

Research on Vulnerability of Optical Network Geographical Distribution with Protected Scheme

Jingyu Wang, Yinfa Zhang, Bingbin Peng, Xiaomin Liao, Tao Liu, Juan Li

Xi'an Communications Institute, Xi'an
Email: junxiao2010@sina.cn

Received: Oct. 9th, 2012; revised: Oct. 18th, 2012; accepted: Dec. 7th, 2012

Abstract: Analyzing the protection of the optical network model, this paper proposed how to evaluate optical network vulnerability assessment of regional model. Based on the evaluation model and reference [1], an approximation algorithm called MAXEDL algorithm is proposed to find optical network of geographical distribution vulnerability area under the protection model. Based on this, the actual network topology is used to simulate under the Gaussian attack. The results show that MAXEDL algorithm can solve the vulnerability of the actual network effectively while the complexity of algorithm is lower than reference [1].

Keywords: Vulnerability; Protection; Optical Network; MAXEDL Algorithm

基于保护方案的光网络地理分布脆弱性研究

王鲸鱼, 张引发, 彭炳斌, 廖晓敏, 刘涛, 李娟

西安通信学院, 西安
Email: junxiao2010@sina.cn

收稿日期: 2012年10月9日; 修回日期: 2012年10月18日; 录用日期: 2012年12月7日

摘要: 通过分析光网络的保护模式, 提出了在保护模式下如何评估网络脆弱区域的模型。根据评估模型, 在文献[1]算法的基础上, 提出了保护模式下求解地理分布光网络脆弱区域的近似算法——MAXEDL 算法。以此为基础, 在高斯攻击情况下对实际网络拓扑进行仿真, 仿真结果表明, MAXEDL 算法能有效地解决实际的网络拓扑的脆弱性问题, 且算法的复杂度比文献[1]明显降低。

关键词: 脆弱性; 保护; 光网络; MAXEDL 算法

1. 引言

随着通信技术的发展, 通信在日常生活中扮演的角色越来越重要。然而, 一方面通信网正常运行与否很大程度上依赖通信网的物理架构, 如光纤、放大器、光开关等, 而通信网的物理架构尤其光网络在面对电磁炸弹(EMP)和自然灾害(如地震、洪水等)相当脆弱; 另一方面随着信息技术的发展, 越来越多的通信网络同时使用相同的架构来传递语音、数据和视频, 因此一旦物理架构遭到破坏, 将导致至关重要的服务中

断。因此考虑灾难对物理层(光纤)的影响和逻辑网络同等重要。然而在地理区域的灾难或攻击发生在一些特殊的区域, 与这些区域相邻的网络构件才有可能出现故障。目前有些文章已经研究了光网络的在地理域的脆弱性^[2-4], 但是先前的工作只考虑少数的孤立链路故障情况且算法的复杂度高且没有考虑网络的特性, 如光网络往往具有保护方案。鉴于此, 本文研究在保护方案下, 通过构造评估模型, 研究在高斯攻击下网络的脆弱性, 提出了用 MAXEDL 算法解决在 1 + 1

和 1:1 保护下计算有多个攻击时网络的脆弱区域。

2. 脆弱性评估模型

2.1. 光网络的保护方案

目前光网络的保护主要 1+1 保护和 1:1 保护。

1) 1+1 保护

1+1 指发端在主备两个信道上发同样的信息(并发), 收端在正常情况下选收主用信道上的业务, 因为主备信道上的业务一模一样(均为主用业务), 所以在主用信道损坏时, 通过切换选收备用信道而使主用业务得以恢复。即 1+1 保护采用的并发优收的原理(见图 1)。保护倒换动作只发生在宿端, 在源端进行永久桥接。

2) 1:1 保护

1:1 方式指在正常时发端在主用信道上发主用业务, 在备用信道上发额外业务(低级别业务), 收端从主用信道收主用业务从备用信道收额外业务。当主用信道损坏时, 为保证主用业务的传输, 发端将主用业务发到备用信道上, 收端将切换到从备用信道选收主用业务, 此时额外业务被终结, 主用业务传输得到恢复。即复用段保护-收发倒换, 当个工作通道处于故障状态时, 1:1 保护类型只能对其中优先级最高的工作通道进行保护, 工作原理如图 2 所示。

2.2. 模型构建

令 π 表示光路, π_i 表示主光路, π'_i 表示备用光路, Π 表示光路对 (π_i, π'_i) 的集合, T_i 和 t_i 分别表示高优先级和低优先级的业务, 对于 1+1 保护, $t_i = 0$ 。因此

