

# 多核多线程处理器的随机测试流量生成技术

刘瑞东<sup>1</sup>, 安克<sup>2</sup>, 张烁<sup>3</sup>

(1. 解放军信息工程大学信息工程学院通信工程系, 郑州 450002; 2. 解放军92081部队, 青岛 266109; 3. 解放军信息工程大学信息工程学院计算机与科学系, 郑州 450002)

**摘要:**以可编程多核多线程处理器 IXP2400 为例, 围绕随机测试流量的生成问题进行讨论, 推导出随机测试流量生成公式, 利用分解法对 GI/G/m/∞/FCFS 多类型客户输入开放排队网络求解, 给出输出流到达时间间隔变异系数的求解方法, 通过控制测试帧间时延使得生成的测试流量符合多种概率分布。提出的技术应用于“基于 IXP2400 的网络测试系统”, 并对其进行测试, 实验验证了该技术的可用性及其有效性。

**关键词:**多核多线程处理器; 排队网络; 测试流量; 变异系数

## Stochastic Test Traffic Generating Technology of Multi-core and Multi-threading Processor

LIU Rui-dong<sup>1</sup>, AN Ke<sup>2</sup>, ZHANG Shuo<sup>3</sup>

(1. Department of Communication Engineering, Information Engineering School, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002; 2. Public Liberation Army 92081 Unit, Qingdao 266109; 3. Department of Computer and Science, Information Engineering School, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002)

**【Abstract】**This paper analyzes the problem of stochastic test traffic generating, concludes the generating expressions of stochastic test traffic. In the process of concluding, the paper uses GI/G/m/∞/FCFS multiclass open queuing network model to describe it, and gives a new formula for the variation coefficient of the interdeparture time, which controls the latency to make test traffic fit several probability. This paper applies it on the network test system with multi-core and multi-threading processor. Test results show the methodology is available and valid.

**【Key words】**multi-core and multi-threading processor; queuing network; test traffic; variation coefficient

### 1 概述

随机测试流量的生成是网络测试技术的关键技术之一, 尤其在局域网的测试中有着重要意义。目前排队论的结论被广泛地应用于通信系统、计算机网络、大规模生产制造系统中。其研究对象由早期的经典排队论的单个服务台和单类型顾客排队系统发展到多服务台多类型顾客的随机排队网络。

本文采用分解法分析 GI/G/m/∞/FCFS 非乘积形式解的多类型客户输入开放排队网络。该方法的第一步是计算顾客到达率和每个服务节点的顾客到达时间间隔的变异系数 (coefficient of variation)<sup>[1-2]</sup>, 从而将上述模型“分解”<sup>[3]</sup>为若干个独立的排队系统。

### 2 随机测试流量生成技术

#### 2.1 随机测试流量的组成问题

随机测试流量生成问题示意图如图 1 所示。

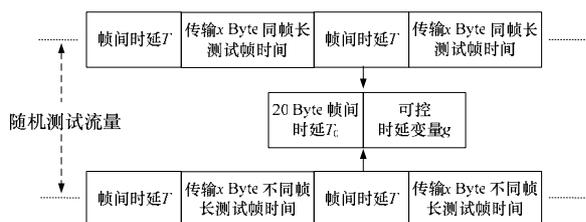


图 1 随机测试流量时间分布

其中, 测试帧间时延  $T$  的组成包括 2 个部分: (1) 20 Byte 的固

定测试帧间时延; (2) 可控时延变量  $g$ 。在随机测试流量中, 测试帧长  $x$  可按需求在 RFC1242, RFC2544 指定范围内 (64 Byte~1 518 Byte) 任意设定。解决随机测试流量生成问题的关键在于如何依据概率分布函数的相关参数 (期望与方差) 精确控制测试帧间时延。本文围绕该问题进行分析与讨论。

