

智能光网络的复杂网络特性实证研究

朱恩黎, 张引发, 刘 乾
(西安通信学院, 西安 710106)

摘要:随着光通信技术的不断发展,光网络的结构也变得越来越复杂,而复杂网络理论能分析实际系统的性质。从智能光网络的拓扑结构出发研究其复杂网络特性,首先对近两年某区域智能光网络故障数据进行分析,其次对智能光网络进行拓扑建模,计算网络的聚类系数和平均路径长度,从而分析网络性能。实证研究表明,智能光网络是一个小世界网络,并且其故障分布、度分布都符合幂律分布,该网络具有无标度特性。该结论为下一步研究智能光网络自组织临界性奠定基础。

关键词:智能光网络;拓扑结构;小世界;无标度

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)01-0009-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.01.003

Empirical study of complex network characteristic of intelligent optical network

ZHU Enli, ZHANG Yinfa, LIU Qian
(Xi'an Communication Institution, Xi'an 710106, China)

Abstract: With the development of optical communication technology, the structure of optical networks become more and more complex, and the complex theory can analyze the character of the real system. This paper proceeds from topological structure of the intelligent optical network to analysis its complexity, firstly, makes the data of a regional intelligent optical networks failure analysis in the past two years, secondly, through topology modeling, calculates the clustering coefficient and average path length of the intelligent optical network to analysis its performance. Experiment result proves that the intelligent optical network is a small-world network, its faults distribution and node degree distribution accord power-law properties showed this optical network has scale-free characteristics. It lays the foundation for discussing self-organized criticality of intelligent optical networks.

Key words: intelligent optical network; topological structure; small-world; scale-free

0 引言

传统光网络的设计是基于语音业务的,故其拓扑结构主要为简单的线形和环形结构,在业务配置时,需要逐环、逐点的配置,难以实时管理,而在实际运营过程中,也不能根据业务分布的变化动态地改变光网络的逻辑拓扑结构。因此,智能光网络应运而生。以环网为主的传统光网络的主要保护机制为环网保护,由于环网保护需要预留一半的网络资源,因此其带宽利

用率较低。而基于网状网的智能光网络不仅能提供如 1:1、1+1 和 $M:N$ 通道保护措施,还可以提供灵活的恢复机制,这些恢复机制不但反应快,而且能有效节约光网络资源。但是,由于网络容量及规模的拓展远远赶不上用户需求的爆炸式增长,光网络运行一段时间后,就可能发生拥塞现象。现阶段,从拥塞控制技术^[1,2]、波长分配及路由选择^[3]这些方面研究智能光网络拥塞的成果已有很多,但从本质出发,通过分析智能光网络拓扑结构,判定其性质,从而对其业务流量进行优化控制的研究还相对较少。

通过研究发现,复杂网络理论^[4]能从网络的拓扑

收稿日期:2017-08-14。

作者简介:朱恩黎(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为军事信息网建设应用与管理。

结构入手,计算其基本特征参数,进一步分析网络的性质。该理论起源于1736年著名数学家欧拉对“哥尼斯堡七桥问题”的论证,经过数百年的发展,直至1998年Watts和Strogatz分别提出小世界^[5]和无标度模型^[6],开启了复杂网络理论研究的新时期,具有重大意义。因此,本文对智能光网络的复杂特性进行研究。

1 复杂网络理论的基本概念

复杂网络理论是研究智能光网络性质的可取方法,要对智能光网络进行拓扑建模,首先需要了解复杂网络理论中基本特征参数的计算方法。

1.1 特征参数

1.1.1 度分布 $p(K)$

度分布是对一个图(网络)中顶点(节点)度数 K 的总体描述,即在一个有 n 个节点的网络中随机选择一个节点 i ,它的度刚好是 K 的概率,表达式为:

$$p(K)=n_K/n \quad (1)$$

网络的度分布能表达整个网络的统计特性和节点 i 在网络中的重要程度。

1.1.2 聚类系数 C

聚类系数为网络中任意两节点间相连的概率,反映了网络整体的紧密程度。具体表述为:先假设节点 i 在网络中的度为 k_i ,即该节点有 k_i 个邻居节点,那么它的邻居节点之间最多可能存在 $k_i(k_i-1)/2$ 条连线;再假设 k_i 个邻居节点之间有 e_i 条边,那么节点 i 的聚类系数表示为:

$$C_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)} \quad (2)$$

由此可以得到网络的平均聚类系数,即:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

1.1.3 平均路径长度 L

平均路径长度 L 是指网络中所有节点对之间的最短路径的算术平均值。在复杂网络里,节点 i 和节点 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点的最短路径的边数,平均路径长度就是所有节点对间距离的均值,表示为:

$$L = \frac{\sum_{i \neq j} d_{ij}/2}{C_n C_{n-1}/2} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (4)$$