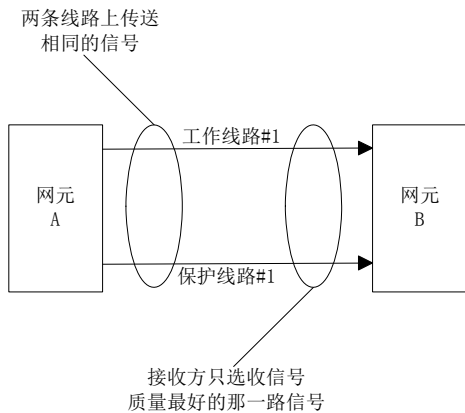


Figure 1. Single direction 1+1 protection
图 1. 单向 1+1 保护

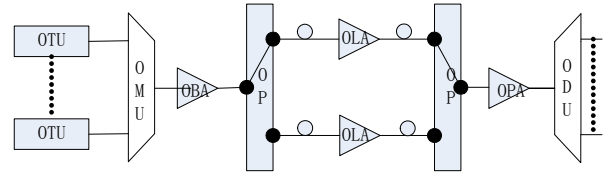


Figure 2. The operating principle of 1:1 protection
图 2. 1:1 保护工作原理

存在以下两种情况: π_i 或 π'_i 出现故障, 则 t_i 的业务丢失; $T_i + t_i$ 的业务丢失, 则 π_i 和 π'_i 出现故障。

由此可以看出存在三种导致业务丢失的情况:

- 1) π_i 故障, π'_i 正常, 用 E_1 表示。
- 2) π_i 正常, π'_i 故障, 用 E_2 表示。
- 3) π_i 与 π'_i 都出现故障, 用 E_3 表示。

令 $P = \{p_1, \dots, p_m\}$ 表示产生攻击位置的集合。给定两个攻击的位置 p_1 和 p_2 , 上面三种情况的概率分别为

$$P_r(E_1) = g_{\pi'_i}(p_1)g_{\pi_i}(p_2) \cdot (f_{\pi_i}(p_1) + f_{\pi_i}(p_2))g_{\pi_i}(p_1) \quad (1)$$

$$P_r(E_2) = g_{\pi_i}(p_1)g_{\pi'_i}(p_2) \cdot (f_{\pi'_i}(p_1) + f_{\pi'_i}(p_2))g_{\pi'_i}(p_1) \quad (2)$$

$$P_r(E_3) = f_{\pi_i}(p_1)f_{\pi'_i}(p_1)g_{\pi'_i}(p_2) + f_{\pi_i}(p_2)f_{\pi'_i}(p_2)g_{\pi_i}(p_1) + f_{\pi_i}(p_1)f_{\pi'_i}(p_2)g_{\pi_i}(p_2) + f_{\pi_i}(p_2)f_{\pi'_i}(p_1)g_{\pi_i}(p_1) + f_{\pi_i}(p_1)f_{\pi'_i}(p_1)f_{\pi_i}(p_2)f_{\pi'_i}(p_2) \quad (3)$$

其中, $f_{\pi}(p) = 1 - \prod_{q \in \pi} (1 - f_q(p))$ 表示 p 处的攻击导致光路 π 出现故障的概率, f_q 随着欧几里得距离的增加而指数递减, $g_{\pi}(p) = 1 - f_{\pi}(p)$ 。本文采用高斯分布 $f(q, p) = \beta e^{-\alpha d(q, p)^2}$, $d(q, p)$ 表示光网络构件 q 离攻击位置 p 的欧几里得距离^[5]。

因此第 i 对光路的期望损失为

$$\Phi_i(\{p_1, p_2\}) = t_i(P_r(E_1) + P_r(E_2) + P_r(E_3)) + (t_i + T_i)P_r(E_3) \quad (4)$$

对整个网络则有

$$\Phi(\Pi, \{p_1, p_2\}) = \sum_i \Phi_i(\{p_1, p_2\}) \quad (5)$$

通过计算所有位置集的 Φ , 找出最大的 Φ , 即可计算出网络的脆弱区域。

3. 计算脆弱点的算法设计

3.1. 算法设计

根据上文构建的模型, 算法的目的是基于光路损失的最大期望值判定网络的脆弱区域。本文对文献[1]的算法进行改进, 提出近似的 MAXEDL 算法。算法的步骤如下:

- 1) 把每对光路 (π_i, π'_i) 的 T_i 和 t_i 均分成相等的部分, 使得 $\max_i (T_i + t_i) = 1$;
- 2) 选择 $\delta = \varepsilon/c_1\sigma$ [1], 其中 σ 为任意光路中简单构件的最大数目, c_1 为常数;
- 3) 选择一个 s , 使得 $(1-\delta)^s \leq (\varepsilon/2n)$, n 为所有光路的长度之和, 则 $s = O((\sigma/\varepsilon)\log(n/\varepsilon))$;
- 4) 计算 $Y := Y(\delta, s)$ 与 f 和 g 的超级集合的排列 Λ [4];