#### 2.2 模型映射

为体现本文并行规划方案在相同体系结构可编程多核芯片的可扩展性, 图 2 用省略号代表并行部分的多个微引擎<sup>[4]</sup>。

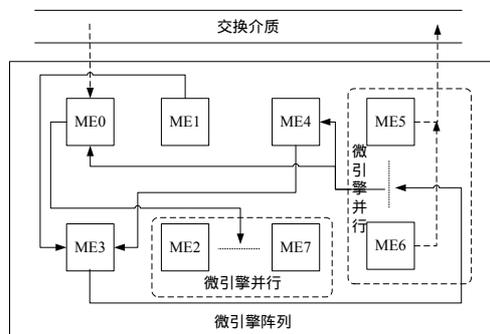


图 2 微引擎分配及并行方案

**基金项目:**河南省杰出人才创新基金资助项目(0521000200)

**作者简介:**刘瑞东(1961 -), 男, 副教授, 主研方向: 信息安全; 安克, 硕士; 张烁, 硕士研究生

**收稿日期:**2009-02-23 **E-mail:** Anke\_A@126.com

就 IXP2400 而言并行部分只包括 2 个微引擎：接收处理模块的 ME2, ME7 2 个微引擎；数据发送模块的 ME5, ME6 2 个微引擎。对于其他类似体系结构的硬件多线程多核处理器而言可根据相应情况进行扩展。

从随机测试流量生成模型映射到 GI/G/m/ /FCFS 非乘积形式解的多类型客户输入开放排队网络的过程来看，将其作为描述测试流量生成的模型具有一定合理性。

(1)测试流量的生成具有排队特征。从测试流量生成问题分析框架、对测试帧在线路上传输时间分布的分析及处理器生成测试帧速率 3 方面看，测试帧的生成速率与网络传输速率存在差异，消去这一差异的简单方法就是排队。而进行排队的测试帧可认为是排队系统中的顾客，且帧长是帧到达率与帧处理的决定性因素，因此，顾客类型可按测试帧长分类。

(2)处理器可映射为服务台。网络应用具有天然的模块化特征，且模块间呈弱相关性，针对随机测试流量生成而言可按功能将这一网络应用分为接收、接收处理、队列管理、调度、发送管理、发送 6 个模块，其中，每一个功能模块的处理器都可抽象为一个“服务台”。

(3)输入过程符合排队网络模型的约束条件。对于测试帧生成的流程可分为定义、构造、生成、排队及发送 5 个阶段，而对于测试帧发送速率的控制主要是在排队与发送 2 个阶段实现的。生成阶段所生成的测试帧可作为模型的输入，其特征如下：

1)任一时刻处理器只处于处理一个测试帧或空闲中的一种状态。

2)测试帧间相互独立，即顾客相互独立，属于基本的排队系统讨论范畴。

3)测试帧定义、构造和生成始终以处理器最大处理速率进行，并截取稳定的测试流量进行分析、讨论，保证了模型中输入的稳定性，从而满足了排队网络模型对“稳态”<sup>[3]</sup>的约束。

(4)队列长度“在通常的情况下，网络系统的服务速率要比测试帧的到达速率高很多。同时，目前的网络系统中缓冲区远大于系统中等待处理的包所需存储空间，因此，可以认为这类系统的队列长度为无穷大”<sup>[5]</sup>。

(5)排队规则符合排队网络模型的约束条件。随机测试流量中的测试帧以流的形式存在，采取先到先服务的服务规则。

(6)输出符合排队网络模型的约束条件。测试流量中的测试帧是以流的形式存在，对于单一服务台(处理器)而言测试帧从排队到发送是串行的，即同一时刻输入或输出发送功能单一服务台(处理器)的测试帧唯一。

