

文章编号:1001-9081(2009)09-2424-04

## 基于排队网络的多业务网络资源分析方法

张英<sup>1</sup>, 赵莉茹<sup>2</sup>, 谷新亮<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)  
(ccss@ict.ac.cn)

**摘要:**随着下一代网络(NGN)的发展和新业务不断涌现,如何优化网络资源是提高业务服务质量(QoS)的重要措施之一。针对资源配置优化问题,采用排队网络理论提出一种多业务网络的资源分析方法,建立了排队服务模型,定义了流量分配方法,进行了模型求解与计算,给出了多种资源与服务质量之间的配置关系。通过仿真实验,验证了该方法的正确性。

**关键词:**排队网络;多业务网络;资源分析;服务质量

**中图分类号:** TP393.0 **文献标志码:** A

## Resource analysis method for multi-service network based on queuing network

ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHAO Li-ru<sup>2</sup>, GU Xin-liang<sup>2</sup>

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100019, China;  
2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Nowadays, with the development of the Next Generation Network (NGN), a number of new services appear constantly. How to optimize network resource is one of the important measures to improve the Quality of Service (QoS). The authors proposed a method to analyze resource in multi-service network, which used queuing network theory to optimize the distribution of resources. The authors also presented a queuing service model to analyze resource, and proposed a way to distribute the flow and a process to solve. At last, the method gave the allocation relationships between various resources and QoS. Simulation results show the validity of the method.

**Key words:** queuing network; multi-service network; resource analysis; Quality of Service (QoS)

### 0 引言

在本代网络向下一代网络发展的过程中,基于 Internet 的业务出现了新的特点<sup>[1-2]</sup>,实时业务飞速增长且业务形式越来越多样化,诸如流媒体、移动计算等新型多媒体业务不断涌现,面对网络应用发展的特征,如何优化网络资源是提高业务服务质量的重要措施之一。

资源优化问题包括资源利用优化和资源配置优化两个方面。资源利用优化是以网络资源的利用率最大化或以承载业务量的最大化为目标,针对网络现有资源的分配管理及调度,如主动队列管理机制<sup>[3-4]</sup>,自适应的带宽分配策略<sup>[5-6]</sup>等,但这些大多研究的是面向单一资源的。资源配置优化是在分析网络负载及服务需求的基础上,研究多种资源与网络应用之间的配置关系,以利于优化资源配置从而提高网络性能,这一问题在网络系统设计和性能评价中尤为重要。

近年来,排队网络<sup>[7-8]</sup>一直是用来分析和评价计算机网络系统性能的主要方法之一,它具有求解相对简单、费用低等特点,从而使它在性能评价领域中占有重要地位。本文重点针对实时业务服务质量对网络资源的需求问题,采用排队网络理论提出一种多业务网络的资源分析方法,研究多种资源(带宽、吞吐量、缓冲区)与网络服务质量(时延、丢包、抖动)之间的配置关系。该方法在定义业务特征的基础上,建立了多类业务流排队服务模型和流量状态方程,并进行了模型的求解与计算,通过仿真实验,验证了该方法的正确性。

### 1 问题描述

本文的分析模型以任意源端至目的端的整条路径为对象,以多类应用的数据流为负载,提供由源节点发送并经中间节点跳转至目的节点的全网端到端分析。

无论何种类型的网络,在任意时间网络的分组到达率、分组长度等参数通常都是服从概率分布的随机变量。因此,本文采用 M/M/1/∞/N 模型,分组服从 Poisson 到达,排队规则采用混合制先来先服务机制。

