

一种光纤通信系统可用性的算法及分析

周联红, 伍 翔, 王一超, 冯重熙

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文对 SDH 光纤通信系统的可用性建立了一种新的数学模型, 提出了系统可用性的一种算法, 并且应用数学方法求出一个具体系统的可用性, 同时分析和讨论了系统可用性同相关参数的关系以及提高系统可用性的方法。

关键词: 可用性; 生存性; 光纤通信系统; 光同步数字传送网

中图分类号: TN915. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1713-04

An Algorithm and Analysis of Availability of Fiber Optic Systems

ZHOU Lian-hong, WU Xiang, WANG Yi-chao, FENG Chong-xi

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper proposes a new mathematical model and an algorithm of availability of SDH fiber optic systems. Numerical solution of the model is discussed along with an illustrative example. The paper also analyzes the relationships between system availability and related parameters in detail and presents several ways to improve system availability.

Key words: availability; survivability; fiber optic systems; SDH (SONET)

1 引言

随着科技的发展和社会的进步, 人们对通信网的依赖性也越来越强. 网络上传送信息的高价值和多样化使网络失效造成的经济损失和社会影响将非常巨大. 因此通信网的可靠性 (Reliability), 生存性 (Survivability) 以及可用性 (Availability) 已经变得日益重要. 国家骨干通信网就是建立在光纤互联的基础上的. 而且随着 WDM 技术的应用, 线路传输容量已经突飞猛进, 因此一条光纤承载有千万条数字电路. 如此大的传输系统, 一旦光纤中断或系统失效, 其造成的损失是极其严重的, 有时甚至是灾难性的. 因此, 对光纤通信系统的生存性和可用性的研究具有很强的现实意义.

自从 1987 年 W. D. Gover 提出自愈网的概念以来^[1], 人们对网络的生存性和可用性就进行了广泛的研究. 所谓自愈网, 就是无需人为的干预, 网络本身就能在很短的时间内从失效故障中自动恢复所携带的业务的一种网络结构. 其基本原理就是使网络具备发现替代传输路由并重新确立通信的能力. 开始的研究大多是围绕 SDH/SONET 网络进行的, 人们先后提出了不同的网络结构和自愈类型^[2-6]. ITU-T 也制定了相关的建议^[7-9], 而且有些已经实用化. 近几年来, 人们对于 ATM 网络的自愈性能和生存性也进行了许多的研究^[10,11], 并且得出很多的结论和实用的算法. 同时, 随着 WDM 技术的逐渐引入和以 IP 主导的数据流逐渐占据网络流量的大部分, 网络结构日趋复杂, 基于多层网络结构或多种自愈结构的混合

自愈问题的研究也逐渐开始^[11-13]. 但是上述的研究和分析大多基于概念或结构的, 很少进行严格详尽的数学分析. 最近的文献^[14]讨论了实现光层保护的一些问题, 并且比较了不同的保护方式的复杂度和相应费用, 但是也没有给出具体的数学分析. 文献^[15-17]从数学的角度对网络的生存性和可用性进行建模和分析, 得出一些较为严格的结论和分析结果. 国内在网络生存性和可用性方面的研究也取得了一些很好的成果^[18,19].

本文是在已有研究成果的基础上, 考虑到对于光纤通信网络可用性的比较严格的数学分析方面的研究还不是十分成熟, 所以采用数学方法对网络的可用性作一些深入的分析 and 探讨. 文章首先对实际应用较多的一种光纤网络结构二纤双向复用段保护环进行数学建模, 接着对提出的系统可用性算法进行严格的分析和求解, 并求出一个具体的系统的可用性, 然后分析和讨论了系统可用性同相关参数的关系, 最后对所用的模型和算法作了总结并展望了未来的工作.

2 可用性算法的数学模型及其求解

系统的可用性指标是系统的可靠性和维修性两个指标的综合^[20]. 可用度 A (Availability) 可以定义为对于给定的一个随机时间 t , 在 t 时刻系统处于可用状态的概率, 也称为瞬时可用度. 这是评价一个系统的重要技术指标, 是构成系统综合性能的相关因素. 最通用的计算可用性的公式是:

收稿日期: 2000-11-01; 修回日期: 2001-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 69896242)

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad (1)$$

其中: MTBF: Mean Time Between Failures 平均故障间隔时间

MTTR: Mean Time to Repair 平均修复时间

在通信系统中对可用性的分析通常有一个基本框架^[17]. 一般建立在以下的一些基本假设基础上:

(1) 被分析的所有元素只有两种状态: 工作和故障; (2) 各个元素发生故障之间是互相独立的; (3) 正常服务时间和修复时间都是无记忆的独立过程而且均值恒定; (4) MTBF 远远大于 MTTR.

