

通信网生存性设计中分集路由的影响分析¹

唐 健 雷振明

(北京邮电学院信息工程系 北京 100088)

摘 要 对宽带通信网进行生存性设计十分重要。网的生存性与包括路由在内的诸多因素有关,本文分析分集路由的分割因子对网生存性和费用的影响,发现均匀分割因子对网的生存性和费用的影响十分独特,从而为网的生存性设计提供了有益的参考。

关键词 生存性, 分集路由, 分割因子

中图分类号 TN913.2

1 引 言

对通信网进行良好的规划和设计,不但可以节约巨大的投资,也能保证网的服务质量;不但能够充分利用资源,也能及时满足社会需要。对通信网进行适当的控制,是网能正常运行的必要条件,是提高网的运行质量和资源利用率的主要手段。通信网的规划、设计和控制是非常复杂的问题,既要涉及网的各种技术内涵,也要考虑经济性,既要处理非常多的变量和参数,也需预测许多不确定因素。

通信网规划、设计的传统方法,是以网在正常状态下使某些性能指标(如:呼损或时延)被满足为目标。这样规划、设计的网在正常状态下性能良好,在异常状态下(如:链路或端点出故障)其性能却难以预料。造成网失效的原因很多,如:地震,洪水,电源故障,软件出错等。随着信息时代通信业的迅猛发展以及用户对通信网不断增加的依赖性,为增强网抵御失效的能力,很有必要对失效状态下网的性能、即生存性(survivability)进行研究,并提出有效的生存性设计方法。

可靠网的设计已经发展起来,就是首先给一个按联接与否定义的可靠度,在满足这可靠度的条件下,去寻找最便宜的网结构。这样设计的网虽然考虑了失效状态下网的联接性,却并没有考虑网的业务量、或业务服务等级、或运营者经济效益等方面的变化,而这些正是网生存性设计时所必须考虑的方面,以保证在网失效状态下其性能不低于一定的水平。

在进行网生存性设计时,必须处理好诸多因素的影响,才有可能设计出具有良好生存性的网。文献[1, 2]中讨论了网的拓扑结构对生存性和费用的影响,文献[3, 4]中讨论了备用容量对生存性和费用的影响,至于分集路由(diverse routing)对生存性和费用的影响,则讨论得不多,文献[5, 6]中仅在分集水平(diversity level)为2时,用仿真的方法考察了5种分割因子(splitting factor)对网生存性和费用的影响。本文对任意的网拓扑结构和分集水平,分析分割因子对生存性和费用的影响,用数学方法推导出均匀分割因子对生存性和费用的影响十分独特,从而为网的生存性设计提供了有益的参考。

¹ 1996-04-22 收到, 1997-10-29 定稿
国家自然科学基金资助课题

2 分割因子和生存性模型

可靠性、生存性对于通信网的传输层尤其重要, 因为每条链上极为高速的信息流, 任何网故障都可能影响运营者和众多用户。在传输网的规划、设计中, 只要中继容量和路由都设计合理, 呼损或时延不必再考虑, 而可靠性和生存性是主要考虑的性能指标。

假设已经设计出一个满足可靠性要求、链数目尽可能小或链长尽可能短的传输网的拓扑结构, 然后对此拓扑结构进行生存性设计。

设此拓扑结构有 a 个端(交换设备)、 b 条链(传输线)。为了使网具有良好生存性, 每条链上需配置备用容量, 设每条链上已配置一定的备用容量。在源宿端 i 、 j 之间选取 K_{ij} 条路径作分集路由, 一般 $K_{ij} \geq 2$, 且 K_{ij} 条路径或者端不重叠、或者链不重叠, K_{ij} 为源宿端 i 、 j 之间的分集水平。传输网的源宿端 i 、 j 之间总的中继容量记为 T_{ij} (以 DS-1、DS-3、或 STS- n 为单位), 将它们分配到 K_{ij} 条路由上, 于是就决定了可能的分割因子和每条链的工作容量, 若 T_{ij} 是均匀分配到 K_{ij} 条路由上的, 则称此分割因子是均匀分割因子。 T_{ij} 在 K_{ij} 条路由上分配的结果一般不唯一, 也不会无限, 不妨设有 M_{ij} 种分配结果, 即 M_{ij} 种分割因子, 则对整个网来说, 网的分割因子总数 M 为这些 M_{ij} 之乘积。

