

地理相关故障光网络脆弱性评估

张引发¹, 王鲸鱼¹, 邓宏钟², 廖晓闽¹

(1.西安通信学院,陕西西安,710106;2.国防科技大学信息系统与管理学院,湖南长沙,410073)

摘要 针对地理分布光网络的脆弱性,给出了构建地理灾难模型与光网络脆弱性研究的方法;提出了一种地理灾难相关故障模型仿真现实的灾难情况和相关链路故障的情况,并分析了灾难之间的相关性。围绕地理灾难相关故障和相关链路故障,通过选择高斯函数的方差、交互参数 c 和半径 R 聚类分析了 2 种类型(抑制型和群集型)4 种灾难场景;通过计算 4 种灾难场景的可靠性,得出网络最有效攻击范围为 200 km 和攻击类型为群集性灾难;采用最有效的灾难对实际的网络拓扑进行仿真,仿真结果表明采用本方案能够获得光网络脆弱区域,且降低了算法时间的复杂度。

关键词 光网络;相关故障;地理分布;脆弱性;可靠性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.015

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0063-05

Assessing the Vulnerability of Optical Network of Geography Correlated Failures

ZHANG Yin-fa¹, WANG Jing-yu¹, DENG Hong-zhong², LIAO Xiao-min¹

(1. Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China; 2. Information System & Management School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to the vulnerability of the optical network from the Geography Distribution, this paper gives a method of constructing the model of geographical disaster and researching the vulnerability of optical network. The paper also proposes a spatial probabilistic model to simulate the disaster of real-world scenarios and correlated link failures and simultaneously analyzes the correlation among the disasters. According to correlated link failures of geographical disaster, the four scenarios of disaster of the two classes those are of inhibition and clustering are analyzed by choosing the variance, radial and probability density. By computing the reliability of the four scenarios of disaster, the conclusion is obtained that the most effective range is 200 km and the type of the attack is of clustering disaster. Then the most effective attack is adopted to simulate in the actual network topology, the result shows that the use of this scheme can capture the vulnerable region and reduce the time complexity of algorithm.

Key words: optical network; correlated failures; geography distribution; vulnerability; reliability

随着光纤容量与日俱增,大量重要的信息经过光纤网络传输,如视频,数据,话音等。光纤网络一旦出现故障,将造成很严重的后果。光纤通信网络

易受到自然灾害(如地震、洪水等)和人为有意(电磁炸弹)或无意(建筑施工)的攻击破坏^[1-2]。例如,2008年中国汶川地震导致 30 000 km 的光纤和

收稿日期:2012-11-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61179002;61072125);陕西省自然科学基金资助项目(2011JM8030)

作者简介:张引发(1964—),男,浙江湖州人,教授,主要从事光传送网关键技术研究。

E-mail:junxiao2010@sina.cn

4 000个通信站被破坏^[3]。近几年已经有学者开始关注地理分布的光纤网络的脆弱性,然而大多数工作仅考虑少数的孤立链路故障情况且算法复杂度高^[4]。也有学者开始关注地理相关故障对光网络的脆弱性影响^[4-5],但对灾难环境的仿真不够理想。文献[4]通过构建概率模型研究光网络的脆弱性,在业务范畴考虑的结果造成算法的复杂度相对较高。文献[5]基于可靠性研究光网络的脆弱性,给出了破坏的范围,它只考虑了圆形切割,对破坏网络的灾难事件的仿真不理想。文献[6]采用最坏切割算法给出了网络的脆弱区域,没有考虑多重灾难情况下的相关故障,且采用算法的复杂度高。

1 地理灾难相关故障模型

在地理域上研究光网络的脆弱性,必须围绕如何构建地理灾难、地理灾难造成的网络相关性故障等问题探讨。本文针对灾难事件随机性和空间相关性^[7],采用概率论的方法对多种外部攻击造成通信网络相关链路故障情况建模,提出了一种确定空间相关的灾难事件造成链路故障发生的方法。

1.1 地理灾难的构建

步骤 1 构建仿真灾难的场景。地理灾难具有群集或抑制性,Strauss 提出的模型能够很好地处理群集或抑制问题^[7]。本文采用 Strauss 模型仿真灾难的场景。根据灾难发生具有随机性,因此地理灾难的分布具有均匀和不均匀 2 种情况,由文献[7]可知,灾难分布过程属于泊松点过程。