通过上述分析，本节所提出的随机流量生成排队网络模型可映射为：GI/G/m/ /FCFS 非乘积形式解的多类型客户输入开放排队网络，如图 3 所示。

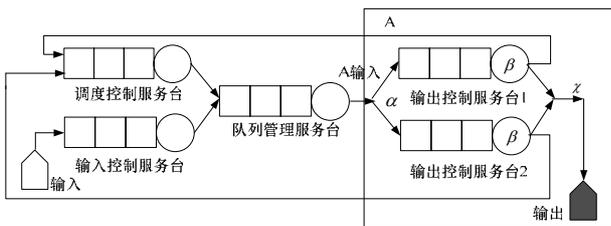


图 3 排队网络模型

对图 3 中随机测试流量生成模型求解可分为 3 个步骤：

(1)计算到达率和节点利用率。

(2)计算每个节点到达时间间隔的变异系数。

(3)计算队列长度的平均值和其他性能参数。

### 2.3 模型求解

图 3 中的 A 为本文重点研究部分，对 A 进行抽象建立随机测试流量生成求解模型，并引入变异系数，提出本文对于该部分的求解算法。

针对 A 进行抽象并建立求解示意图，如图 4 所示，其中，在已知输入  $(\lambda_i, c_i^2)$  及指定输出  $(\lambda_j, c_j^2)$ ， $\lambda_{\alpha m} = \lambda_{\chi m}$  的情况下对  $c_{\beta 1}^2, c_{\beta m}^2$  求解的过程，最终对控制测试帧间时延中可控变量  $g$  求解。

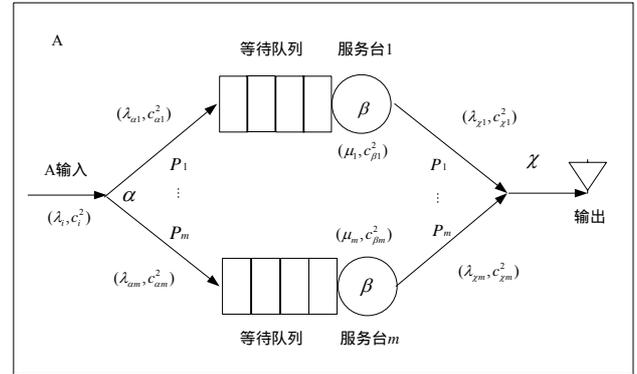


图 4 A 部分求解示意图

模型参数如下：

$\alpha$ ：测试帧生成模块的输出节点；

$\beta$ ：服务台  $m$  的输入节点；

$\chi$ ：测试帧发送模块的输出节点；

$\lambda_i$ ：节点  $a$  的  $i$  类型测试帧输入到达率期望；

$c_i^2$ ：节点  $a$  的  $i$  类型测试帧输入到达时间变异系数；

$\lambda_0$ ：模型系统外部测试帧到节点  $a$  的到达率期望；

$c_0^2$ ：模型系统外部测试帧到节点  $a$  的到达时间变异系数；

$\lambda_{\alpha 1}$ ：节点  $a$  的  $i$  类型测试帧输入服务台 1 的到达率期望；

$c_{\alpha 1}^2$ ：节点  $a$  的  $i$  类型测试帧输入服务台 1 的到达时间变异系数；

变异系数；

$\mu_1$ ：节点  $\beta$  的  $i$  类型服务台 1 的服务率；

$\mu_m$ ：节点  $\beta$  的  $i$  类型服务台  $m$  的服务率；

$c_{\beta 1}^2$ ：节点  $\beta$  的  $i$  类型服务台 1 的服务时间变异系数；

$c_{\beta m}^2$ ：节点  $\beta$  的  $i$  类型服务台  $m$  的服务时间变异系数；

$\lambda_{\chi 1}$ ：测试帧输出服务台 1 的到达率期望；

$c_{\chi 1}^2$ ：测试帧输出服务台 1 的到达时间变异系数；

$\lambda_{\chi m}$ ：测试帧输出服务台  $m$  的到达率期望；

$c_{\chi m}^2$ ：测试帧输出服务台  $m$  的到达时间变异系数期望；

$\lambda_j$ ：节点  $\chi$  的  $i$  类型发送功能模块的测试帧输出到达率期望；

期望；

$c_j^2$ ：节点  $\chi$  的  $i$  类型发送功能模块的测试帧输出到达时间变异系数；

变异系数；

$m$ ：服务台个数；

$P_0$ ：模型系统外部测试帧到节点  $a$  的到达概率；

$P_1$ ：到达服务台 1 的选路概率；

$P_m$ ：到达服务台  $m$  的选路概率， $m=1,2,\dots$ ；

$R$ ：以测试帧长分类的顾客类型；

$\lambda$  : 由网络外部到达节点  $i$  的类型  $R$  的顾客的到达率期望;