1.2 小世界和无标度特性

1.2.1 小世界特性

光信号在网络的传输过程中要考虑光纤损耗和时

延对传输质量的影响,这两个因素恰好与传输路径的长度成正比。而具有小世界特性的网络具有较短的平均路径长度和较高的聚类系数,那么就可以推断光信号在小世界网络中的传输会更高效。因此,本文对发展到一定规模的智能光网络是否具有小世界特性进行研究。

复杂网络具有小世界特性的一般表现为具有较大的平均路径长度和很大的聚类系数。通常研究一个实际网络是否具有小世界特性时,首先需生成一个与该网络具有相同节点个数和平均度的随机网络,用 C_{random} 和 L_{random} 分别表示随机网络的聚类系数与平均路径长度,即 $C_{\text{random}} = \frac{k}{n}$, $L_{\text{random}} \approx \frac{\ln n}{\ln k}$ 。通过计算,将随机网络的数值与实际网络进行对比,若满足 $L \geq L_{\text{random}}$, $C \gg C_{\text{random}}$,则该网络具有小世界特性。

1.2.2 无标度特性

无标度网络一般具有异质性,也就是说网络中只有少数称之为 Hub 点的节点拥有非常多的连接,其它节点只有少量的连接,这就使得 Hub 节点对无标度网络的运行起着主导作用,从广义上说,无标度性是描述大量复杂系统整体上严重不均匀分布的一种内在性质。无标度的判断标志为网络中节点度数服从幂律分布 $p(K) \sim cK^{-\gamma}$,其中 c 为常数, γ 为幂指数。因此,需要将网络的度分布在双对数坐标下进行拟合,若拟合结果为一条直线且能通过显著性检验,则该网络具有无标度特性。

2 智能光网络故障分析

本文对2015~2016年某区域智能光网络发生故障的相关数据进行统计,包括发生故障的干线、故障原因和故障持续时间等相关信息。从统计数据可知,当故障时间大于等于5小时时,波及的范围变得广泛,因此,将故障持续时间近似为故障发生的规模。仿真时,以故障持续时间的对数为横坐标,该时间段内故障发生的频率近似为概率,取其对数为纵坐标,将散落的点进行拟合,结果如图1和图2所示。

我们对图1和图2中拟合直线的相关系数进行显著性检验,该检验方式主要是在某一显著性水平下将拟合直线的相关系数与显著性水平检验标准表中的标准值进行对比,实际值大于标准值则表示通过检验,拟合方程有效。显著性水平一般有 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 两种,本文选取后者。