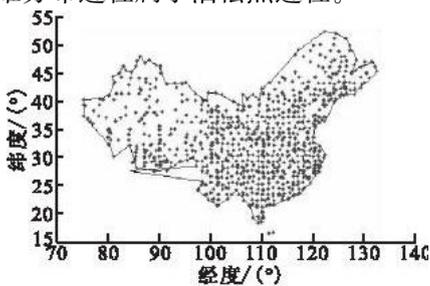


图 1 泊松点过程图

Fig. 1 Poisson point process

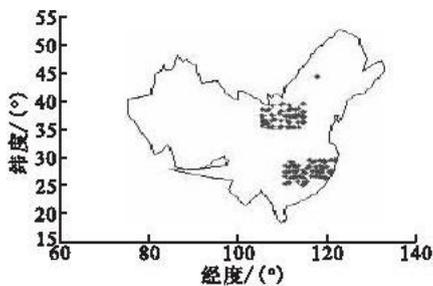
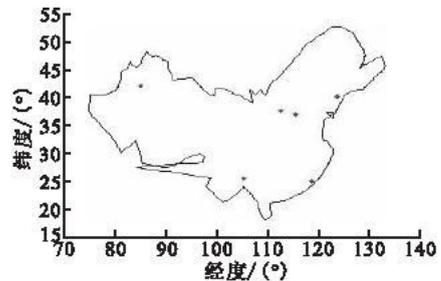


图 2 2 个集中位置的不均匀点过程图

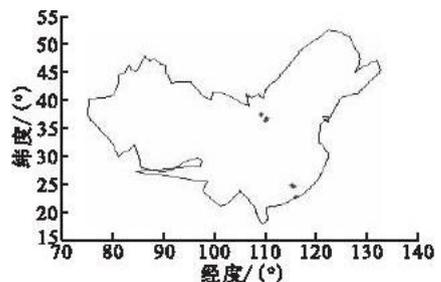
Fig. 2 No uniform point process with two central location

图 1 为平面上均匀泊松点过程。在这种情况下,事件可能发生在平面的任何区域,即这种结果是由均匀密度函数导致的^[9]。而图 2 有 2 个集中位置的不均匀点过程。集中事件的不均匀性受变量的密度函数影响。例如,当灾难事件发生比较集中时,可以将这一区域的密度函数设置为最大值。

步骤 2 利用交互点模型得到事件之间的空间不均匀性和空间交互性。假设在某一区域一个事件的发生影响其临近区域其他事件的发生概率,即是抑制和群集(簇)问题^[7]。如果可能性降低,则称作抑制;如果可能性增加,则称作群集。Strauss 模型是处理抑制和群集问题简单而有效的方法^[7]。采用文献[10]的算法实现 Strauss 的点过程。图 3 所示为不均匀密度函数(图 1)与中心之间的抑制和群集的 Strauss 的点过程的实现结果。图 3(a)、(b)分别为事件中心之间抑制的实现和群集的实现。



(a) 事件中心之间抑制的实现



(b) 群集的实现

图 3 抑制和群集的 Strauss 点过程图

Fig. 3 Strauss point process with inhibition and clustering

关于控制各种灾难事件发生的关键参数,需要引用文献[9]的两两交互点过程类型。

令 F 为平面上有限的子集,随机向量的交互点过程为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的概率密度函数为:

$$f(x) = A^{-1} \prod_{1 \leq i < j \leq n} g(x_i) \prod_{1 \leq i < j \leq n} \varphi(\|x_i - x_j\|) \quad (1)$$

式中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in F^n$; $\|\cdot\|$ 表示欧几里得距离的模函数; A 表示标准化常数^[9]; g 表示点分布的密度函数; 函数 φ 表示交互函数,事件的交互性或相关性可以通过函数 φ 定义。例如,在 Strauss 模型中,对于半径为 R 范围内的一组点对, φ 等于具

体的值 c ; 否则为 1。由此 Strauss 点过程的密度函数为:

$$f(x) = A^{-1} e^{S_x(R)} \quad (2)$$

式中 $R > 0$ 且

$$S_x(R) = \sum_{1 \leq i < j \leq n} I_{(0,R]}(\|x_i - x_j\|) \quad (3)$$

式(3)表示在 x 中坐标点对的数目, 对于任何集合 $b \in B$, 有 $I_b(b) = 1$; $b \notin B$, 有 $I_b(b) = 0$ 。由 Strauss 的模型的概率密度函数得 $c > 1$ 将产生群集; $c < 1$ 将产生抑制; $c = 1$ 将产生随机泊松分布。另外, 在 Strauss 模型中, 参数 R 控制一组点对之间的交互范围。

