

# 部件不可靠下的通信网业务性能分析

刘爱民, 刘有恒

(北京大学电子学系, 北京 100871)

**摘要:** 分析网络在部件不可靠时的业务性能, 通常采用网络状态法, 即首先得到不同状态下的性能指标, 然后通过状态概率得到平均业务性能. 本文将考虑部件可靠性对部件业务性能的影响, 提出一种基于不可靠设备业务性能的设备状态法, 这相当于仅考虑一个网络状态的业务性能, 所以比任何网络状态法简单, 而且由于可分析设备失效而中断的业务量, 还可以用于分析自愈网的性能.

**关键词:** 通信网; 可靠性; 业务性能; 自愈

**中图分类号:** TN915.0      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372 2112 (2002) 10 1459 04

## Traffic Performance Analysis of Network with Unreliable Components

LIU Ai-min, LIU You-heng

(Dept of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The current researches on traffic performance are commonly undergone by using network's state method, that we calculate the performance index of each state of network and then obtain the mean value of performance, by using the state probability. This paper discusses the effect of components' reliability on components' performance, and presents an approach, named by components' state method, which is based on the performance of components' unreliability. It can use the current performance analysis method of network with reliable components, and meantime can even analyze the breaking traffic because of components' failure, which can be used to analyze the performance of self healing network.

**Key words:** communication network; reliability; traffic performance; self healing

### 1 引言

作为通信用的各种设备, 均要服务通信业务, 如果足够多的业务占用了设备的所有资源, 设备对其它业务而言是阻塞的, 这种阻塞与设备资源有关, 通常资源越少, 业务量越大, 阻塞概率会越大. 对于这种与设备资源有关的阻塞研究较早也较多, 且主要应用排队论方法<sup>[1]</sup>, 网络业务性能通常利用迭代的方法<sup>[2]</sup>.

另一方面, 如果设备不可靠, 则当设备正常运行时, 业务才能充分利用设备资源, 当设备不正常时, 业务不能充分甚至完全不能利用设备资源. 实际上是设备的失效使得设备可利用资源降低, 从而增大了业务的阻塞概率.

通常设备并非绝对可靠的, 所以分析网络的业务性能, 不能也不应该忽略设备可靠性的影响. 在给定的网络拓扑结构中节点和链路处于不可靠工作状态下网络完成通信业务性能的能力, 这是网络的完成性问题. 研究网络的完成性, 需要建立相应的模型, 包括一个可靠性模型、一个性能模型以及两者相结合的方式. 可靠性模型是确定网络处于各网络部件失效、修复时的状况; 性能模型是确定网络的某些性能, 如时延、业务阻塞等; 两者相结合的方式目前主要是网络状态法, 即针对

不同状态下的性能研究, 然后根据状态概率进行综合. 每种网络状态下的性能通常采用近似计算或模拟分析; 解决状态空间问题的办法主要有 ORDER<sup>[3, 4]</sup>及其改进算法<sup>[5, 6]</sup>; 或作一些特殊假设以限定状态只处于有限的几个之中; 或研究状态之间的关系以尽量减少状态数<sup>[7]</sup>.

本文分析设备可靠性对设备业务性能的影响, 提出将可靠性模型和业务性能模型在设备级相结合的方式, 然后可以得到节点对的业务性能, 为分析网络的业务性能提供保证. 由于本方法基于不可靠设备的业务性能, 所以称为设备状态法.

### 2 设备的业务性能模型

#### 2.1 业务模型

对于设备而言, 不同的业务具有不同的业务模型, 通常假定业务到达设备申请设备资源的过程为泊松(Poisson)过程, 业务占用设备信道的时间为负指数分布, 设其  $N$  个信道是双向的, 因而一旦某信道被一个方向的业务占用, 不仅本方向而且反方向的另外业务也不能占用(没有优先抢占), 即各业务以泊松到达来占用某信道一个负指数分布的时间. 由泊松过程的特性, 复合业务流也是泊松过程<sup>[1]</sup>, 这样实际是所有要通

过此设备的业务组成的泊松流占用此  $N$  个信道.

