

片上网络流量模型的研究与实现

彭元喜, 陈 诚

(国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 分析了三种具有代表性的流量模型: 均匀分布、泊松分布、自相似流量模型, 并实现了基于这些模型的流量生成器. 模拟结果与预期结果符合, 目前流量生成器已经应用到实际模拟平台之中.

关键词: 流量模型; 片上网络; 片上多核系统

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)01-0161-04

The Study and Implementation on Traffic Model of Network-on-Chip

PENG Yuan-xi, CHEN Cheng

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper analyzes three representative traffic models frequently used in the network, and implements a traffic generator based on these models. The results of simulation are approximately in line with the expected results and the traffic generator are used in the actual simulation platform right now.

Key words: traffic model; networks-on-chip (NoC); chip multiprocessor (CMP)

1 引言

片上网络(Network-on-Chip, NoC)能克服总线的限制, 可重用性好, 大大提高设计效率; 可伸缩性好, 可并行进行多个传送事务, 有希望成为未来片上 IP 核互连的有效解决方法^[1]. 围绕 NoC 的关键技术研究取得了较大进展, 但是在 NoC 性能评价与仿真平台建模方面仍面临诸多挑战. 在系统建模中, 一个非常重要的方面就是提供人工合成流量, NoC 具有自相似的流量特性, NoC 流量模型的好坏直接关系到系统建模的成功与否.

流量模型是理解和预测网络行为、分析网络性能、设计网络的理论基础. 目前计算机网络流量模型^[2]主要有均匀分布、泊松分布、自相似流量模型. 已研究了片上处理器流量, 提出片上处理器的随机进程产生的流量具有自相似性, 这些都表明目前的计算机网络流量模型适应于片上网络.

2 片上网络流量模型研究

2.1 均匀流量模型

均匀流量模型(Uniform Random Traffic Model)就是假设发送报文的源端以恒定的速率向网络注入报文, 它是一种常用的流量模型. 设连续型随机变量 X 的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则称随机变量 X 服从 $[a, b]$ 上的均匀分布. X 落在 $[a, b]$ 的子区间内的概率只与子区间长度有关, 而与子区间位置无关. 均匀分布的流量模型就是假设发送报文的源端以恒定的速率向网络注入报文. 假设网络中发送报文的源端的报文注入率恒为 λ , 相邻发送的两报文之间的时间间隔为 μ , 则两者的关系为 $\lambda = \frac{1}{\mu}$.

收稿日期: 2009-12-18; 修回日期: 2010-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(60676010); 国家“八六三”计划项目(2007AA01Z108); 教育部长江学者和创新团队发展计划

均匀流量模型节点模式选择有两种方法,一种为随机选择(Normal Random),即在整个网络中,除了源节点所在的位置,其余的地方都是等概率的被选择作为报文目的节点.第二种模型为龙卷风(tornado)流量模型^[3],有逆时针和顺时针两种,如图1所示.它的好处是能够使流量均匀流向网络中的各个地方,使得网络中的节点和链路负载相对比较均衡.在后面目的节点的选择也都是这两种策略.

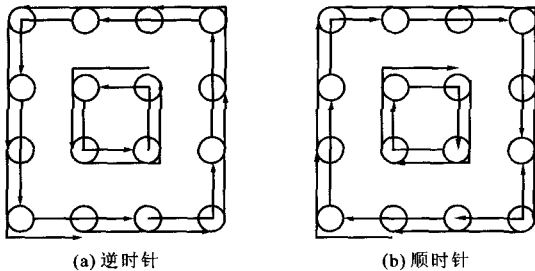


图1 龙卷风流量模型

2.2 泊松流量模型

泊松流量模型(Poisson Traffic Model)假设源端发送报文的过程服从伯努利过程(Bernoulli Process).对于报文发送,假设源端在单位时间内发送一个信元的概率为 λ ,任意不同的时间单位内是否发送报文是相互独立的,即假设模拟的时间 t 中共有 N 个时间单元,则这 N 个时间单元发送报文,相当于进行了 N 次的独立同分布的实验,则发送的报文数 x 服从参数为 λ, N 的二项式分布,记为 $X \sim B(N, \lambda)$,则 X 的期望为: $E(X) = \lambda N$.由概率论基本性质, λ 也为帧产生率或帧到达率, $1/\lambda$ 表示相继到达帧的平均间隔.