步骤 3 对于地理平面上的所有点, 定义物理破坏的条件的似然函数为 $CL_{pd}(y), y \in R^2$ 。

定义链路 e 遭受攻击后发生故障的概率为 $\max_{e \in e}(CL_{pd}(y))$ 。由于高斯函数对构造灾难的范围和密度比较合适^[4], 因此, 利用每个攻击中心的高斯函数定义平面上点的破坏密度。高斯函数的方差能够控制高斯曲线的宽度, 即灾难事件的密度。把多重灾难事件顶上的高斯函数加起来标准化输出 $CL_{pd}(\cdot)$ 。

由链路的物理故障独立性, 物理故障之间的相关性与具有 CL_{pd} 的灾难事件中心的相关性和灾难中心链路间的邻近性有关。

1.2 相关性研究

通过设置 Strauss 模型的参数 c 和 R 与高斯函数的变量可以获得在平面上不均匀灾难之间的空间相关性, 即当 $c < 1$ 时, 造成网络的构件与灾难中心的相关性, 相关性可通过式(4)得出:

$$f(q, p) = \beta e^{-\alpha d(q, p)^2} \quad (4)$$

式中: q 为网络构件; p 为灾难的中心; $d(q, p)$ 表示 p 与 q 之间的欧几里得距离; $\alpha, \beta > 0$ 使得分布为标准化的正态分布。

当 $c \geq 1$ 时, 通过选择 R 与高斯函数的方差, 确定多个灾难之间的相关性与网络构件之间的相关性, 由式(5)可以得出这种情况下的相关性。

$$f_\pi(p) = 1 - \prod_{q \in \pi} (1 - f_q(p)) \quad (5)$$

式中 π 为 R 范围内灾难的集合。

2 脆弱性评估模型

2.1 基于可靠性的评估模型

平均两终端的可靠性指的是网络遭受攻击后, 对于给定一对节点 s, d 他们仍然保持连通的概率; 用 $\chi(Q, P)$ 表示网络遭受来自攻击位置 P 处的攻击

之后, 仍然保持连通的节点对数。

$$\chi(Q, P) = \frac{1}{|V|^2} \sum_{i, j \in V} \chi^{ij}(P) \quad (6)$$

式中 $\chi^{ij}(P)$ 表示在给定攻击位置集合 P 之后 i 与 j 连通的概率。 χ 的数量表示网络遭受攻击后的连通度的测度。对于整数 $k \geq 1$, 令 $\chi(Q, k) = \max_{|P|=k} \chi(Q, P)$ 和 $\chi(Q) = \chi(Q, 1)$ 。

令 $Q = \{q^1, q^2, \dots, q^m\}$ 表示简单构件的集合, ϵ 为大于 0 小于 $\frac{1}{2}$ 的参数。本文介绍一种算法用于计算点 \hat{p} 使得 $\chi(Q, \hat{p}) \leq (1 + \epsilon)\chi(Q)$ 。算法的步骤如下: 首先计算一系列超级集合, 其次计算排列的每个面 φ 上的点 P_φ 的 $\chi(Q, P_\varphi)$, 最后返回一个点 P_φ 使 χ 最小。

2.2 算法的复杂度

计算网络排列 A_{\min} 可能花费 $O(m \log m + |A_{\min}|)$ ^[4]。因为最大的深度是 $k, |A_{\min}| = km, m$ 为链路数。对于排列 A_{\min} 的每个面 φ , 计算 χ 的时间以 k 的指数形式增加且与 m 个相互独立的事件有关。完成遍历每个面可能花费 $O(km \log^2 m + km \log k)$ 。因此算法总的花费时间为 $O(c(k)m(\log^2 m + \log k))$ 。其中 $c(k)$ 是与 k 和 m 有关的指数函数^[11]。因此本文的算法改善了算法文献[5]的算法复杂度, 文献[5]的算法花费时间为 $O\left(\frac{m^3}{|A|}\right)$ 。

3 仿真分析

根据上述模型, 本文采用蒙特卡洛 (Monte-Carlo, MC) 模拟器仿真相关链路故障的情况^[4]。网络拓扑图采用平面图进行仿真, 其中图中的点代表网络的节点如光交插连接器 (Optical Cross-Connect, OXC), 2 点之间的直线段表示网络的链路。网络拓扑见图 4。