设 M/M/1/∞/N 系统<sup>[9]</sup>的输入过程  $\{I(t), t \geq 0\}$  为参数是  $\lambda$  的泊松过程<sup>[10]32-36</sup>,即到达间隔时间序列  $\{J_k, k \geq 0\}$  为 i. i. d 随机变量序列,且  $J_1 \sim \Gamma(1, \lambda)$ 。服务机构有  $n$  个 ( $n \geq 1$ ) 服务台,每个服务台独立工作,且具有相同分布的服务时间  $B, B \sim \Gamma(1, \mu)$ ,即顾客的服务时间序列  $\{B_k, k \geq 1\}$  为 i. i. d 随机变量序列,且  $B_1 \sim \Gamma(1, \mu)$ 。并设  $\{B_k, k \geq 1\}$  与  $\{J_k, k \geq 1\}$  独立。且其最大容量为  $N$ ,由于系统中排队等待的顾客数最多为  $N-1$ ,在某一时刻一顾客到达时,如果系统中已有  $N$  个顾客,那么这个顾客就被拒绝进入系统。

#### 1.1 网络特征描述

网络特征描述即完成资源描述,其内容包括如下。

##### 1) 网络拓扑描述。

将计算机网络拓扑采用 0-1 矩阵  $X$  进行描述,当节点  $i$  与节点  $j$  之间有直连链路时,  $x_{ij}$  为 1,反之则为 0。

##### 2) 节点缓冲区描述。

收稿日期:2009-03-26;修回日期:2009-04-21。 基金项目:科技部创新基金资助项目(BT2008-22)。

作者简介:张英(1951-),女,河北献县人,研究员,主要研究方向:计算机网络及性能评价; 赵莉茹(1983-),女(蒙古族),内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络及性能评价; 谷新亮(1982-),男,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络及性能评价。

$V$  代表网络中的节点集,  $|V| = n$  表示网络中共有  $n$  个节点, 每个节点的缓冲区长度为  $H_i, i = (1, 2, \dots, n)$ 。

3) 链路带宽描述。

$L$  代表网络中的链路集合, 表示为  $L = \{l_{ij} \times x_{ij} \mid i, j = 1, 2, \dots, n\}$ , 采用  $U$  代表链路带宽集合, 则节点  $i$  与节点  $j$  的链路带宽为  $u_{ij}$ , 并且  $u_{ij} = u_{ji}$ 。

4) 缓冲区调度策略。

缓冲区的调度策略对分组的时延、丢包率、抖动等 QoS 指标有决定性影响。本文假定在同一个网络系统中, 所有节点的调度策略均相同。采用先来先服务与尾丢弃的组合策略。

1.2 业务特性描述

为了方便地分析网络资源并能进行有效的数学计算, 本文对各种业务请求和业务特性进行了量化, 建立了统一的业务特性描述模型。一般来说, 一种业务可以表示为:

$$y = [D_i, \lambda_i, N_i, L_i, P_i, \bar{Q}_i]$$

其中:  $D_i$  表示业务流的速率分布;  $\lambda_i$  表示均值速率;  $N_i$  表示业务的并发用户数;  $L_i$  表示业务的平均分组长度;  $P_i$  表示业务的网络传送协议;  $\bar{Q}_i$  表示业务 QoS 参数。

2 网络资源分析模型

2.1 模型描述

在一个 IP 网络中, 任意时间网络的分组到达率、分组长度等参数通常都是服从概率分布的随机变量。分组从源端发送到目的端过程中, 一般都会在中间节点的缓存中参加排队, 等待节点提供的路由转发服务。因此, 本文充分考虑多类业务的特征及网络实际情况, 为了能更好地分析网络资源, 采用 Jackson 排队网络建立数学模型, 从而分析网络资源(带宽、吞吐率、缓冲区)与网络的性能(时延、丢包率、抖动)的关系。

Jackson 网络是由  $n$  个 ( $n \geq 1$ ) 服务点组成, 其中第  $i$  个服务点包括  $m$  个 ( $m \geq 1$ ) 独立同分布的、服务时间为指数分布的服务台, 第  $i$  个服务点的外部输入参数为  $\lambda_i$  的 Poisson 流, 各服务点的外部输入与各服务时间相互独立。

因此, 我们把网络描述为一个有多类业务流输入的随机服务系统。将每个路由节点都抽象成一个单缓冲区、单端口转发的 M/M/1/ $\infty$ /N 排队系统, 并由此构成一个端到端的串行排队服务模型, 如图 1 所示。