仿真结果如下:2015年拟合曲线的相关系数 $R=$

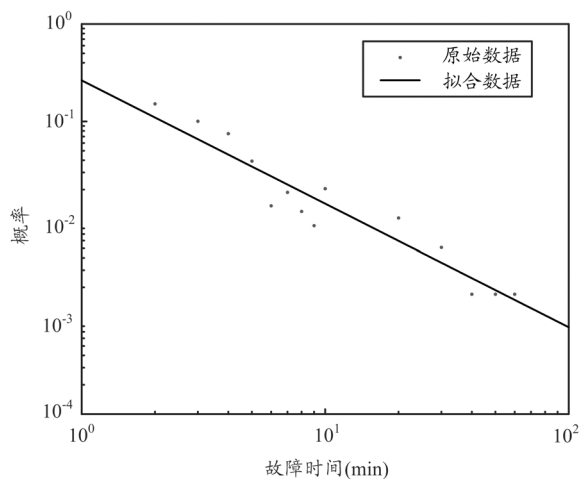


图1 2015年故障情况

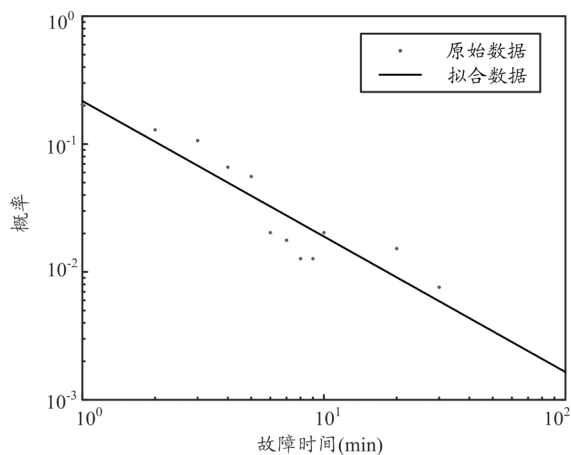


图2 2016年故障情况

-0.5357 , 满足 $|R| > R_{0.05} = 0.514$, 通过检验; 2016年拟合曲线的相关系数 $R = -0.5888$, 也满足 $|R| > R_{0.05} = 0.576$, 通过检验。以上结果表明2015年和2016年故障情况的拟合方程有效。

另外, 本文分析2015年和2016年某区域的智能光网络故障概率统计特性得出: 其故障情况能在双对数坐标系下拟合成一条直线, 符合幂律分布特性。为了进一步说明智能光网络具备的复杂特性, 我们对网络建模, 分析其拓扑结构以得出结论。

3 智能光网络拓扑建模和仿真验证

3.1 建模步骤

本文结合文献[7]中的基本方法, 将光网络的拓扑结构简化为若干给定的点及连接两点的线所构成的图形, 具体步骤如下。

①研究对象仅限于某地区的光网络架构, 不考虑跨区域骨干层的网络连接。

②将一个站抽象为网络模型的一个节点, 共有 n 个站, 即为 n 个节点, 所有节点一视同仁, 没有区别。

③所有站点之间的链路视为网络拓扑模型中的边, 所有边为无向、无权边。

根据上述步骤, 将某智能光网络简化为一个有 n 个节点、 m 条边的连通图。为了验证其小世界特性, 需考虑网络图的邻接矩阵 M_{ij} , 规则为: 如果节点 i 和 j 之间有直接连接的链路, 则邻接矩阵 M_{ij} 中的元素 $m_{ij} = 1$; 反之, $m_{ij} = 0$ 。

3.2 仿真分析

3.2.1 实例验证小世界特性

我们以某智能光网络结构为例, 该网络共52个站点, 95条链路, 按照前文提出的步骤将网络拓扑图简化为简单图, 生成该地区的智能光网络模型, 其拓扑图如图3所示。图中节点和连接均不表示地理位置, 只表示实际连接。

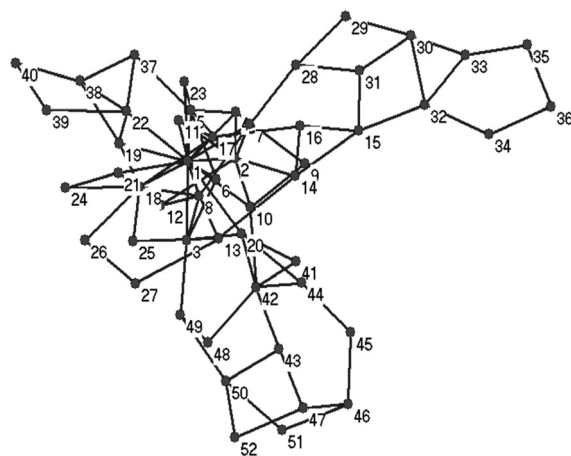


图3 某智能光网络拓扑结构

同时计算实际网络和与其同等规模的随机网络的平均路径长度和聚类系数, 得到实际网络的聚类系数 $C = 0.2143$, 平均路径长度 $L = 3.8303$; 随机网络的聚类系数 $C_{\text{random}} = 0.0632$, 平均路径长度 $L_{\text{random}} = 3.1002$ 。对比可得 $C/C_{\text{random}} = 3.3908$, 两个网络的聚类系数成倍数关系, 而两个网络的平均路径长度相差不大。这表明该实际智能光网络具有比同等规模随机网络大很多的聚类系数和相对较大的平均路径长度, 即满足 $L \geq L_{\text{random}}$, $C \gg C_{\text{random}}$, 表现出一定的小世界特性。