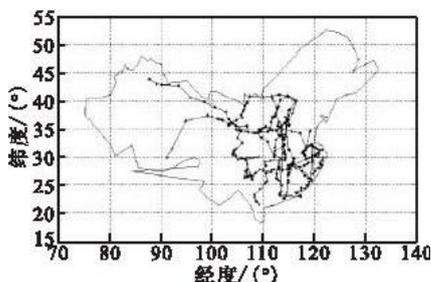


图 4 某通信公司的网络拓扑图

Fig. 4 Network topology of some communication company

由上文的地理灾难模型可知通过选择 Strauss

模型参数 c 和 R 的值确定灾难事件的类型即为抑制情况、群集情况或随机情况,其中参数 c 用于构建空间点之间的交互性。一方面, $c > 1$ 时,可以构建群集的效果,即在半径为 R 圆形范围内采样点的似然性增加;另一方面, $c < 1$ 时可以构建抑制灾难的情况,即在半径为 R 的圆形外采样点的似然性增加;通过选择高斯函数的方差控制灾难事件的强度,即灾难事件对网络的影响有多强和影响的范围有多大,高斯函数的方差越大,灾难事件的强度越大。通过改变相应的参数,本文构造了 4 种灾难场景的情况,高斯函数的方差均取 600,见图 5。

图 5(a)为第 1 种灾难场景情况:假设灾难之间的距离比较远,即灾难之间没有相互影响,这种灾难类似于网络受到单个攻击的情况。令 $c = 0.3, R_1 = 500$ km,采用 Strauss 模型仿真抑制灾难的情况,使得灾难中心之间的距离比较远。

其它 3 种灾难场景情况是 Strauss 模型中的群集情况,即灾难之间存在一定相互影响,在这种情况下,假设事件发生的概率随着 R 的增大而减小,见图 5(b)~(d),设图 5(b)中 $R_2 = 200$ km,图 5(c)中 $R_3 = 100$ km,图 5(d)中 $R_4 = 20$ km,相应这几种情况的 c 都设置为 80。为了便于比较,考虑了独立链路故障的情况,即灾难事件没有引起相关链路故障的情况。本文假设有 4 种灾难事件,实际上可以假设任意几种灾难事件。

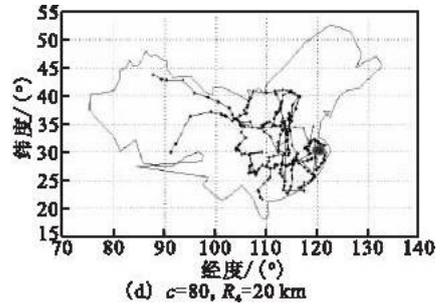
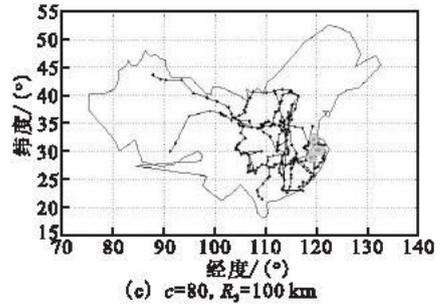
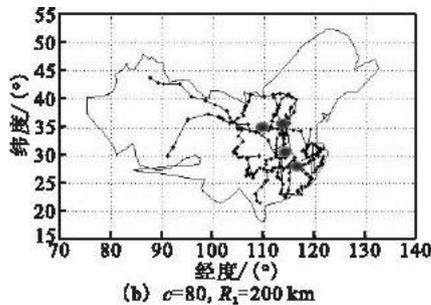
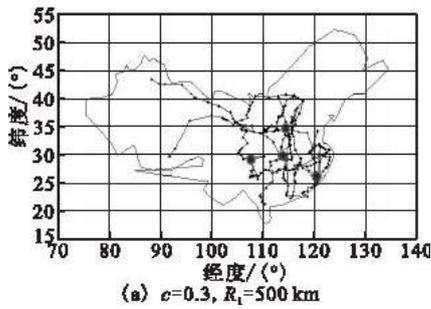