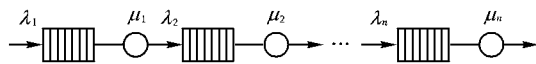


图 1 排队服务模型

本文关注的是端到端的时延、抖动和丢包率, 因此把端到端的节点抽象成如图 1 的串联服务系统, 每个路由节点都看成是一个 M/M/1/ $\infty$ /N 排队系统, 把网络中的业务分组看作顾客, 系统最大容量为  $N$ 。排队系统有三个基本组成部分: 输入过程、排队规则、服务机构。下面分别说明本文所建立的排队服务模型各部分的特征。

1) 输入过程。

顾客源是无限的, 顾客的到达服从泊松分布, 而且各类顾客的到达是相互独立的,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  是各个 M/M/1/ $\infty$ /N 排队系统中的顾客到达率, 其中  $\lambda_1$  表示源端顾客的到达率即源端用户的业务流。

2) 排队规则。

本模型服务系统采用混合制, 它是介于等待制和损失制之间的形式。队列长度有限为  $N$ , 当队列的长度小于  $N$  时, 新到顾客就排队等待; 当队列长度为  $N$  时, 新到顾客离去; 系统

的服务规则为先来先服务, 即按顾客到达先后给予服务。

3) 服务机构。

排队服务模型中每个排队系统都采用单服务台、单队列结构, 节点的转发过程看成是服务过程, 排队系统的服务时间服从指数分布,  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  是各个系统中服务台的服务率。

2.2 模型求解分析

根据排队网络模型可得到如图 2 所示的状态转移。

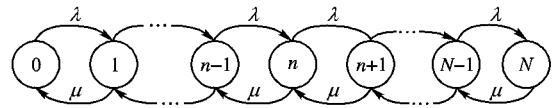


图 2 排队系统状态转移

根据状态转移图可建立下列稳态平衡方程。

设  $P_n(t)$  为系统的状态概率, 即在  $t$  时刻, 系统中有  $n$  个顾客(分组)的概率, 此时把系统的状态记为状态  $n$ 。

即:  $P_n(t) = P\{\text{任一时刻 } t, \text{ 系统的状态} = n\}$ 。状态  $n \geq 1$ , 即为繁忙; 状态  $n = 0$ , 即为空闲。则稳态平衡方程为:

$$\lambda_i P_{i0} = \mu_i P_{i1} \tag{1}$$

$$\lambda_i P_{i1} = \mu_i P_{i2} \tag{2}$$

$$\lambda_i P_{i2} = \mu_i P_{i3} \tag{3}$$

⋮

$$\lambda_i P_{iN-1} = \mu_i P_{iN} \tag{4}$$

令  $\rho = \lambda/\mu$ , 则  $\rho$  称为系统的利用率或通信强度。

依次代入可得:

$$P_{in} = (\lambda_i/\mu_i)^n \times P_0 = \rho^n P_0 \tag{5}$$

由概率守恒方程得:

$$P_{i,0} + P_{i,1} + \dots + P_{i,N} = 1 \tag{6}$$

由于  $\sum_{n=0}^N \rho^n = \frac{1-\rho^{N+1}}{1-\rho}$ , 应用平衡方程得到:

$$P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}}; \rho \neq 1 \tag{7}$$

$$P_{in} = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} \rho^n; n \leq N \tag{8}$$

式(7)、(8)就是此排队系统的状态概率,  $P_0, P_{in}$  分别表示节点  $i$  的顾客数为 0 及为  $n$  时的概率, 因为系统的状态概率是分析求解排队系统的基础, 所以必须先对其进行求解。

2.3 方法步骤

本文提出的基于排队网络的分析方法主要分 4 个步骤:

1) 根据系统采用的路由策略分析计算出网络中各链路上的转发概率因子  $F_{ij}$ ;

2) 根据用户的输入流量以及各条链路的转发概率因子建立所有网络节点的流量状态方程, 由流量状态方程计算出各节点的通信量  $M_i$ ;

3) 根据 M/M/1/ $\infty$ /N 型排队系统对网络运用 Little 定理, 计算出端到端时延、抖动;