$\rho_1$  : 服务台 1 对  $i$  类型测试帧利用率;

$\rho_m$  : 服务台  $m$  对  $i$  类型测试帧利用率;

$t_1$  : 服务台 1 的空闲时间;

$t_m$  : 服务台  $m$  的空闲时间;

$g$  : 测试流量生成问题中的可控变量;

$nop$  : 一个空操作循环所用时间;

$Var$  : 服务台  $m$  的空闲时间与服务时间的方差;

$E$  : 服务台  $m$  的空闲时间与服务时间的数学期望。

假设及已知条件:

假设  $P_0 = 0, \mu_m \lambda_i; c_i^2 = 1$ , 第  $i$  类测试帧输出到达率期望为  $\lambda_j$ ; 变异系数为  $c_j^2, m = 2$ 。

对于节点  $\alpha$  已知:

$\lambda_i, \sum_{m=1}^N P_m = 1, P_1 = P_2 = \dots = P_m, \lambda_{\alpha m} = \lambda_i \times P_m$ 。

对于节点  $\beta$  已知:  $\mu_m, \mu_1 = \dots = \mu_m, c_{\beta 1}^2 = \dots = c_{\beta m}^2$ 。

对于节点  $\chi$  已知:  $c_{\chi 1}^2 = c_{\chi 2}^2 = \dots = c_{\chi m}^2$ 。

对于假设及已知条件中对区分  $i$  类测试帧到达率期望  $\lambda_i$  与到达时间间隔的变异系数  $c_i^2$  不属于本文讨论范畴, 因此, 利用假设条件对模型及公式适用范围加以约束。本节依据处理器的并行特征, 对  $P_m, (\lambda_{\alpha 1}, c_{\alpha 1}^2), (\lambda_{\alpha m}, c_{\alpha m}^2), (\lambda_{\beta 1}, c_{\beta 1}^2), (\lambda_{\beta m}, c_{\beta m}^2), (\mu_1, c_{\beta 1}^2), (\mu_m, c_{\beta m}^2)$  等的取值条件进行了约束, 即 2 个处理器的性能与处理参数完全相同, 在任务分配上采取了平均分配的原则。假设条件中指定输入测试流量的第  $i$  类测试帧输入到达率期望为  $\lambda_j$ 、变异系数为  $c_i^2$  为测试所需流量分布的参数, 因此, 也作为已知条件出现。本文直接采用 Pujolle<sup>[3]</sup> 给出的变异系数计算公式:

$$c_j^2 = \left( \frac{P_m \lambda_i}{m \mu_m} \right)^2 (1 + c_{\beta m}^2) + \left( 1 - \frac{P_m \lambda_i}{m \mu_m} \right) \left[ (1 + c_{\alpha m}^2) + \frac{2 P_m \lambda_i}{m \mu_m} \right] - 1$$

由此可得随机流量生成如下公式组, 并依据此公式组可生成多随机流量。

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{\beta m}^2 = \frac{c_j^2 - \left( 1 - \frac{P_m \lambda_i}{m \mu_m} \right) \left( c_{\alpha m}^2 + \frac{P_m \lambda_i}{m \mu_m} \right)}{\left( \frac{P_m \lambda_i}{m \mu_m} \right)^2} \\ c_{\beta m}^2 = \frac{Var \left( t_m + \frac{1}{\mu_m} \right)}{E^2 \left( t_m + \frac{1}{\mu_m} \right)} \\ g = \left[ \frac{t_m}{nop} \right] \end{array} \right.$$