5) 针对排列 Λ 的面 [5], 计算 $\Phi(\pi, \{p_1, p_2\})$, 其中 p_1, p_2 位于排列 Λ 的面上;

6) 最大化 Φ , 用 $\{\tilde{p}_1, \tilde{p}_2\}$ 表示最大化 Φ 的攻击位置, 即网络的脆弱区域。

由下面的引理 2 可得

$$\Phi(\Pi, \{\tilde{p}_1, \tilde{p}_2\}) \geq (1-\varepsilon)\Phi(\Pi, 2).$$

算法的正确性可用引理 1 和引理 2 得到证明。

引理 1 对于任何 $\pi \in \Pi$, $p \in R^2$, 有

$$f_\pi(p) \geq \tilde{f}_\pi(p) \geq (1-\varepsilon/2)f_\pi(p) - \frac{\varepsilon}{4m}. \text{证明见文献[1].}$$

引理 2 $\Phi(Q, \tilde{p}) \geq (1-\varepsilon/2)\Phi(Q)$

证明 令 $p^* = \arg \max_{p \in R^2} \Phi(Q, p)$,

$Q_l = \{q \in Q \mid p^* \in \lambda_{q,s}\}$, $Q_E = Q/Q_l$, 则有

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}(Q, p^*) &= \sum_{q \in Q_l} w_q \tilde{f}_q(p^*) + \sum_{q \in Q_E} w_q \tilde{f}_q(p^*) \\ &\geq \sum_{q \in Q_l} w_q (1-\delta) f_q(p^*) + \sum_{q \in Q_E} w_q (f_q(p^*) - \delta/m) \\ &\geq (1-\delta) \sum_{q \in Q_l} w_q f_q(p^*) - \sum_{q \in Q_E} w_q \delta/m \\ &\geq (1-\delta)\Phi(Q, p^*) - \delta \\ &\geq (1-\varepsilon/2)\Phi(Q) \end{aligned}$$

3.2. 算法的复杂度分析

令 Π 为具有保护通道的光路的集合, Q 为简单构件的集合, $n = |\pi| + |\pi'|$, ε 为大于 0 小于 1 的参数; 通过计算 $\Phi(\Pi, \{\tilde{p}_1, \tilde{p}_2\}) \geq (1-\varepsilon)\Phi(\Pi, 2)$ 得到 2 个攻

击点集合 $\{\tilde{p}_1, \tilde{p}_2\}$ 的算法复杂度为

$O\left(\left((\sigma/\varepsilon)\lg^2(n/\varepsilon) + (k(Q, \varepsilon/(c_1\sigma)))\right)^2\right)$, 其中 σ 为简单构件的最大数, k 为 Q 的超级集合的排列的复杂度 [1]。而文献[1]的算法复杂度为指数型, 因此本文的方案降低算法的复杂度。

MAXEDL 算法的伪代码如下:

- 1) $w_m \leftarrow \max_{q \in \pi, p \in R^2} t_i (P_r(E_1) + P_r(E_2) + P_r(E_3)) + (t_i + T_i) P_r(E_3)$;
- 2) for $q \in \pi$, do
- 3) $w'_q \leftarrow w_q/w_m$;
- 4) $i \leftarrow 0, Y \leftarrow \phi, \Lambda \leftarrow \phi$;
- 5) 当 $(1-\varepsilon)^i \geq 1/2|\pi|$ 时
- 6) $Y \leftarrow Y \cup \{(1-\varepsilon)^i\}$;
- 7) $i++$;
- 8) for $q \in \pi$, do
- 9) $\Lambda_q \leftarrow \phi$;
- 10) for each $y \in Y$ do
- 11) 超级集合 $\lambda_{q,y} \leftarrow \{p \in R^2 \mid f(p, q) \geq y\}$;
- 12) $\Lambda_q \leftarrow \Lambda_q \cup \{\lambda_{q,y}\}$;
- 13) $\Lambda \leftarrow \Lambda \cup \Lambda_q$;
- 14) $V \leftarrow \text{compute_vertices}(\Lambda)$; % 计算排列的每个顶点的 Φ 值;
- 15) 返回 $\arg \max_{p \in \Pi} \Phi(\Pi, \{p_l, p_j\})$; % p_l, p_j 表示网络的脆弱区域;
- 16) 结束.