4) 根据系统采用的缓冲区的管理策略结合排队网络公式计算出丢包率。

2.4 转发概率因子

由于基于 IP 网络的实时业务流是面向无连接的, 其传输过程不建立固定的数据通道, 发送端可能通过相邻的任意中间节点转发到达目的端。因此在分析实时业务流的网络资源占用情况时, 需要用节点对每条输出链路发送数据包的概率来表示网络节点的输出, 用转发概率因子  $F_{ij}$  表示。如对节点  $i, F_{ij}$  则表示数据包从节点  $i$  发送至节点  $j$  的概率。

设本排队服务模型的路由策略采用最短路径路由分配策

略,则我们可认为节点转发到相邻节点的转发概率因子与该节点通过其邻居节点到目的节点的最小路径成反比。求得各个节点的转发概率因子后,也即完成了从源端到目的端的路径上,各个节点的转发概率的分配。下面举例分析采用最短路径路由分配策略确定转发概率因子的过程,如图 3。

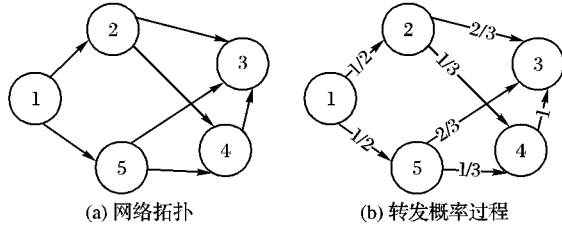


图 3 最短路径转发概率过程

对节点 1 的两条输出路径,经过路径 1→2 到达终端节点 3 的最短路径的路径数为 2,经过路径 1→5 到达终端的最短路径的路径数也为 2,所以分配到路径 1→2 和路径 1→5 的分组比例为 1:1,即转发概率因子  $F_{12} = F_{15} = 1/2$ 。对节点 2 的两条输出路径,经过路径 2→3 到达终端节点 3 的路径数为 1,经过路径 2→4 到达终端的最短路径数为 2,所以分配到路径 2→3 和路径 2→4 的分组比例为 2:1,即转发概率因子  $F_{23} = 2/3, F_{24} = 1/3$ 。由此得到的各节点到相邻节点的转发概率因子如图 3(b) 所示。

## 2.5 流量状态方程

本文用排队网络分析网络资源时,利用了泊松过程的合成定理<sup>[10]37-46</sup>。

**定理** 泊松过程的合成。设  $n_1(t)$  与  $n_2(t)$  分别为具有参数为  $\lambda_1, \lambda_2$  且相互独立的两个泊松过程,则  $n_1(t) + n_2(t)$  是参数为  $\lambda_1 + \lambda_2$  的泊松过程。

**推论**  $m$  个泊松过程的合成仍为泊松过程。

因为在计算机网络中的每一个中间节点所接收的分组都来自其他若干节点,所以如果把其他各个节点送来的分组的过程看成是相互独立的泊松过程,则根据泊松合成定理,到达这个中间节点总的分组也可以看成是一个泊松过程。

用  $y_{s,d}$  表示端对  $(s, d)$  之间一种业务的业务流,  $y_{s,d}$  的属性特征前面已描述,其中  $s$  表示源端,  $d$  表示目的端。假设当前网络有  $N$  个节点,承载的业务流有  $n$  个,则可计算注入网络系统的总通信量为源端节点业务流的到达率  $\gamma$  (单位 pps),如下:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n Y_i \times \lambda_i \quad (9)$$

其中:  $Y_i$  为第  $i$  个业务的并发用户数,  $\lambda_i$  为第  $i$  个业务的发生速率。

根据泊松过程的合成定理及排队论,按照各个节点的转发概率进行流量分配,则网络节点  $i$  ( $i > 1$ ) 的流量状态方程为:

$$M_i = \sum_{j=1}^N x_{ji} \times M_j \times F_{ji} \quad (10)$$

$$x_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } j \text{ 与节点 } i \text{ 之间存在直接路由时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式(10)表示网络中节点  $i$  的通信量,  $x_{ji}$  表示节点  $j, i$  间有无直接路由,  $F_{ji}$  表示业务流选择从节点  $j$  到达节点  $i$  的概率,它由前面介绍的转发概率因子确定。