网的任一个分割因子对生存性和费用的影响都是不平衡的, 使网具有良好生存性的往往使网的费用较高, 使网费用较低的又常使网的生存性较差, 几乎不可能有一个分割因子既使网的生存性最好又使网的费用最低。因此, 若能在所有网分割因子中找出一个, 使网的生存性较好而费用不太高, 则这个分割因子就能对网生存性设计提供有益的参考。本文提出理想分割因子: 它是 M 个分割因子中的一个, 它使网的费用不高于 M 个分割因子对应的 M 个网的平均费用, 在任何网失效状态下, 它使网的生存性不低于 M 个分割因子对应的 M 个网的平均生存性。

要找到一个理想分割因子, 计算和仿真的方法是不适用的, 因为随着网的端数 a 的增大, 网的分割因子总数 M 以指数律递增。这里采用的是数学推导的方法。在找到一个理想分割因子之前, 需要选取生存性模型, 因为网生存性设计总是根据生存性模型进行的。

文献 [7, 8] 中提出了几个生存性模型, 以文献 [8] 的总结最为全面。文献 [8] 将生存性模型分为 ROF 和 GOF 两类, 在实际应用时, ROF 和 GOF 是有很大不同的, 但在理论上, ROF(Random Occurance of Failure) 是 GOF(Given Occurance of Failure) 的特例。本文选取 GOF 并加以适当修改, 得到修改后的 GOF 生存性模型如下:

- (1) 网失效状态 F : 任意。
- (2) 在网失效状态 F 下网失效事件集: 记为 e_1, \dots, e_L , 且条件概率依次为 p_1, \dots, p_L 。
- (3) 生存对象 x : 网的中继容量。
- (4) 生存目标: 在网失效事件发生时使残存子网中恢复的 x 最大。
- (5) 生存度量。

生存属性: $s_a^{(l)}$ 为网失效事件 e_l 发生后若没采取网恢复操作, 残存子网中 x 的百分比; $s_r^{(l)}$ 为网失效事件 e_l 发生后若采取网恢复操作, 残存子网中 x 的百分比。

生存函数: $ES_a^{(l)} = \sum_{l=1}^L s_a^{(l)} p_l$, $ES_r^{(l)} = \sum_{l=1}^L s_r^{(l)} p_l$, $S_a^* = \min_{l=1, \dots, L} s_a^{(l)}$, $S_r^* = \min_{l=1, \dots, L} s_r^{(l)}$ 。 $s_a^{(l)}$ 是静态的生存性, $s_r^{(l)}$ 是动态的生存性, 它考虑了网恢复操作。文献 [8] 中计入了网恢复操作所需要的时间, 实际上, 在同样的网络环境下, 不同的恢复操作所需的时间是不一样的。这里不考虑网恢复操作所需要的时间, 把生存性理解为理论上恢复的极限结果。

除此之外, 网的费用 c 定义为每条链的容量乘以链长之总和。

M 个网分割因子对应了 M 个网, 利用上面的记号, 不妨记第 m 个网的生存性为: $s_a^{(l,m)}$, $s_r^{(l,m)}$, $ES_a^{(l,m)}$, $s_a^{*(m)}$, $s_r^{*(m)}$, 其费用为 $c^{(m)}$, $m = 1, \dots, M$.