设  $\lambda$  为复合业务流的到达率;  $1/\mu$  为业务占用设备的平均时间. 则到达设备的业务强度(呼叫量)为  $a = \lambda/\mu$ . 在一定时间  $\tau$  内的业务量为  $a\tau$ . 如果设备绝对可靠, 则业务的阻塞概率将满足 Erlang-B 公式:

$$q = (a^N/N!) \left/ \sum_{m=0}^N a^m/m! \right. \quad (1)$$

而  $1-q$  是业务的通过率. 这里是业务量和设备资源共同对业务的接通产生影响.

## 2.2 可靠性模型

通常假定设备只有正常和失效两个状态, 设备正常运行时, 业务能占用设备的全部资源, 失效时, 设备的任何资源都不能被业务占用; 当设备自然失效后, 即处于失效状态时, 设备立即得到维修, 设备得到修复后, 即刻又进入正常运行的状态.

假设设备的平均无故障工作时间(MTBF)为  $T_B$  (故障率  $\alpha = 1/T_B$ ), 平均修复时间(MTTR)为  $T_R$  (修复率  $\beta = 1/T_R$ ), 则设备随时间  $\tau$  变化发生故障和发生故障后被修复而重新投入使用的概率分别表示为:

$$\begin{aligned} P_B(\tau) &= 1 - e^{-\tau/T_B} = 1 - e^{-\alpha\tau} \\ P_R(\tau) &= 1 - e^{-(\tau - T_B)/T_R} = 1 - e^{-\beta(\tau - T_B)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $t_B$  为设备发生故障的时刻. 因而设备在  $\tau$  时刻正常运行的概率(在可修复系统中称为可用度, 这是瞬时可用度)为 ( $\tau = 0$  时设备正常)<sup>[8]</sup>:

$$P(\tau) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} e^{-(\alpha + \beta)\tau} \quad (3)$$

稳态时正常运行的概率(即稳态可用度)为<sup>[8]</sup>:

$$P = \lim_{\tau \rightarrow \infty} P(\tau) = \beta/(\alpha + \beta) \quad (4)$$

## 2.3 设备的业务性能

针对所研究的设备可靠性模型, 设备要么正常工作, 要么处于失效而正在维修的阶段, 周而复始. 平均地说, 一个从正常到失效再到正常的循环过程的时间为  $T_B + T_R$ , 因而在一个循环过程中总的业务量为  $\psi = a(T_B + T_R)$ ,  $a$  是所有时间内的到达设备的业务强度. 而在一个循环过程中, 设备经历三种情况:

(1) 设备正常运行时, 此时业务可申请占用设备的所有资源, 此时仅业务量和设备资源影响业务的占用, 设此时的业务拥塞概率为  $q_1$ . 实际上所有在此时间内欲申请设备的业务都可以申请, 这些业务量只是总业务量中的一部分, 即为总业务量与设备正常运行的概率之积, 稳态时为:

$$\psi' = \psi P = a(T_B + T_R)P = aT_B \quad (5)$$

因而在设备正常运行时间内, 业务强度为  $a' = \psi'/T_B = a$ , 由业务模型可知  $q_1$  满足式(1), 顺利申请到设备资源的业务量  $\psi''$  为:

$$\psi'' = \psi'(1 - q_1) = \psi P(1 - q_1) \quad (6)$$

须注意的是在设备正常运行时间内业务强度是  $a$ , 而不是  $aP$ . 这里阻塞的业务量  $\psi - \psi''$  将寻找另外的路由以便得以通信.

(2) 设备失效时刻, 设备失效时设备上的所有正在使用设

备资源的业务均会因中断通信而阻塞. 设此时的业务损失概率为  $q_2$ , 为因设备失效而中断的业务量与所有使用过设备资源的业务量的比值.