## 3 模型理论结果

### 3.1 参数定义

本文研究的是在多业务情况下,网络性能的主要参数时

延、抖动、丢包率与网络资源带宽、吞吐率、缓冲区的关系。因此在对模型求解前,对相关参数作以下定义。

1) 吞吐率  $v_i$ 。表示第  $i$  个排队系统(节点)的吞吐率,单位为 Kpps。

2) 链路带宽  $u_i$ 。表示第  $i$  个排队系统(节点)的链路带宽,单位为 bps。

3) 缓冲区长度  $H_i$ 。表示第  $i$  个排队系统(节点)的缓冲区长度,单位为 B。

$$H_i = N \times L \quad (12)$$

其中:  $N$  表示缓冲区的最大容量,即最多容纳  $N$  个数据包,  $L$  表示业务平均分组长度。

4) 业务平均分组长度  $L$ 。单位 Bpp。

$$L = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i \times \lambda_i}{\sum_{i=1}^n Y_i \times \lambda_i} \times L_i \quad (13)$$

其中:  $Y_i$  表示第  $i$  个业务的并发用户数,  $\lambda_i$  为第  $i$  个业务的发生速率,  $L_i$  为第  $i$  个业务的平均分组长度,  $n$  为业务数。

5) 总的业务通信量  $\gamma$ 。表示源节点注入网络系统的总的通信量,如式(9),单位为 pps。

6) 节点  $i$  的通信量  $M_i$ 。表示节点  $i$  的通信量(节点到达率),如式(10),单位为 pps。

7) 节点的通信强度  $\rho_i$ 。设本系统的最大容量为  $N$ ,当  $1 < N < \infty$ ,  $\rho_i$  可取不等于 1 的任何正值。

其中

当吞吐率  $v_i$  与业务平均分组长度  $L$  的乘积小于等于链路带宽  $u_i$  时:

$$\rho_i = M_i / v_i \quad (14)$$

当吞吐率  $v_i$  与业务平均分组长度  $L$  的乘积大于链路带宽  $u_i$  时:

$$\rho_i = M_i \times L / \mu_i \quad (15)$$

### 3.2 理论结果

根据本文所建立的排队服务模型及前面所求的系统状态概率,可求出端到端时延、抖动、丢包率与带宽、吞吐率、缓冲区的关系,如下所示。

1) 经过节点  $i$  的平均逗留时间  $D_i$ 。

$$D_i = \begin{cases} \frac{d_i \times L}{u_i(1 - P_0)} = \frac{M_i L u_i^{N+1} - [(N+1)u_i - N M_i L](M_i L)^{N+1}}{u_i M_i (u_i - M_i) [u_i^N - (M_i L)^N]}, & v_i \times L > u_i \\ \frac{d_i}{v_i(1 - P_0)}, & v_i \times L \leq u_i \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $P_0$  为节点  $i$  的系统状态概率,  $d_i$  为滞留在节点  $i$  的平均分组数,且

$$d_i = \frac{\rho_i}{1 - \rho_i} - \frac{(N+1)\rho_i^{N+1}}{1 - \rho_i^{N+1}} \quad (17)$$

2) 假设各条路径上各个节点的配置相同,则对于某一条路径  $l$ ,经过  $m$  个节点,则该路径的端到端时延  $D_l$  为:

$$D_l = \sum_{i=1}^m D_i \quad (18)$$

3) 时延抖动  $J$  为:

$$J = \sum_{k=1}^N A \mu^{k-2} (k^2 + k) - \left( \sum_{k=1}^N A \mu^{k-2} k \right)^2 \quad (19)$$

其中:

$$A = \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i^{k+1} \rho_i^k} \cdot \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i^N}$$

4) 在“丢尾”策略下,当排队长度等于缓冲区容量时,则认为缓冲区满,此时有  $N$  个数据包排队,当第  $N + 1$  个包到达时,就出现丢包现象,该节点的分组丢失率为:

$$P_i(n = N) = \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i^{N+1}} \rho_i^N \quad (20)$$