λ 表示单位时间内到达帧的概率,帧发送时间间隔的概率密度函数为 $\lambda e^{-\lambda t}$,即帧发送时间间隔服从指数分布,可根据这个性质来模拟客户发送数据包.

设单个客户发送相邻的两个分组的时间间隔为 x ,其服从指数分布.即 $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, x > 0$,设 $U = e^{-\lambda x}, x > 0$, U 服从于 $(0, 1)$ 上的均匀分布.其反函数为 $x = -\ln U/\lambda$,因此可以得到变化的时间间隔 x .

2.3 基于自相似的 ON/OFF 流量模型

2.3.1 自相关的相关数学定义

时间序列 X ,表示被测量流量的每单位时间到达的字节数或数据包数量.假设 $X = (X_t : t = 0, 1, \dots)$ 为广义平稳随机过程,即统计特性(均值、方差、相关等)不随时间推移而变化.一阶平稳(均值为常

数),二阶平稳(均值和方差为常数,任意两时间点之间的协方差只取决于时间间隔)^[4].

且其自相关函数为

$$r(k) = E[(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)] / E[(X_t - \mu)^2] \\ k \geq 0$$

假设某流量满足条件:

(1) 自相似的时间轴必须针对一个平稳随机过程 $X = (X_t : t = 0, 1, \dots)$.

(2) 自相关函数满足在时 $k \rightarrow \infty$,函数 $r(k)$ 有:

$$r(k) \sim k^{-\beta} L_1(t), 0 < \beta < 1;$$

其中, $L_1(t)$ 是一个缓变函数(常见的慢变函数,如 $L_1(t) = \text{常数}, L_1(t) = \log(t)$), $\sim$ 指渐近关闭状态,即,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} L_1(tx) / L_1(x) = 1, \forall x > 0$$

(3) 对 X 进行堆叠,堆叠产生的时间序列为 $X^{(m)} = (X_k^{(m)} : k = 1, 2, \dots)$.

其中

$$x_k^{(m)} = \frac{1}{m} (X_{km-m+1} + \dots + X_{km})$$

若对所有 $m = 1, 2, \dots, X^{(m)}$ 的自相关函数 $r^{(m)}$ 满足: $r^{(m)}(k) = r(k)$,则此流量具有自相似性.

自相似流量的自相似程度的大小可由Hurst参数 H 来刻画, H 取 $0.5 \sim 1.0$ 之间. $H = 0.5$ 时,表示业务流量不存在自相似性; $H = 1.0$ 时,表示业务流量的自相似性最强,越大则自相似程度越强.

2.3.2 重尾分布和帕累托分布

(1) 重尾分布(Heavy-tailed distribution)

对于非负随机变量 u ,其分布函数 $F(t)$ 和余分布函数 $F_c(t)$ 分别 $F(t) = P\{u \leq t\}$ 和 $F_c(t) = 1 - F(t)$.当 $F_c(t)$ 满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [F_c(t+s) / F_c(t)] = 1, s \geq 0$$

时,定义 $F(t)$ 为重尾分布.

(2) 帕累托分布(Pareto distribution)

Pareto分布是一种常用的重尾分布,其分布函数表示式为

$$F(t) = 1 - (k/t)^\alpha, \alpha, k > 0$$

其中, $\alpha(0 < \alpha < 2)$ 为形状参数,决定分布函数拖尾的严重程度; k 为位置参数.当 α 减小,大量的概率质量集中在分布的尾部.

2.3.3 建模原理

ON/OFF模型的建立是基于自相似过程的物理意义,Taqqu等从理论上证明了无穷多个独立的具有重尾分布的更新回报过程的迭加收敛于典型

的自相似过程分形布朗运动 (Fractional Brownian Motion, FBM)^[8]. 这里的更新回报过程是指 Packet-Train 模型中的 ON/OFF 过程, 具有严格交替的 ON 和 OFF 周期, 其中, ON 周期的时间或者 OFF 周期的时间或者二者具有重尾特性. 在 ON 周期, 以恒定的速率连续发送数据包; 在 OFF 周期, 不发送数据. 每个发生源 ON 或 OFF 的时长独立地符合重尾分布. 通过叠加 $m(m \rightarrow \infty)$ 个独立的 ON/OFF 业务源来产生具有自相似特性的网络流量.

对于 ON/OFF 模型所使用的 Pareto 函数:

$$F(x) = 1 - (k/x)^a, 0 < a, x > k$$

参数 k 决定了该随机变量可取的最小值, 参数 a 决定了该随机变量的均值和方差. 若 $a \leq 2$, 则该分布具有无限方差; 若 $a \leq 1$, 则该分布具有无限方差和均值.