假定一个业务一旦因设备失效而中断, 不管此业务已使用设备资源多长时间, 都认为此业务被阻塞. 这在即时损失系统中是可行的, 在电话网中一次呼叫被中断, 此呼叫损失.

平均地说, 业务以某时间间隔  $\Delta\tau$  不断地申请并占用设备资源(这些是真正申请到了设备资源的业务, 也就是业务量  $\psi''$ ), 占用设备的持续时间为  $1/\mu$ ; 由于设备正常运行的时间为  $T_B$ , 故共有  $T_B/\Delta\tau$  个业务能申请到设备资源, 但由于业务持续时间为  $1/\mu$ , 所以在设备失效前的  $1/\mu$  时间内申请并占用了设备资源的业务终因设备失效而未能完成传输, 业务共有  $(1/\mu)/\Delta\tau = 1/(\mu\Delta\tau)$  个, 从而损失概率  $q_2$  为:

$$q_2 = \frac{1/(\mu\Delta\tau)}{T_B/\Delta\tau} = \frac{1}{\mu T_B} \quad (q_2 \leq 1) \quad (7)$$

上式考虑到损失概率不可能大于 1.

这部分阻塞的业务量与第一部分阻塞的业务量不同, 如果通信网没有自愈功能的话, 这些业务量将会损失; 如果能够自愈, 这部分阻塞的业务量可以寻找另外的路由.

(3) 设备失效之后, 此时任何业务均不能申请设备资源, 因而对设备而言不存在可以通过的业务. 设此时的业务阻塞概率为  $q_3$ , 为设备的失效概率, 即:

$$q_3 = 1 - P = \alpha/(\alpha + \beta) \quad (8)$$

这部分阻塞的业务量也将寻找另外的路由.

综上所述, 对于设备而言, 业务分为三种类型:

(1) 顺利通过设备的业务量, 即设备通过量为

$$\begin{aligned} \psi_P &= \psi''(1 - q_2) = \psi' [1 - q_1] (1 - q_2) \\ &= \psi [1 - q_1] (1 - q_2) (1 - q_3) \end{aligned} \quad (9)$$

相应设备的通过率为:

$$p = (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3) \quad (10)$$

(2) 实际寻找另外路由的业务量为,

$$\psi_o = \psi q_3 + \psi' q_1 = \psi [1 - (1 - q_1)(1 - q_3)] \quad (11a)$$

其中下标  $o$  表示其它(Other)路由. 相应业务寻找另外路由的概率为

$$q_o = 1 - (1 - q_1)(1 - q_3) \quad (12a)$$

(3) 直接因设备失效而损失的业务量为:

$$\psi_s = \psi'' q_2 = \psi [1 - q_1] (1 - q_3) q_2 \quad (13)$$

其中下标  $s$  表示损失的(Lose). 相应业务直接因失效而损失的概率为:

$$q_s = (1 - q_1)(1 - q_3) q_2 \quad (14)$$

如果网络能够自愈, 这部分也将寻找另外路由, 从而

$$\psi_o = \psi q_3 + \psi' q_1 + \psi'' q_2 = \psi [1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)] \quad (11b)$$

$$q_o = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3) \quad (12b)$$

这样通过利用式(1)、(7)、(8)可以得到设备的三种阻塞概率  $q_1, q_2, q_3$ ; 最后利用式(9)运算可以得到设备在不可靠情况下的业务通过率, 这不仅与设备资源有关( $q_1$ ), 而且与设备的可靠性有关( $q_2, q_3$ ).  $q_2$  中含有一个业务平均持续时间  $1/\mu$ , 如果网络中存在  $n$  种实时业务, 而各种业务的平均持续

时间和呼叫量分别为  $1/\mu_i, a_i (1 \leq i \leq n)$ , 那么复合业务流的平均持续时间  $1/\mu$  由:

$$\mu = \sum_{i=1}^n a_i \mu_i \setminus \sum_{i=1}^n a_i; 1/\mu = \sum_{i=1}^n a_i \setminus \sum_{i=1}^n a_i \mu_i \quad (15)$$

得到.