4. 数值结果与分析

根据上文提出的模型, 本文利用 MATLAB 对两家通信公司的网络进行仿真。仿真参数如下: 高斯攻击数量(攻击数) $k = 2$, 攻击半径范围为(50~300) km。图 3 表示两种攻击情况下, 受到破坏光路的归一化期望值随着攻击半径的变化。从图 3 可以看出, 当攻击半径很小时, 只要攻击的位置合适, 就有可能造成对网络的巨大破坏。当攻击半径为 100 km 时, 采用本方案分析通信 A 公司和通信 B 公司, 其脆弱区域结果分别如图 4 和图 5 所示。通过本文的算法找到的脆弱区域与实际情况几乎一致, 并且本文的算法的复杂度相对文献[1]有明显改善。

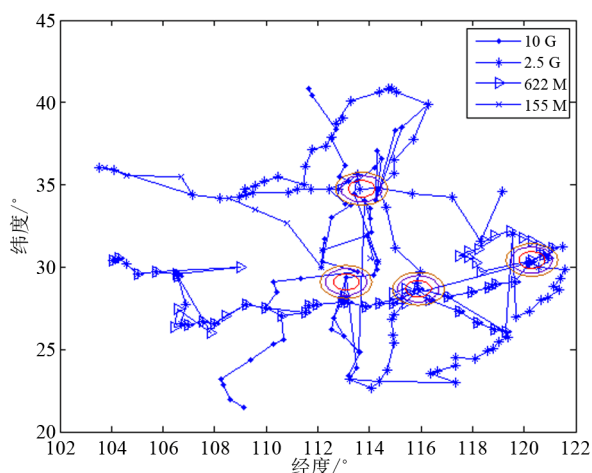


Figure 3. When the attack's radius is 100 km, the vulnerability region of communication company A
图 3. 通信 A 公司在攻击半径为 100 km 时的脆弱区域

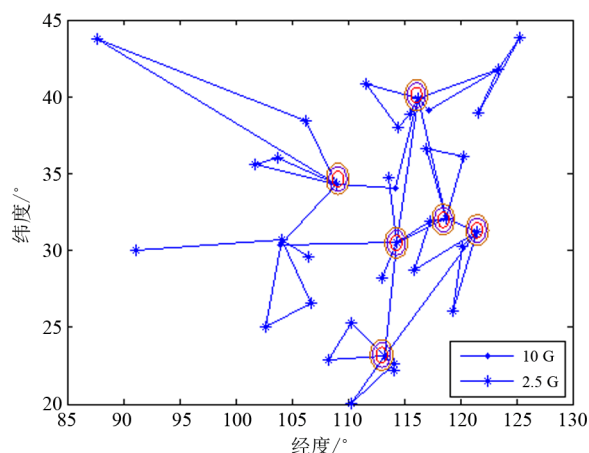


Figure 4. When the attack's radius is 100 km, the vulnerability region of communication company B
图 4. 通信 B 公司在攻击半径为 100 km 时的脆弱区域

5. 结束语

通过分析光网络的保护模式，提出了在保护模式下如何评估网络脆弱区域的模型。根据提出的模型，在文献[1]算法的基础上提出了保护形式下求解具有

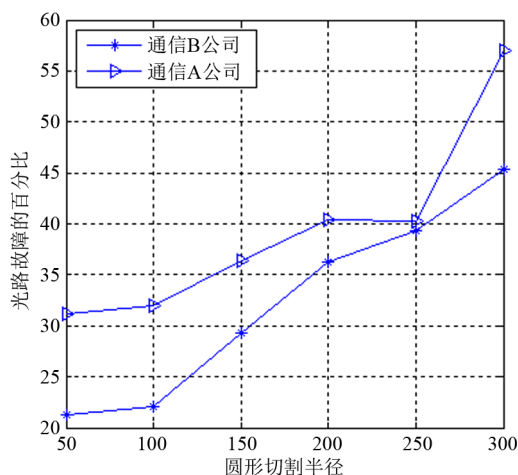


Figure 5. Normalized expectation is with variation attack's radius
图 5. 归一化期望值随攻击半径的变化情况

保护脆弱区域的近似算法——MAXEDL 算法，说明了算法的复杂度。仿真结果表明，MAXEDL 算法能很好地解决实际的网络拓扑问题，且算法的复杂度比文献[1]明显降低。由于本文只考虑了高斯攻击的情况，未来的研究方向包括线性攻击及两个以上的攻击同时发生时的情况等。

参考文献 (References)

- [1] K. Pankaj, A. Efratz and S. Ganjugunty. The resilience of WDM networks to probabilistic geographical failures. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 99: 1521-1529.
- [2] S. Neumayer, G. Zussman, R. Cohen, et al. Assessing the impact of geographically correlated network failures. *Military Communications Conference*, 16-19 November 2008: 1-11.
- [3] 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, 3: 30-32.
- [4] S. Neumayer, E. Modiano. Network reliability under random circular cuts, 2012. www.google.com/2012sn.pdf
- [5] P. Agarwal, M. Sharir. Arrangements and their applications. In: *Handbook of Computational Geometry*, 2000: 49-119.