ON/OFF 模型中一个关键的问题就是 ON 周期时间和 OFF 周期时间的确定. 建模过程中要首先给出参数: α_{ON} (ON 周期重尾特性参数), α_{OFF} (OFF 周期重尾特性参数) 和 K_{ON} , 然后推导出 ON 周期和 OFF 周期的时间.

下面是具体的推导过程:

对于服从 Pareto 分布的 ON 周期时间采用反函数法生成:

$$x = k/U^{1/a} \quad (1)$$

在上式中 U 为 $(0, 1]$ 范围内的服从均匀分布的随机变量, 则可用 $U = \text{random}(0, 1)$ 得到, a 为重尾特性参数, k 为 ON 周期时间或 OFF 周期时间的最小值. ON 周期和 OFF 周期均可通过不断生成均匀分布的随机数代入式 (3) 计算得出时间的值. 所不同的是 ON 周期和 OFF 周期的 k 的确定方法不同, 对于 ON 周期来说, 其最小值即为发送一个数据包所耗费的时间. 对于 OFF 周期, 其最小值由各源的负载比例即流量与带宽之比来确定, 在此假设各源的负载比例相同.

$$L_i = \text{Mean_ON} / (\text{Mean_ON} + \text{Mean_OFF}) \quad (2)$$

其中, Mean_ON 和 Mean_OFF 分别是平均 ON 周期时间和平均 OFF 周期时间.

当 $a > 1$ 时, Pareto 分布的数学期望为:

$$E(x) = ak / (a - 1)$$

然而, 通过计算机所生成的 $(0, 1]$ 范围内的均匀分布随机数是有界的, 设所能生成的 $(0, 1]$ 范围内的最小均匀分布随机数为 m , 则根据式 (1), 能生成的最大符合 Pareto 分布的值 $\max_x$ 为:

$$\max_x = k/m^{1/a} \quad (3)$$

于是 Pareto 分布的数学期望为:

$$E(x) = \int_k^{\max_x} x f(x) dx = \int_k^{\max_x} x \frac{ak^a}{x^{a+1}} dx = \frac{ak}{a-1} [1 - (k/\max_x)^{a-1}] = \frac{ak}{a-1} (1 - m^{\frac{a-1}{a}}) \quad (4)$$

由式 (2) ~ (4) 可得

$$k_{\text{OFF}} = K_{\text{ON}} \frac{T_{\text{OFF}}}{T_{\text{ON}}} \frac{1 - m^{T_{\text{ON}}}}{1 - m^{T_{\text{OFF}}}} \left(\frac{1}{L_i} - 1 \right)$$

$$T_{\text{ON}} = (a_{\text{ON}} - 1) / a_{\text{ON}}$$

式中, $T_{\text{OFF}} = (a_{\text{OFF}} - 1) / a_{\text{OFF}}$, K_{ON} 为 ON 周期时间最小值, K_{OFF} 为 OFF 周期时间最小值.

3 NoC 流量生成器的设计与实现

3.1 NoC 流量生成器的总体结构

NoC 流量生成器需与片上路由器 (verilog 语言实现) 进行接口, 因此流量发送须用 verilog 语言来实现, 报文的格式须严格遵循 NoC 协议. 但是由于流量模型的一些函数在 verilog 的环境下非常难以实现, 因此函数部分由 C++ 语言实现, 然后通过 txt 数据文件将必要的参数传递到 verilog 流量发生器中. 总体的结构图如图 2 所示.

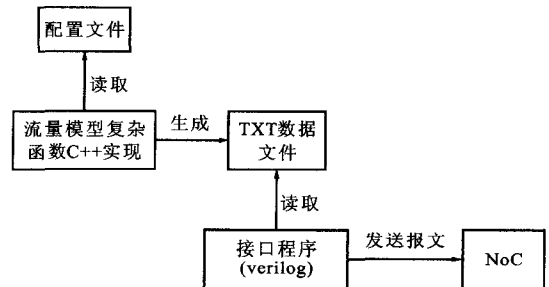


图2 流量生成器总体架构图

3.2 配置文件读取与分析

配置文件可以进行报文长度、各种流量模型及参数和节点模式的选择. 配置文件主要参数说明如下:

[MODEL]: Traffic Model, 流量模式可以选 UR/P/SS, 其中分别代表均匀 (Uniform Random), 泊松 (Poisson) 和自相似 (Self-Similar) 的流量模型.