### 3 节点对业务性能

节点对之间通常有许多路由, 由于路由上的设备可能失效, 所以路由也可能失效. 对于某路由  $r$ , 时间  $\tau$  内的业务量负载  $\phi_r$ , 同样可以分成上述类似的三种: 顺利通过路由的业务量即通过量  $\phi_{rp}$ 、因路由由设备失效直接损失的业务量  $\phi_{rs}$  以及寻找另外路由的业务量  $\phi_{ro}$ . 其中  $\phi_{rp}$ 、 $\phi_{rs}$  一起即为能够申请到路由上所有设备的资源的业务量  $\phi_r''$ .

业务要顺利地在一路上申请占用设备资源, 首先需要路由上的所有设备均正常运行, 其次需要这些设备均没有因资源用尽而堵塞, 如果失效或资源用尽, 则业务将寻找下条路由, 这样两者共同作用与设备绝对可靠时因资源限制而阻塞业务的情形一样, 从而可采用设备绝对可靠时节点对业务性能的分析方法分析  $\phi_{rs}$ 、 $\phi_{ro}$  与  $\phi_r$  及节点对业务量  $\phi$  的关系, 从而得到  $\phi_{rs}$ 、 $\phi_{ro}$ , 只不过利用的是设备失效或资源用尽的概率. 由于假定路由上的各设备的堵塞及失效都相互独立, 所以设备  $g$  正常运行且资源没有用尽的概率  $p_g$ , 设备失效或资源用尽的概率  $q_g$  为:

$$p_g = (1 - q_{1g})(1 - q_{3g}); q_g = 1 - p_g \quad (16)$$

式中  $q_{1g}, q_{3g}$  为设备  $g$  的阻塞概率  $q_1, q_3$ .

由于  $\phi_r''$  是由  $\phi_{rp}$  和  $\phi_{rs}$  组成. 要获得路由的业务通过量, 需要得到损失业务量.

如果路由由正顺利地传送业务, 其上某设备突然失效, 则正在通信的业务会中断而阻塞. 路由随时间也是一个从正常到失效再到正常的循环过程, 一个循环过程的时间为  $T_{Br} + T_{Rr}$ , 这里  $T_{Br}, T_{Rr}$  称为路由  $r$  的 MTBF、MTTR. 从而路由在时间  $\tau$  内共有  $n$  个循环:

$$n = \frac{\tau}{T_{Br} + T_{Rr}} \quad (17)$$

对于一个循环过程, 网络传送申请到路由上设备资源的业务量为  $\phi_r''/n$ , 与设备损失概率  $q_2$  类似, 参照式(7), 路由的损失概率  $q_{2r}$  为:

$$q_{2r} = \frac{1}{1/T_{Br}} \quad (18)$$

式中  $1/\mu$  为业务占用路由的时间, 由于忽略时延, 也就是占用路由中某设备资源时间. 由于路由上的任何设备失效都使得路由失效, 所以设备是串联的, 从而:

$$\frac{1}{T_{Br}} = \sum_{g \in r} \frac{1}{T_{Bg}} \quad (19)$$

其中:  $T_{Bg}$  是设备  $g$  的 MTBF,  $g \in r$  表示设备  $g$  在路由  $r$  上. 式(19)表明路由的 MTBF 倒数是路由上的各设备 MTBF 倒数之和, 将上式代入式(18), 并考虑式(7), 得:

$$q_{2r} = \sum_{g \in r} q_{2g} \quad (20)$$

式中  $q_{2g}$  为设备  $g$  的损失概率  $q_2$ . 从而路由的损失概率  $q_{2r}$  为其上的所有设备的损失概率  $q_{2g}$  之和. 实际上各设备失效相互独立, 因而每个设备失效引起路由上正在通信的业务中断是互不相容的.