基于上面的假设, 下面开始对 SDH 光纤通信系统的可用性进行具体分析. 首先必须建立一个合理的数学模型. 既然可用性指标是对于可修复性系统的可靠性和维修性两者的综合指标, 那么对于一个典型产品或系统来说, 处于工作——故障——修复多次经历过程的数学描述, 可以采用马尔可夫 (Markov) 过程或者其他类似的描述方法. 其中马尔可夫过程是概念清楚, 方法简单的一种描述. 本文中将以 Markov 过程为基本数学模型, 对上述的系统进行建模. 该系统是时间连续的齐次 Markov 过程.

本文以下面含有六个节点的二纤双向复用段保护环自愈网为例进行分析.

首先定义以下的一些参数:

(1) λ_1 : SDH 自愈环中单个网元的故障概率 (Failure Probability).

(2) λ_2 : 单段光缆被切断或因为其他原因引起的中断的概率, 单位一般是次/年.

(3) μ_1 : 是指系统中的网元处于故障状态时在单位时间内能够被修复的概率, 又叫修复率 (Repair Rate), 单位为次/小时. 相当于网元出故障后一小时可以修复多少次.

(4) μ_2 : 是指系统中的处于故障状态的光纤单位时间内被修复的概率, 单位为次/天.

根据上面的参数定义, 故障可分为由网元故障引起的系统故障和由光缆故障引起的系统故障. 根据这两类不同的故障, 系统可以处于不同的工作状态. 由此画出整个系统的状态转移图.

其中: $S_{1,1}$ 表示整个系统处于正常工作状态.

$S_{1,2}$ 表示整个系统中有一个网元处于故障状态, 而光缆全部处于正常工作状态.

...

$S_{1,7}$ 表示整个系统中有六个网元处于故障状态, 而光缆全部处于正常工作状态.

$S_{2,1}$ 表示整个系统中有一段光缆处于故障状态, 而全部网元处于正常工作状态.

$S_{2,2}$ 表示整个系统中有一个网元处于故障状态, 有一段

光缆处于故障状态.

...

$S_{i,j}$ 表示整个系统中有 $i-1$ 段光缆处于故障状态, 有 $j-1$ 个网元处于故障状态 ($1 \leq i, j \leq n$). 在本文示例中 n 取 7 (网络实际节点数为 6).

由此得出整个系统的状态转移图如下:

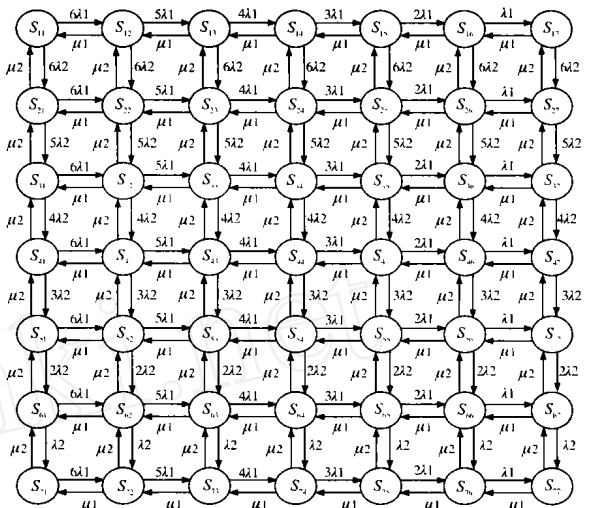


图 2 系统的状态转移图

由上面的状态转移图可以得到状态转移方程.

如果 $2 \leq i, j \leq n-1$, 则有下列方程式成立:

$$\begin{aligned} & P(S_{i-1,j}) \times (n - (i - 1)) \times \lambda_2 + P(S_{i,j+1}) \times \mu_1 + \\ & P(S_{i+1,j}) \times \mu_2 + P(S_{i,j-1}) \times (n - (j - 1)) \times \lambda_1 = \\ & P(S_{i,j}) \times (\mu_1 + \mu_2 + (n - i) \times \lambda_2 + (n - j) \times \lambda_1) \quad (2) \end{aligned}$$

同样的, 对于上述的状态转移图边界上的 $4 \times (n - 1)$ 个点也可以得出类似的状态转移方程式. 形式上要比公式 (2) 简单一些, 具体的公式可以根据状态转移图得出, 此处从略. 将上面的状态转移方程式转换成状态转移矩阵以方便问题的求解. 因为 $S_{i,j}$ 是一个二维的矩阵, 必须将它变成一维的矩阵才能够将上述的方程转换成基本的线性方程组.