3.2.2 实例验证节点度分布特性

在复杂网络中, 节点度 K 是一个重要的特征参数, 本文现在对上述网络进行分析, 画出节点度数的概率分布图, 具体如图4所示。

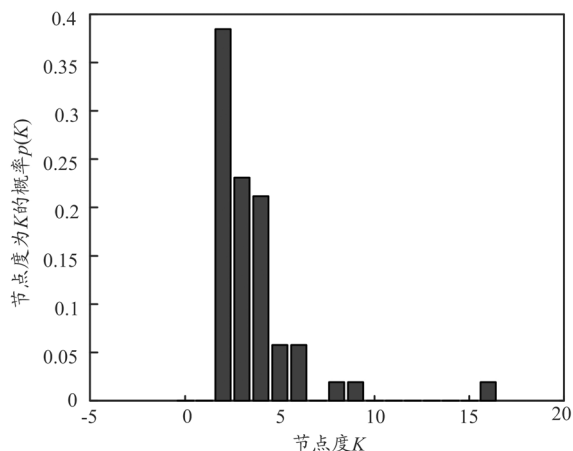


图4 网络图中节点度的概率分布图

由图4可知,本文研究的实际智能光网络的节点度位于2~16之间。节点的最小度为2,说明在实际网络中,至少有两条不同方向的光缆链路将节点连接起来,这种连接使得节点间通信的可靠性高,失效的风险较小。用最小二乘法对节点度数进行拟合,得出拟合直线如图5所示。

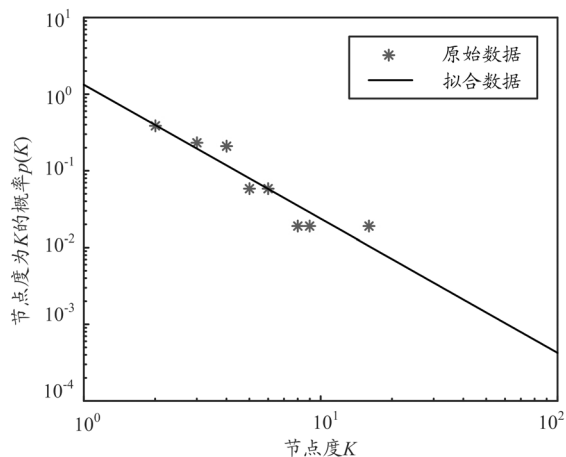


图5 节点度分布拟合曲线

经验证,本文研究的实际智能光网络的节点度分布拟合曲线的相关系数 $R=-0.7185$, $|R| > R_{005}=0.707$, 即通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 下的检验,此拟合方程有效。这证明该智能光网络的度分布满足幂律分布

$p(K) \sim cK^{-\gamma}$, $\gamma=-1.7482$, 并且具有少量度数大的“Hub”节点,有无标度特性。

综上所述,本文研究的实际智能光网络具有小世界特性和典型的无标度特性,节点度符合2~16之间的幂律分布特性。

4 结束语

本文结合复杂网络理论的相关知识,对某智能光网络进行拓扑建模,并对其特性进行分析,得出结论:智能光网络组网方式由单一或简单的环状网逐步向多个环状网或网状网组网发展,网络趋向扁平化,节点的平均度增加,其逐步演化而形成的网络拓扑结构与同等规模的随机网络相比,具有较大的平均路径长度和大得多的聚类系数,符合小世界特性的判据条件,属于小世界网络;智能光网络的网络架构已经处于稳定状态,节点度符合位于2~16区间内有限空间的幂律分布,说明该网络具有明显的无标度特性。本文得出了智能光网络的故障分布和度分布均符合幂律分布的结论,这是光网络具有自组织临界性的判定条件,下一步我们将针对智能光网络的自组织临界性作进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨婷婷. 基于软抢占智能光网络拥塞控制路由算法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [2] 华楠. 智能光网络的拥塞控制技术[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [3] WAN X, LI Y, ZHANG H, et al. Dynamic traffic grooming in flexible multi-layer IP/optical networks [J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16 (12): 2079-2082.
- [4] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [5] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small world networks"[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [6] BARABASI A L, REKA Albert. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [7] 王海英, 黄强, 李传涛, 等. 图论算法及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

优秀论文评选活动公告

为推动光通信技术的发展,促进技术交流,活跃学术气氛,广开科研思路、加强科技合作,及时刊登本领域的前沿信息,努力开阔广大科研人员的学术和技术视野,从2006年第1期开始,本刊根据文章质量评选优秀论文,获得优秀论文的作者由本刊给予一定额度的奖金。敬请广大作者积极支持我们的工作,踊跃佳作,与我们共同携手把《光通信技术》办得更好。