则该节点分组不丢失率为:

$$Q_i(n = N) = 1 - P_i(n = N) = 1 - \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i^{N+1}} \rho_i^N \quad (21)$$

因此,当分组流经过  $m$  跳后,分组不丢失率  $Q$  及分组丢失率  $P$  分别为:

$$Q = \prod_{i \in l} Q_i(n = N) \quad (22)$$

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i \in l} Q_i(n = N) \quad (23)$$

其中: $l$  表示分组流经过路径的节点集合,且  $N = H_i/L$  取整数。

### 4 实验结果与分析

我们在相同的网络拓扑(图 4)及相同的实验参数下,采用 OPNET 仿真方法与本文采用排队网络建立的分析模型方法分别进行资源分析,对比并验证本文所提出的多业务网络的资源分析方法的有效性。

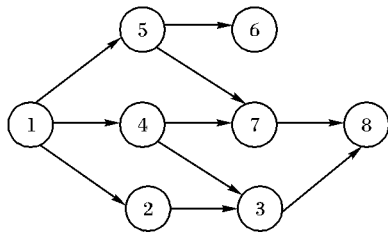


图 4 实验网络拓扑

实验中假设节点 1 为源端,节点 8 为目的端,源端有 VOIP 和视频会议两类业务。VOIP 并发用户数为 1000,平均包长为 240 B,发生速率为 33 pps;视频会议并发用户数为 500,平均包长为 320 B,发生速率为 150 pps。带宽为 1000 Mbps,吞吐率为 100 Kpps,缓冲区为 64 MB,缓冲区采用的调度策略为先到先服务,管理策略为尾丢弃。

实验一 随带宽增加时延的变化趋势,结果如图 5 所示。

由图 5 可看出本文提出的排队网络分析方法与仿真方法得到的结果,趋势基本一致,即随着带宽的增加,时延逐渐降低。当加载的业务量较大而带宽较小时,无法提供足够的服务,从而使数据包滞留在缓冲区,导致时延增加。因此当带宽增加,服务能力加强,则时延减少。由图 5 可看出当带宽增加至大约 700 Mbps,再增加带宽对时延的影响已不大,这是因为在网络中并不只有带宽影响时延,还有其他因素也影响时延,所以会出现当带宽增加到一定程度后,对时延的影响不明显的情况,而此时的带宽可以认为是最佳值。在图 5 中,仿真结果的时延比分析模型结果的时延大,这是因为 OPNET 仿真的时延还包括传播时延,而排队网络分析方法中采用抽象的分析方法,为了问题简化只考虑了排队时延,所以会比仿真的时延值小。传播时延受传输介质影响,而目前主干网的传输介质基本都采用光纤,传输速度快,因此在建模时忽略传播时延