3 理论分析

分集路由的理想分割因子是否存在, 若存在如何找到一个, 这是本节要回答的问题。为叙述方便, 设均匀分割因子对应的是 M 个网中的第一个网, 则这个网的生存性必满足:

$$s_a^{(l,1)} \geq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_a^{(l,m)}, \quad s_r^{(l,1)} \geq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_r^{(l,m)}.$$

由此立即可以推出:

$$ES_a^{(l,1)} \geq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M ES_a^{(l,m)}, \quad ES_r^{(l,1)} \geq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M ES_r^{(l,m)},$$

$$s_a^{*(1)} \geq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_a^{*(m)}, \quad s_r^{*(1)} \geq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_r^{*(m)}.$$

不仅如此, 这个网的费用还满足: $c^{(1)} \leq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M c^{(m)}$, 也就是说均匀分割因子是一个理想分割因子。下面来证明这个结论, 在证明过程中使用了强大数定律, 所用的极限符号都表示几乎处处收敛。

对 M 个网进行完全随机的抽样, 样本量设为 N 。将这 N 个抽样所得的网叠加起来, 即源宿端 i 、 j 之间每条路由上分配的中继容量为 N 个网相应路由上分配的中继容量之和, 链上备用容量为原来的 N 倍, 不过, 端点不是简单地将 N 个相应的端点重叠, 而是具有理想恢复能力的大容量交换设备。这样得到一个理论上的“叠加网”。

由于任意源宿端 i 、 j 之间的 K_{ij} 条路由在中继容量的分配过程中都是被平等对待的, 因此, 根据强大数定律, 在“叠加网”中源宿端 i 、 j 之间每一条路由上分配的中继容量 $T_{ij}^{(k)}$ ($k = 1, \dots, K_{ij}$) 满足:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{T_{ij}^{(k)}}{N} = \frac{T_{ij}}{K_{ij}},$$

而“叠加网”每条链上备用容量除以 N 仍不变, 这说明: 将“叠加网”每条链上容量都除以 N , 并令 $N \rightarrow \infty$, 则得到的极限网即为第一个网, 采用的是均匀分割因子。

记“叠加网”的生存性为 $s_a^{(l,A)}$, $s_r^{(l,A)}$, $ES_a^{(l,A)}$, $ES_r^{(l,A)}$, $s_a^{*(A)}$, $s_r^{*(A)}$, 其费用为 $c^{(A)}$ 。又设第 n 个抽样所得的网对应 M 个网中的第 $m(n)$ 个网, 则对 $l = 1, \dots, L$ 显然就有

$$\sum_{n=1}^N s_a^{(l,m(n))} = s_a^{(l,A)}, \quad \sum_{n=1}^N s_r^{(l,m(n))} \leq s_r^{(l,A)}.$$

因为 M 个网被等概抽样, 由强大数定律有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_a^{(l,m(n))} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_a^{(l,m)}, \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_r^{(l,m(n))} \leq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_r^{(l,m)}.$$

显然

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} s_a^{(l,A)} = s_a^{(l,1)}, \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} s_r^{(l,A)} = s_r^{(l,1)}.$$

从而

$$s_a^{(l,1)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_a^{(l,m)}, \quad s_r^{(l,1)} \geq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M s_r^{(l,m)}.$$

至此已证明均匀分割因子在生存性方面满足理想分割因子的要求, 下面分析费用方面。

据“叠加网”的构造知

$$c^{(A)} = \sum_{n=1}^N c^{(m(n))} = \sum_{i,j=1}^a \sum_{k=1}^{K_{ij}} T_{ij}^{(k)} d_{ij}^{(k)},$$

其中 $d_{ij}^{(k)}$ 是源宿端 i, j 之间 K_{ij} 条路由中第 k 条的长度而

$$c^{(1)} = \sum_{i,j=1}^a \sum_{k=1}^{K_{ij}} \frac{T_{ij}^{(k)}}{K_{ij}} d_{ij}^{(k)},$$