转换方法就是建立一个二维矩阵到一维矩阵的映射:

$$P(S_{i,j}) = P(S_k), K = (i - 1) \times n + j, 1 \leq k \leq n^2 \quad (3)$$

设状态转移矩阵为 $P(n^2, n^2)$, 则根据上述的状态转移方程式可以对应得到状态转移矩阵中的元素值. 这样将所有的情况包括进来就可以组成一个线性方程组.

$$P \times S = 0 \quad (4)$$

其中: P 矩阵的维数为 $n^2 \times n^2$,

S 矩阵的维数为 $n^2 \times 1$,

0 矩阵的维数为 $n^2 \times 1$ 的全“0”矩阵.

上述的线性方程组 ($n^2 - 1$) 次欠定方程组. 再加上下面的约束条件即系统所有状态的概率之和为 1:

$$\sum_{k=1}^{n^2} P(S_k) = 1 \quad (5)$$

这样正好可以得到 n^2 次恰定方程组. 通过解方程组, 将给定的参数 $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$ 代入, 就可以得到方程组的解, 也就

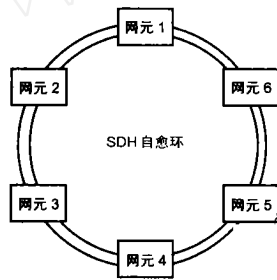


图 1 SDH 网络拓扑举例

是状态矩阵中每个状态的概率.

在此例中取以下参数:

λ_1 :系统中网元的故障率为: $11.49742 \times 10^{-6}/h$ (h: 表示小时). 这个数据的得出是根据我们开发的 SDH 设备 H9MO-155 系统的具体情况, 将每个单元盘上的器件作为该单元盘的串联器件, 将板上所有器件的故障率并通过一定的降额因子求和, 得到具体的某块单元盘的故障率. 将单个网元作为一个串联系统, 将该网元中的所有单元盘的故障率求和, 可以得到该网元系统的故障率. 这个故障率的估算实际上是比较保守的, 实际的故障率可能远比上述值小.

λ_2 :系统中一段光缆的故障率为: $1 \text{ 次}/5 \text{ 年} = 2.283105 \times 10^{-5}/h$.

μ_1 :系统中网元故障时的修复率, 设为 $1 \text{ 次}/h$.

μ_2 :系统中光缆故障时的修复率, 设为 $1 \text{ 次}/1 \text{ 天} = 0.0416667/h$.

将上述的 4 个参数的值带入方程中可以得到系统的可用性. 系统的可用性为系统处于全部正常工作的概率 $P(S_{1,1})$ 与系统仅有一个光缆断裂而其他全部正常的概率 $P(S_{2,1})$ 之和:

$$A = P(S_{1,1}) + P(S_{2,1}) \quad (6)$$

根据上述的算法和实际数据可以算出系统的可用率 $A = 99.9922\%$.

3 系统可用性和相关参数关系的分析

从分析中可以得知系统的可用性的 大小除了与网络的具体结构和选取的数学模型有关以外, 还跟上述的四个系统参数有着直接的关系. 下面将主要讨论一下系统可用性和每个参数的关系, 以便于在设计系统时把握影响系统可用度的主要因素, 而忽略次要因素, 从而提高整个系统的可用性. 共有四个参数, 本文将一一分析.

3.1 系统可用性和网元设备故障率 λ_1 的关系

改变网元设备故障率的值, 而保持其他的参数不变就可以得到系统可用性和 λ_1 的关系曲线, 采用对数曲线可以更清楚的说明二者的关系, 如图 3 所示.

由该曲线可以知道, 整个系统的可用性与网元的故障率有较大的关系. 即网元的故障率对整个系统的可用性有较大的影响因子. 这是因为在本文的模型中, 光纤有自愈环保护, 中断一段光缆系统仍可以正常工作. 而网元没有保护, 所以其影响因子会大一下. 这就要求在设计网元的时候必须注意减小网元的故障率, 包括对各个单元盘的设计, 器件的选择, 网元内单元的备份和冗余设计等, 从而从根本上提高整个系统的可用性.

3.2 系统可用性和光缆故障率 λ_2 (1 次/m 年) 的关系

类似上面情况处理, 改变光缆故障率的值, 而保持其他的参数不变, 可以得到系统可用性和光缆故障率 λ_2 的关系曲线, 如图 4 所示. 为了便于说明, 将光缆故障率 λ_2 用 m 年坏 1 次表示, 这样比较直观, 易于理解.