对网络的整体评估不会产生太大影响。

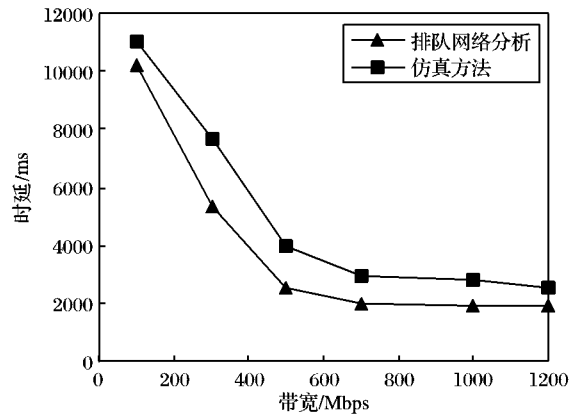


图 5 带宽与时延关系

实验二 随吞吐率增加丢包率的变化趋势,结果如图 6 所示。

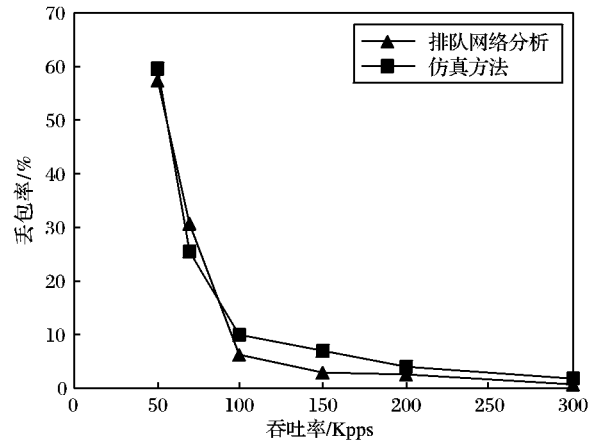


图 6 吞吐率与丢包率关系

由图 6 可看出本文提出的排队网络分析方法与仿真方法得到的结果基本一致,即随着吞吐率的增加,丢包率逐渐降低。由于业务量较大而吞吐率较小时,服务能力不够,导致缓冲区中数据包排队数目多,从而使丢包率变大;而当吞吐率增加后,缓冲区中排队数目减少,则丢包率明显变小;当吞吐率增加到一定程度时对丢包率的影响不大,这是因为网络中的其他因素也影响着丢包率,所以当吞吐率增加到一定值后,再增加对降低丢包率也无太大意义,这也说明此时的吞吐率可以认为是最佳值。

实验三 随缓冲区增加抖动的变化趋势,结果如图 7 所示。

因为 OPNET 提供的参数中不包括缓冲区与抖动配置功能,所以无法进行缓冲区与抖动的仿真。图 7 为采用本文提出的分析方法得出的缓冲区与抖动的结果关系图,可看出随着缓冲区的增加,抖动减小。当加载业务后,由于节点缓冲区不足,会导致抖动值较大;增加缓冲区后,可以有效地减少抖动;但当缓冲区增加到 60 MB 左右,随着缓冲区的增加,抖动的变化已不明显,可看出此时再增加缓冲区对改善抖动已无太大作用,这是因为网络中除了缓冲区还有其他的因素也影响抖动的变化,这也说明此时的缓冲区大小可认为是最佳值。

由以上三个实验结果可看出,本文提出的基于排队网络的多业务网络资源分析方法比传统的仿真方法更全面,更细致,可以分析出更多的网络性能与网络资源的关系,从而更好地解决资源配置优化问题。

## 参考文献:

- [1] DEERING S. Host extensions for IP multicasting [EB/OL]. [2008-11-04]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc.1112.txt>.
- [2] POPESCU A, CONSTANTINESCU D, ERMAN D, *et al.* A survey of reliable multicast communication [C]// Proceedings of the 3rd EURO-NGI Conference on Next Generation Internet Network. Trondheim, Norway: IEEE Computer Society, 2007: 111-118.
- [3] 章森, 徐明伟, 吴建平. 应用层组播研究综述[J]. 电子学报, 2004, 32(12A): 22-25.
- [4] ZHANG BEI-CHUAN, JAMIN S, ZHANG LI-XIA. Host multicast: a framework for delivering multicast to end users [C]// Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York, USA: IEEE Computer Society, 2002: 1366-1375.
- [5] ERIKSSON H. MBONE: The multicast backbone [J]. Communications of the ACM, 1994, 37(8): 54-60.
- [6] FRANCIS P. Yoid: Extending the multicast Internet architecture [EB/OL]. [2008-12-02]. <http://www.ciri.org/yoid/docs/yocHtml/htmlRoot.html>.
- [7] TRAN D A, HUA K A, DO T T. Zigzag: An efficient peer-to-peer scheme for media streaming [C]// Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, CA, USA: IEEE Computer Society, 2003: 1283-1292.
- [8] PENDAKARIS D, SHI S. ALMI: An application level multicast infrastructure [C]// Proceedings of the 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems. San Francisco, CA, USA: USENIX Association, 2001: 49-60.
- [9] HANDLEY M. Session directories and scalable Internet multicast address allocation [J]. ACM Computer Communication Review, 1998, 28(4): 105-116.
- [10] WHETTEN B, KAPLAN S, MONTGOMERY T. A high performance totally ordered multicast protocol [C]// Proceedings of International Workshop on Theory and Practice in Distributed Systems, LNCS 938. London: Springer-Verlag, 1994: 33-57.
- [11] LIN J C, PAUL S. RMTP: A reliable multicast transport protocol [C]// Proceedings of the 15th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. San Francisco, CA, USA: IEEE Computer Society, 1996: 1414-1424.
- [12] ZHANG ZU-PING, CHEN HAO, CHEN JIAN-ER. A new control topology of information reliable spread [C]// Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 789-793.
- [13] FLOYD S, JACOBSON V, LIU C, *et al.* A reliable multicast framework for light-weight sessions and application level framing [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(6): 784-803.
- [14] BLACKMORE, F A. Multicast file transfer in a military satellite broadcast system [C]// Proceedings of the 21st Century Military Communications Conference Proceedings. Los Angeles, California: IEEE Computer Society, 2000: 1094-1098.
- [15] RIZZO L, VICISANO L. Effective erasure codes for reliable computer communication protocols [J]. ACM Computer Communications Review, 1997, 27(2): 24-36.
- [16] LI V O K, ZHANG ZAI-CHEN. Internet multicast routing and transport control protocols [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(3): 360-391.
- [17] FLOYD S, FALL K. Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(4): 458-472.
- [18] PADHYE J, FIROIU V, TOWSLEY D F, *et al.* Modeling TCP Reno performance: A simple model and its empirical validation [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(2): 133-145.