由前面已证明的 $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{T_{ij}^{(k)}}{N} = \frac{T_{ij}}{K_{ij}}$ 立即可得 $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} c^{(A)} = c^{(1)}$ 。又因为 M 个网被等概抽样, 由强大数定律有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N c^{(m(n))} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M c^{(m)}, \quad \text{于是} \quad c^{(1)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M c^{(m)}.$$

至此已说明均匀分割因子是一个理想分割因子。

4 进一步讨论

从第 3 节的理论分析结果看到, 分集路由的均匀分割因子对网的生存性和费用有独特的影响。这结果是在网的各条链上的备用容量不随分割因子变化而变化的条件下得到的。在本节中从另一个角度, 即各条链上备用容量可以随分割因子不同而不同, 来考察均匀分割因子对网生存性和费用的独特影响。

设对每一个网分割因子, 链备用容量都是在最小费用准则下设计的, 并能保证网达到某水平的生存性, 例如: 保证网在单端点失效状态下能恢复至少比例为 α 的网中继容量, 或保证网在单链失效状态下能使任何受影响的源宿端 i, j 之间至少有比例为 α_{ij} 的中继容量不受影响。那么, 用与第 3 节分析方法类似的方法可以证明: 均匀分割因子对应的网备用容量费用、网费用分别不会超过所有分割因子对应的网备用容量费用平均值、网费用平均值。

5 结 语

分集路由的分割因子对网生存性和费用的影响往往是不平衡的, 几乎不可能有一个分割因子使网的费用最低、而生存性最好。本文试图对任意的网络拓扑, 找到一个理想分割因子, 使网的费用不高于平均费用, 而在任何失效状态下, 网的生存性都不低于平均网生存性。用计算

和仿真的方法是难以得知理想分割因子的存在并找到一个理想分割因子的。本文用数学方法推导出均匀分割因子是一个理想分割因子,这对于网的生存性设计提供了有益的参考。

致谢 本文作者非常感谢周炯磐先生给予的宝贵指导!

参 考 文 献

- [1] Kane-esrig Y, *et al.* Survivability risk analysis and cost comparison of SONET architectures. Globecom'92, 841-846.
- [2] Kane-esrig Y, *et al.* DCS mesh architecture with distributed control: Risk and cost. ICC'93, Geneva: 1993, 633-637.
- [3] Herzberg M, Bye S J. An optimal spare-capacity assignment model for survivable networks with hop limits. Globecom'94, 1994, 1601-1606.
- [4] Venables B D, *et al.* Two strategies for spare capacity placement in mesh restorable networks. ICC'93, 1993, 267-271.
- [5] Ash G R, *et al.* Robust design of dynamic routing networks. Infocom'91, Florida: 1991, 508-514.
- [6] Medhi D. Diverse routing for survivability in a fiber-based sparse network. ICC'91, Colorado: 1991, 672-676.
- [7] Grotschel M, *et al.* Polyhedral Approaches to Network Survivability. DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 1991, Vol.5, 121-141.
- [8] Zolfaghari A, Kaudel F J. Framework for network survivability performance. IEEE J. of Selected Areas in Communications, 1994, SAC-12(1): 46-51.
- [8] Liew S C, Lu K W. A framework for characterizing disaster-based network survivability. IEEE J. of Selected Areas in Communications, 1994, SAC-12(1): 52-58.

ANALYSIS OF DIVERSE ROUTING FOR NETWORK SURVIVABILITY DESIGN

Tang Jian Lei Zhenming

(Dept. of Information Eng., Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

Abstract It is important to design survivability for a broadband communication network. Network survivability is affected by many factors including routing. The effect of splitting factors of diverse routing is analyzed and the particular advantages of the even splitting factor is discovered. This research result provides a reasonable consideration to network survivability design.

Key words Survivability, Diverse routing, Splitting factor

唐 健: 女, 博士研究生, 目前主要从事通信网理论的研究, 在国内外已发表论文近 20 篇。

雷振明: 男, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学 ATM 研究中心主任, 目前正领导着国家 863 课题——ATM 交叉连接机的研制开发工作。