所以,  $\tau$  时间内路由由设备失效直接损失的业务量  $\phi_{rs}$  为:

$$\phi_{rs} = n \times (q_{2r} \times \frac{\phi_r''}{n}) = \phi_r'' q_{2r} = \phi_r'' \sum_{g \in r} q_{2g} \quad (21)$$

这部分业务在网络具有自愈功能时, 将寻求另外的路由通信. 路由  $r$  上的顺利通过的业务量为:

$$\phi_{rp} = \phi_r'' - \phi_{rs} = \phi_r'' - \phi_r'' \sum_{g \in r} q_{2g} = \phi_r'' (1 - \sum_{g \in r} q_{2g}) \quad (22)$$

则节点对间的业务通过率为:

$$p = \sum_r \phi_{rp} / \phi \quad (23)$$

综上所述, 以设备失效或资源用尽的概率代替通常业务性能分析方法中的设备阻塞概率, 从而可利用通常的节点对性能方法, 得到节点对每条路由上的能申请路由由设备资源的业务量  $\phi_r''$ , 利用式(22)减去因路由由设备失效直接损失的业务量, 得到每条路由上的业务通过量  $\phi_{rp}$ , 最终可得到节点对业务通过量, 从而可分析网络的业务性能.

如果网络有自愈功能, 则在分析方法中考虑寻找另外路由的业务量由上述  $\phi_{rs}$  和  $\phi_{ro}$  共同组成, 也可顺利分析网络的业务性能.

### 4 举例

针对网络示例图, 如图 1 所示, 分别进行数学计算分析和计算机模拟分析, 网络有 10 个节点, 干线链路的话路数为 30, 节点交换机绳路数为 60, 假定业务流向矩阵是均匀的, 从一个节点入网的业务到其它 9 个用户交换机的百分比均为 11.1%, 而且从各节点入网的业务量相等. 路由由表中其顺序路由的产生方式是纵向优先遍历法<sup>[9]</sup>, 且仅仅取前 5 条作为路由表的, 网络没有自愈功能.

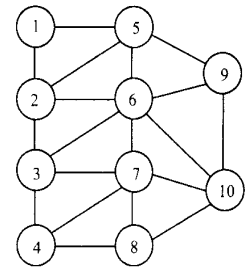


图 1 网络示例图

假定节点绝对可靠, 而干线链路的可靠性分三种情况: (1) MTBF 为 27 小时, MTTR 为 3 小时, 即可用度  $P_L = 0.9$ ; (2) MTBF 为 29.7 小时, MTTR 为 0.3 小时, 即可用度  $P_L = 0.99$ . (3) 绝对可靠,  $P_L = 1$ .

节点入网呼叫量为 18erlang, 并假定呼叫平均持续时间为 120 秒. 通过分析可以得到各节点对的业务通过率, 从节点入网的业务的通过率及网络业务通过率. 部分结果列入表 1, 其中  $1 \rightarrow 10$  表示从节点 1 到节点 10 的业务性能. 计算用迭代精度为 0.01%, 模拟方法采用 MONTECALO 方法仿真真实的过程. 随着时间的推移, 每条链路各自独立按照自己的随机过程失效及修复, 同时从各个节点进入网络的泊松业务在到达时刻申请相应路由表中的路由, 结束时刻释放所占资源. 仿真

中对每 256 个业务的通过率作为网络通过率一个样本, 模拟结果的置信度都是 90%, 相对置信宽度为 0.01%.