(上接第2427页)

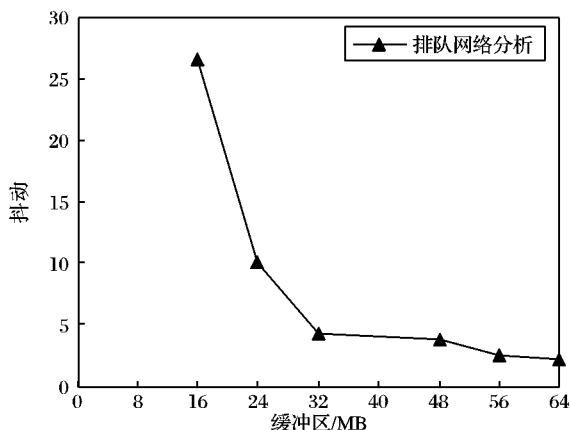


图7 缓冲区与抖动关系

## 5 结语

本文针对资源配置优化问题开展研究,基于排队网络理论,提出一种多业务网络的资源分析方法,对网络特征及业务特性进行了定义及描述,建立了资源分析模型,包括多业务网络的排队服务模型、流量分配方法、模型的求解与计算,给出了多种资源与网络服务质量之间的配置关系,通过仿真实验,验证了该方法的正确性和有效性。由于该方法相对于测试等其他方法具有简单、省时、费用低等特点,因此更有利于应用于新建网络设计和已建网络的资源优化中。

## 参考文献:

- [1] 蔡康, 李洪, 朱英军. IP 宽带业务与运营[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [2] VEGESNA S. IP 服务质量[M]. 信达工作室, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [3] ANDREW L L H, HANLY S V, MUKHTAR R G. Active queue management for fair resource allocation in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(2): 220-247.
- [4] DOVROLIS C, STILLADIS D, RAMANATHAN P. Proportional differentiated services delay differentiation and packet scheduling [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(1): 12-26.
- [5] BOUDEC J L, THIRAN P. Network calculus a theory of deterministic queuing system for Internet [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- [6] IMENZ D H, ONDA A. Optimal partition of QoS requirement on unicast paths and multicast trees [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(1): 102-114.
- [7] BOLCH G, GREINER S. Queuing networks and Markov chains modeling and performance evaluation with computer science applications [M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [8] GROSS D, SHORTLE J F, THOMPSON J M, *et al.* Fundamentals of queuing theory [M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 1998.
- [9] 盛友招. 排队论及其在计算机通信中的应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1998.
- [10] 林元烈. 应用随机过程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.