从图 4 可知, 随着光纤故障率的减小, 系统的可用性逐渐提高. 从曲线的趋势可以看出, 随着光纤故障率接近于 0, 系

统的可用性接近了一个极限值, 而不是 1. 这个极限值由系统中所有网元本身的可用性决定.

3.3 系统可用性和网元设备修复率 μ_1 (次/小时) 的关系

把网元设备的修复率作为一个变量, 其他的参数保持不变, 就可以得出系统可用性与该修复率的关系, 参见图 5.

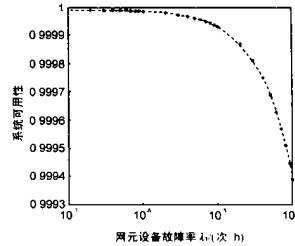


图 3 系统可用性与网元设备故障率的对数曲线

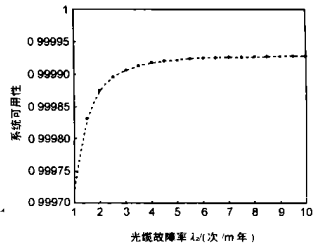


图 4 系统可用性与光缆故障率的关系曲线

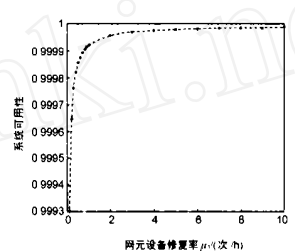


图 5 系统可用性与网元设备修复率的关系曲线

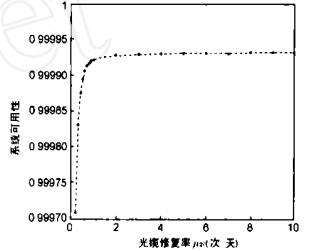


图 6 系统可用性与光缆修复率的关系曲线

实际上网元设备的修复率和网元设备的故障率存在着某种互易关系. 也就是说, 如果修复率变大, 即修复时间缩短, 相当于网元的故障率减小. 因此, 如果有可能, 在系统现场增加一些备用的单元盘和设备, 有问题发生, 立即更换, 会大大提高整个系统的可用度. 是否能够快速故障定位并且及时修复对整个系统的可用性影响较大.

3.4 系统可用性和光缆修复率 μ_2 (次/天) 的关系

把光缆的修复率作为一个变量, 其他的参数保持不变, 就可以得出系统可用性与光缆修复率的关系, 参见图 6.

3.5 系统可用度与系统规模大小的关系

在一个 SDH 网络环境中, 一个 SDH 环的大小是可以变化的, 即该自愈环中的网元个数是变化的, 相应的连接各网元的光缆的数目也是随之变化的. 不妨假设网络的节点数由 3 一直增加到 10, 对应的光缆数也是由 3 增加到 10. 通过计算在不同情况下的系统的可用性, 就可以得到系统的可用性与网络节点个数的关系曲线, 如图 7 所示.

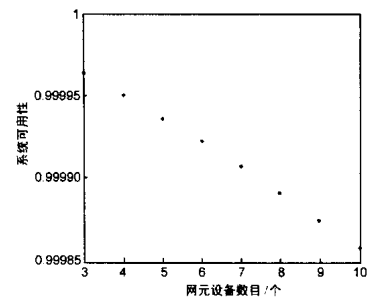


图 7 系统可用性与网元设备数目的关系曲线

显然, 按照假定的模型, 随着系统规模的增大, 网元数目

的增多,设备出问题的可能性会增大,因此,系统发生故障的可能性会随着网络规模的增大而增大。

从某种意义上讲,本文建立和讨论的模型是对系统可用性的作最坏的估计。

原因之一是对一个实际光纤通信系统来说,其承载的业务信号或支路信号是真正对用户有用的。上述的模型实际上针对在整个系统中,所有的支路信号或用户信号都正常的情况。

原因二是对某一特定用户或支路而言,即使系统中有几个网元坏或有几个光缆中断,只要与该用户业务直接相关的网元和光缆正常工作,则该用户和支路正常,也可以说明处于支路可用状态。对这种情况可以建立另外一种模型进行分析,本文不再讨论。

原因之三是文中对具体网元的故障率的计算时采用了串联模型,将各个单元盘的故障率直接相加,而有些单元盘的故障是不影响业务的,所以这也是比较保守的估计。因此可以说,实际系统的可用性比本文计算的结果会高一些或高很多,本文的计算实际是给出了系统可用性的理论下限。