[TIME]: Time of Simulation, 总的模拟时间长度, 单位为周期数.

[DESTINATION]: 报文发送的目的节点模式, 可以选 NR/TR, 分别代表随机 (normal random) 和龙卷风 (tornado random) 流量类型.

[UNIFORM RANDOM]:表示均匀流量模型,在其目录下的为它的特定参数.

[RATE]:客户端单位时间内的报文发送率,均匀模型和泊松模型都需要此参数.

[POISSON]:泊松分布,随后为其所需的参数.

[SELF-SIMILAR]:自相似分布,使用 ON/OFF 模型刻画,后为其所需参数.

[A_ON]:ON 周期重尾特性参数.

[A_OFF]:OFF 周期重尾特性参数.

[K_ON]:发送一个数据包所耗费的时间.

[L]:源节点发送的报文的负载.

[PACKET FORMAT]:报文格式.

[LENGTH]:报文的微片长度.

读取配置文件是通过 C++ 程序完成的,然后根据配置文件中的参数进行具体操作,并生成中间数据.

3.3 流量生成器

流量生成器的工作主要是读入中间数据,然后按照要求生成报文,并发送出去,其流程图如 3 所示.

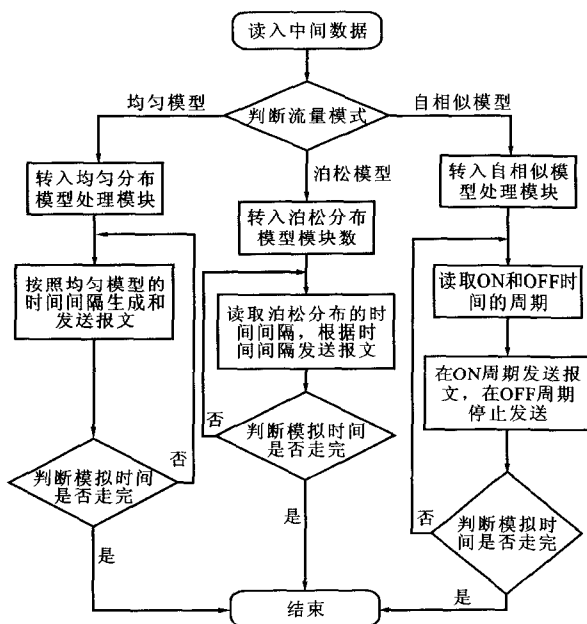


图3 流量生成器流程图

4 结束语

文中对三种具有代表性的流量模型:均匀流量模型、泊松流量模型、自相似流量模型进行了深入分析,特别研究了当前网络流量模型的热点——自相似流量模型,分析了多种自相似流量构造方法,经过分析比较,最终选取了实现比较简单但是能够充分反应流量特性的 ON/OFF 模型进行实现.最后通过程序实现移植到片上网络,同时也实现了均匀流量模型、泊松流量模型.模拟结果表明流量生成器模型功能正确.

目前该模型已经用于实际的 8×8 mesh 结构 NoC 模拟平台,效果良好.该 NoC 模拟平台的路由器结构已在^[6]中描述.

参考文献:

- [1] Benini L, De Micheli G. Networks on chips: a new SoC paradigm [J]. IEEE Computer, 2002, 35(1): 70-78.
- [2] 丁帅,吴宁,葛芬,等.片上网络路由单元的系统级建模研究[J].微电子学与计算机,2009,26(1):93-96.
- [3] Arjun S, Dally W J, Gupta A K, et al. GOAL: a load-balanced adaptive routing algorithm for torus networks[C]// Proceedings of the International Symposium on Computer Architecture (ISCA). USA: San Diego, 2003:194-205.
- [4] Abru P, Beitch D Wavelet. Analysis of long-range-dependent traffic[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(1):2-15.
- [5] Leland W E, Taqqu M S, Willinger W, et al. On the self-similar nature of ethernet traffic [J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1994, 2(1):1-15.
- [6] 朱红雷,彭元喜,马卓,等.一种支持 QoS 片上网络路由器的设计与实现[J].微电子学与计算机,2010,27(3):136-139.

作者简介:

彭元喜 男,(1966-),博士,副研究员,硕士生导师.研究方向为 NoC 设计、MPSoC 体系结构、微处理器设计.

陈 诚 男,(1987-).研究方向为 NoC 设计.