表 1 示例网络的业务性能

	呼叫量 (erlang)	通过率 ( $P_L = 0.9$ )		通过率 ( $P_L = 0.99$ )		通过率 ( $P_L = 1$ )	
		计算	模拟	计算	模拟	计算	模拟
$1 \rightarrow 10$	2	0.92507	0.88035	0.98990	0.98524	0.99782	0.99828
$2 \rightarrow 5$	2	0.92968	0.91143	0.90788	0.91619	0.90635	0.91761
$3 \rightarrow 9$	2	0.76739	0.74339	0.80976	0.80446	0.81614	0.80433
$7 \rightarrow 4$	2	0.96475	0.94210	0.97250	0.97869	0.97450	0.98016
$8 \rightarrow 6$	2	0.70028	0.73613	0.71047	0.71885	0.71327	0.72106
从节点 1 入网	18	0.83371	0.80147	0.88397	0.87814	0.89037	0.88874
从节点 2 入网	18	0.82496	0.80167	0.83283	0.83695	0.83459	0.84287
从节点 4 入网	18	0.86212	0.82638	0.89212	0.88840	0.89645	0.89582
从节点 6 入网	18	0.68597	0.71732	0.69239	0.70404	0.69450	0.70733
从节点 7 入网	18	0.85924	0.83072	0.88606	0.88583	0.89054	0.89211
从节点 8 入网	18	0.88904	0.86734	0.91717	0.91375	0.92116	0.91984
从节点 10 入网	18	0.89649	0.88002	0.92674	0.92643	0.93122	0.93266
网络	180	0.84369	0.82434	0.86818	0.86745	0.87196	0.87369

表 1 中给出的计算和模拟的结果比较符合, 且设备可用度越大, 符合程度越大. 实际上设备可用度越小, 在设备正常工作的时间内的呼叫到达规律越偏离泊松到达律<sup>[10]</sup>, 从而理论计算偏差会越大.

## 5 结论

分析网络在部件不可靠时的业务性能, 通常采用网络状态法, 即首先得到不同状态下的性能指标, 然后通过状态概率得到平均业务性能. 本文则考虑部件可靠性对部件业务性能的影响, 提出一种基于不可靠设备业务性能的设备状态法, 这将设备的失效或资源用尽的概率作为一个总的参量当作设备的拥塞概率, 从而可以充分利用现有的网络业务性能方法分析, 得到节点对每条路由上业务性能, 相应可获得节点对的业务性能、网络的业务性能. 这种方法相当于仅考虑一个网络状态的业务性能, 因而比任何网络状态法简单, 而且由于可分析设备失效而中断的业务量, 还可以用于分析自愈网的性能.

### 参考文献:

- [1] M 施瓦茨著, 屠世桢译. 电信网——协议、建模与分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1981.
- [2] J M Akinpelu. The overload performance of engineered networks with nonhierarchical and hierarchical routing [J]. AT&T Bell Lab. Techn. J., 1984, 63(7): 1261-1281.
- [3] V O K Li, A Silvester. Performance analysis of network with unreliable

components [J]. IEEE Trans. Communication, 1984, 32(10): 1105-1110.

- [4] Y F Lam, V O K Li. An improved algorithm for performance analysis of networks with unreliable components [J]. IEEE Trans. Communication, 1986, 34(5): 496-497.
- [5] S N Chiou, V O K Li. Reliability analysis of a communication network with multimode components [J]. IEEE J. Select. Areas in Comm., 1986, 4(7): 1156-1161.
- [6] C L Yang, P Kuhat. Efficient computation of most probable states for communication networks with multimode components [J]. IEEE Trans. Communication, 1989, 37(5): 535-538.
- [7] 熊庆旭, 刘有恒. 基于网络状态之间关系的网络的可靠性分析 [J]. 通信学报 1998, 19(3): 55-61.
- [8] 周炯. 通信网理论基础(第一版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1991.
- [9] 麦中凡. 程序设计技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [10] 刘爱民. 电信网可靠性和业务性能 [D]. 北京: 北京大学研究生院, 1998.

### 作者简介:

刘爱民 男, 1966 年 6 月出生于湖南省新邵县, 北京大学电子学系博士毕业留校, 目前从事通信网性能评估、设计的研究工作.

刘有恒 男, 1934 年 5 月出生于福建省仙游县, 北京大学电子学系教授, 中国通信学会会员, 主要从事信号检测理论和通信网理论的研究工作.