4 结论

本文对一种带有自愈保护功能的光纤通信网络的可用性进行了分析和讨论,建立了严格的可用性数学模型并且分析了可用性与相关参数的具体关系,得出了一些有益的结论。这些分析和结论对于 SDH 设备制造商和运营商都有较大的参考价值。但是随着网络的迅速发展,网络结构的复杂多变,对网络的严格精确的分析越来越复杂,尤其是在存在多种自愈保护方案时网络的可用性更难统计,更难建立一种严格的数学模型。在网络生存性和可用性的研究中,未来的工作可以着重放在建立一种比较通用的数学模型,这种模型可以适应网络拓扑结构的变化,适应网络自愈方案的变化,尤其是在网状网的情况下可以精确快速的分析网络的整体可用性,从而有利于提高网络的整体运行效率和水平。

参考文献:

- [1] W D Grover. The self-healing network: A fast distributed restoration mechanism for networks using digital cross-connect machines [A]. Proc IEEE Globecom 87 [C], Nov. 1987:1090 - 1095.
- [2] 韦乐平. 光同步数字传送网 [M]. 人民邮电出版社,1998,12.
- [3] Tsong-hu Wu. Fiber Network Service Survivability [M]. Artech House, 1992.
- [4] Tsong-hu Wu, Richard C Lau. A class of self-healing ring architectures for SONET applications [J]. IEEE Transaction on Communications, November 1992, 40(11):1746 - 1756.
- [5] Tom Flanagan. Fiber network survivability [J]. IEEE Communication Magazine, June 1990:46 - 53.
- [6] Satoshi Hasegama, Yasuyo Okanoue, etc. Control algorithms of SONET integrated self-healing networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Jan. 1994, 12(1):110 - 119.
- [7] Types and Characteristics of SDH Network Protection Architectures [S]. ITU-T Rec. G. 841 July 1995.

- [8] Interworking of SDH Network Protection Architectures [S]. ITU-T Rec. G. 842, Apr. 1997.
- [9] Parameters and Calculation Methodologies for Reliability and Availability of Fiber Optic Systems [S]. ITU-T Rec. G. 911, Apr. 1997.
- [10] Hiroyuki Fujii, Noriaki Yoshikai. Restoration message transfer mechanism and restoration characteristic of double-search self-healing ATM network [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., Jan. 1994, 12(1):149 - 158.
- [11] Tsong-hu Wu. Emerging technologies for fiber network survivability [J]. IEEE Communication Magazine, February 1995:58 - 74.
- [12] Göksele Öncü, Latha Kant, etc. Cost/survivability analysis of multi-layer restoration strategies in broadband transport networks [A]. Proc IEEE Globecom 99 [C], 1999:1544 - 1550.
- [13] James Manchester, Paul Bonenfant, Curt Newton. The evolution of transport network survivability [J]. IEEE Communications Magazine, August 1999:44 - 51.
- [14] Ornan (Ori) Gerstel, Rajiv Ramaswami. Optical layer survivability-An implementation perspective [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., October 2000, 18(10):1885 - 1899.
- [15] Hakki C Cankaya, V S S Nair. Reliability and availability evaluation of self-healing SONET mesh networks [A]. IEEE Global Telecommunications Conference Proceedings of the 1997 [C], Nov. 1997:252 - 256.
- [16] Hakki C Cankaya, V S S Nair. A survivability assessment tool for restorable network [A]. Proceedings, 3rd IEEE Symposium on Application-Specific Systems and Software Engineering Technology [C], 2000:130 - 134.
- [17] Wayne D Gover. High availability path design in ring-based optical networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, August 1999, 7(4):558 - 574.
- [18] 隆克平,程时端等. SDH/ATM 双向自愈环的生存性定量分析方法 [J]. 电子学报, 1999, 4:15 - 18.
- [19] 陈山枝,程时端等. 网络恢复机制可用性的定义及其应用 [J]. 通信学报, 1997, 4:1 - 8.
- [20] 潘吉安. 可靠性维护性可用性评估手册 [M]. 国防工业出版社, 1995 年 12 月.

作者简介:



周联红 男, 1975 年 6 月生于山东省汶上县。1997 年毕业于北京邮电大学电信工程系, 获学士学位。现在清华大学电子工程系通信与信息系统专业攻读博士学位。个人研究兴趣包括: 光纤通信网络, 网络定时与同步, 大规模集成电路设计等。Email: zhoulh@ieee.org



伍翔 男, 1974 年 7 月生于贵州省贵阳市。1997 年毕业于清华大学电子工程系, 获学士学位。现在清华大学电子工程系通信与信息系统专业攻读博士学位。个人研究兴趣包括: 宽带接入网络, 光网络, IP QoS 等。Email: wuxiang@ieee.org