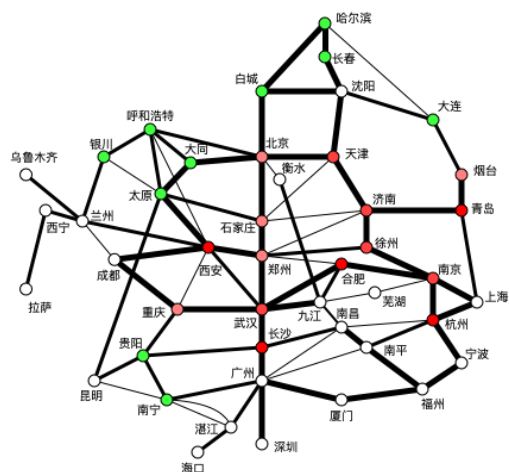


图 2 不同重要度中心节点分布

其中，红色节点为重要度最高的 15 个节点，绿色节点为重要度最低的 10 个节点。从图中可以看出，重要度高的节点分布在中部以东区域，而重要度低的节点则分布在偏西北部。可见拓扑图结构和节点权值对于节点重要度影响很大。

根据实验结果，可见该算法能够很好的区分桥节点、边缘节点和中心节点，同时可以实现对不同类别节点的排序，排序结果符合尝试认知。

3.3 实验拓展

除了研究单个节点的重要度，该算法同样适合研究节点的联合重要度，即多个节点同时失效时的重要度考量。下面选取排名前八的中心节点进行两个节点的联合重要度评估，评估结果排名如下：

表 4 中心节点联合重要度排序

排序 (由高到低)	中心节点		排序 (由高到低)	中心节点	
	节点集合	联合重要度/ 10^{-2}		节点集合	联合重要度/ 10^{-2}
1	{1, 2}	8.743	15	{3, 7}	3.443
2	{1, 4}	7.909	16	{1, 6}	3.434
3	{1, 3}	7.296	17	{6, 8}	2.939
4	{1, 5}	6.302	18	{4, 7}	2.927
5	{2, 6}	5.239	19	{5, 7}	2.882
6	{2, 8}	5.172	20	{2, 4}	2.777
7	{1, 8}	4.943	21	{6, 7}	2.772
8	{2, 3}	4.642	22	{2, 7}	2.686
9	{3, 6}	4.244	23	{3, 8}	2.588
10	{2, 5}	4.093	24	{3, 5}	2.517
11	{4, 6}	3.705	25	{4, 8}	2.406
12	{1, 7}	3.617	26	{4, 5}	2.203
13	{5, 6}	3.588	27	{7, 8}	2.168
14	{5, 8}	3.556	28	{3, 4}	1.773

其中，节点集合中的数字表示该中心节点在表 3 中的排名，由此得到前八中心节点的联合重要性排序。同理同样可以得到多个 (≥ 3) 节点的联合重要度排序。

4 结 语

经过实验分析，文中算法在一定意义上具有参考价值。文中将图论模型引入通信网络分析，并解释了模型的可行性假设，再通过平均加权最小路径和节点删除法进行节点重要性评估。同时文中以实验示例为例，明确地将网络节点分为三类，不同类别的评估标准有一定差异，总体而言，桥节点的重要性最高，边缘节点的重要性最低，但同一类别节点具有统一评估标准。最后文中还给出了联合重要性评估示例，旨在说明该算法的可行性和扩展性。

参考文献:

- [1] Watts D J , Strogatz S H . Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998.
- [2] Barabasi A L , Albert R . Emergence of scaling in random networks[J]. 1999.
- [3] 谢琼瑶, 邓长虹, 赵红生. 基于有权网络模型的电力网节点重要度评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4):21-24.
- [4] 张珍, 张振宇, 宋蔓蔓. 一种基于最短路径介数的重要节点发现算法[J]. 计算机工程与应用, 2013(21).
- [5] 赵志远, 孟相如, 孙瑞男. 基于多属性评估与删除的节点重要度排序方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(6):62-67.