图 5 高斯函数方差为 600 的随机灾难采样图

Fig. 5 Random disasters sampling with the variance 600 of the Gauss function

下面采用文献[8]中 A2TR 作为可靠性测度来分析上述 4 种情况的可靠性。图 6 为上述 4 种情况和独立链路情况的 A2TR 与高斯函数方差之间的关系。

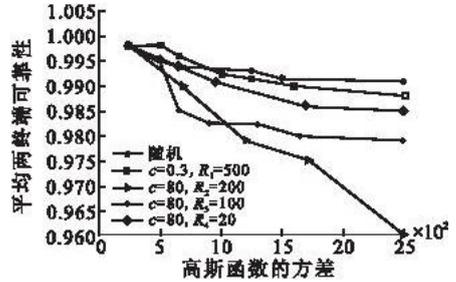


图 6 A2TR 与高斯函数方差之间的关系图

Fig. 6 Relation between A2TR with the variance of the Gauss function

从图 6 也可得出群集(簇)的范围越小,对网络的可靠性的影响也越小。

图 7 为上述 4 种情况和独立链路情况的 A2TR 与链路故障数量之间的关系。

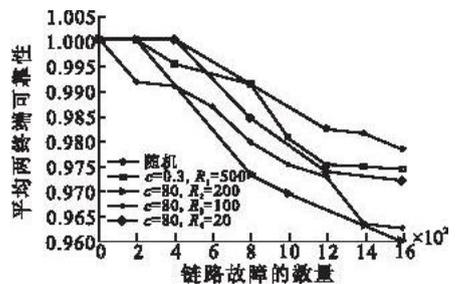


图 7 A2TR 与链路故障之间的关系图

Fig. 7 Relation between A2TR with fault of links

从图6和图7可以看出,第2种情况下,即 $R_2 = 200$ km对可靠性的影响比其它几种情况严重。从而可以得出范围在200 km的群集性灾难对网络影响最大。

根据上面得出灾难类型通过脆弱性评估模型研究地理分布的网络的脆弱区域。采用文献[5]的最佳算法和本文的基于可靠性的算法对网络地理区域的随机2500个采样点设置这种类型的灾难攻击,得出网络的脆弱区域见图8。从图8可以看出有效地评估网络的脆弱区域。

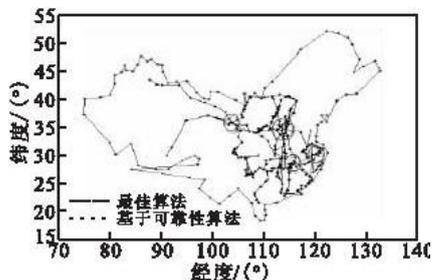


图8 网络的脆弱区域图

Fig. 8 Vulnerable region of network

4 结语

本文基于地理灾难的属性,提出了一种地理灾难模型。研究了通过灾难模型构建的4种灾难事件对网络可靠性的影响,得出对网络破坏比较严重的灾难事件为200 km的群集型灾难。基于200 km不同的灾难场景,研究了网络的脆弱性。通过仿真得出,采用该群集性灾难攻击类型,能够有效地评估网络的脆弱性,同时计算光网络脆弱区域的有效算法,降低了算法的复杂度低。

参考文献(References):

- [1] 宁博.网络攻击及网络安全解决方案[J].西安邮电学院学报,2008,13(3):103-105.
NING Bo. The network attack and network safe solution[J]. Journal of Xi'an university of post and telecommunications, 2008, 13(3):103-105. (in Chinese)
- [2] 曾瑛.电力通信网可靠性分析评估方法研究[J].电力系统通信,2011,32(8):13-16.
ZENG Ying. Power communication network reliability analysis and evaluation methods[J]. Telecommunications for electric power system, 2011, 32(8):13-16. (in Chinese)

- [3] RAN Y. Considerations and suggestions on improvement of communication network disaster countermeasures after the wenchuan earthquake [J]. IEEE communication magazine, 2011, 48(49):44-47.
- [4] Pankaj K, Alon E, Shashidhara G. The resilience of WDM networks to probabilistic geographical failures [C]//IEEE conference on computer communications. Shanghai: IEEE press, 2011:1521-1529.
- [5] Neumayer S, Zussman G, R. Cohen, et al. Assessing the impact of geographically correlated network failures [C]//2008 IEEE military communications conference. Baltimore, MD: [s. n.], 2008:1-11.
- [6] 李文军,张引发,王鲸鱼.光网络地理分布的安全风险评估研究[J].光通信研究,2012,171(3):30-32.
LI Wenjun, ZHANG Yinfa, WANG Jingyu. Research on safety risk assessment of network geographical distribution [J]. Study on optical communications, 2012, 171(3):30-32. (in Chinese)
- [7] STRAUSS D. A model for clustering [J]. Biometrika, 1975(62):467-475.
- [8] Neumayer S, Modiano E. Network reliability with geographically correlated failures [C]//IEEE conference on computer communications. San Diego, CA: IEEE press, 2010:42-53.
- [9] DALEY D, VERE D. An introduction to the theory of point processes [M]. New York: Springer, 2008.
- [10] RIPLEY B D. Algorithm as 137: simulating spatial patterns: dependent samples from a multivariate density [J]. Journal of the royal statistical society, 1979(28):109-112.
- [11] Church R L, Scaparra M P, Middleton R S. Identifying critical infrastructure: the median and covering facility interdiction problems [J]. Annals of association of American geographers, 2004, 94(3):491-502.

(编辑:徐楠楠)