### 3 测试与分析

本文利用“基于 IXP2400 的网络测试系统”发送 64 Byte 测试帧, 使得其生成的测试流的速率期望为 100 Mb/s, 测试帧到达时间间隔(帧间隔)的变异系数平方为 1(即发送出的测试帧的到达过程为泊松过程)。进行 1 ms, 10 ms, 100 ms 和 1 000 ms 间隔的生成测试流的速率采样, 测试时间为 3 000 s, 采样为所有数据中的连续 1 000 个数据。通过多次测试均可得到如图 5~图 8 所示的测试结果。

随机流量测试帧发送速率期望误差测试数据图如图 9 所示。

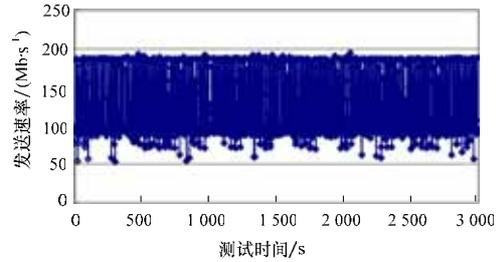


图 5 1 ms 采样发送速率

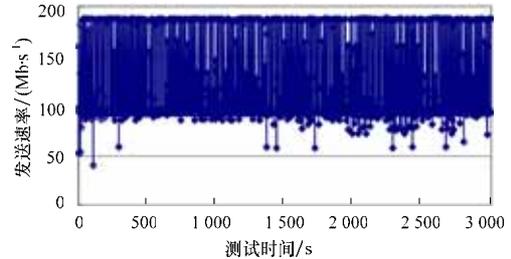


图 6 10 ms 采样的发送速率

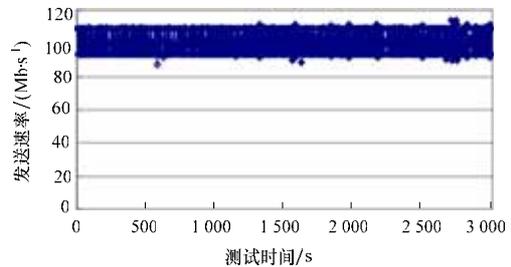


图 7 100 ms 采样的发送速率

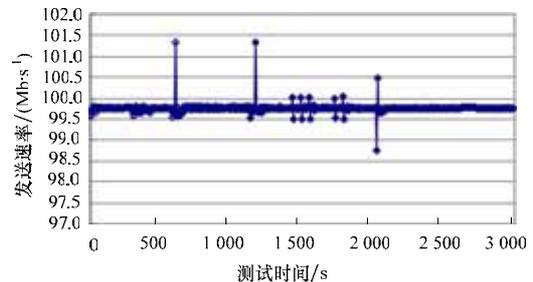


图 8 1 000 ms 采样的发送速率

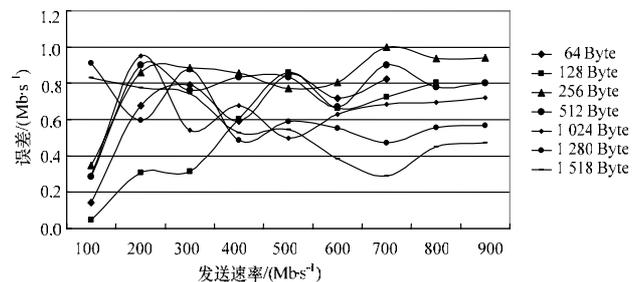


图 9 期望误差

观察图 6~图 9 可以发现:

(1) 采样时间间隔为 1 ms~1 000 ms 4 种情况时, 测试帧的发送速率均接近泊松分布。

(2) 不论采样间隔取何值, 测试帧发送速率的期望始终是 100 Mb/s。

(3) 随着取样时间间隔的加大, 测试帧发送速率的方差逐渐减小。

(下转第 100 页)