

doi: 10.7690/bgzdh.2023.06.012

基于排队网络的复杂通信网时延估算模型

冯小娟, 梁向阳

(西安工业大学兵器科学与技术学院, 西安 710021)

摘要: 为快速估算指定网络的时延, 基于排队理论分别对有线和无线网络子网进行建模, 构建出复杂网络的排队网络模型。实现复杂网络中端到端时延的快速估算, 采用 opnet 仿真工具分别对典型的复杂有线、无线网络以及有线加无线混合网络进行建模仿真, 对比仿真结果与排队网络估算结果, 其相对误差分别为 16%、9.9%和 13.78%。结果表明: 该模型可用于网络性能的分析、复杂通信网络环境的模拟及网络优化等。

关键词: 时延建模; 排队网络; 网络仿真; 复杂通信网

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Delay Estimation Model of Complex Communication Network Based on Queuing Theory

Feng Xiaojuan, Liang Xiangyang

(School of Ordnance Science and Technology, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to quickly estimate the delay of the specified network, the subnets of wired and wireless networks are modeled based on queuing theory, and the queuing network model of complex networks is constructed. In order to estimate the end-to-end delay quickly in complex networks, the opnet simulation tool is used to model and simulate the typical complex wired, wireless and wired plus wireless networks, and the relative errors are 16%, 9.9% and 13.78% respectively by comparing the simulation results with the queuing network estimation results. The results show that the model can be used to analyze the network performance, simulate the complex communication network environment and optimize the network.

Keywords: time delay modeling; queuing network; network simulation; complex communication network

0 引言

复杂通信网的结构是由多种通信方式的子网组成, 目前网络主要以有线通信为主, 微波、短波、超短波、卫星、散射等无线通信手段为辅。有线的通信方式为电缆、光纤所组成的网络, 有较高的数据速率, 但由于传输距离的因素, 导致其更适用于短距离传输^[1]。采用无线通信方式进行数据传输, 传播距离远, 但传输速率较低。通过对复杂通信网体系架构中端到端时延的分析, 从某终端发出的数据包经过的子网可能是有线光纤网、微波通信网、卫星通信子网、散射通信子网等^[1]。

随着网络复杂度的逐渐增大, 基于网络的应用系统部署前的测试成为决定软件开发成功的关键性因素^[2]。目前针对基于复杂通信网的应用系统测试, 以近距网络模拟的测试方式居多, 即近距网络模拟中针对时延的模拟是通过测量真实网络时延或者对真实网络估算得到时延, 然后在局域网中通过对数据包进行延迟发送, 从而实现对复杂通信网的网络

时延模拟^[3]。

针对上述问题, 笔者对复杂通信网的结构进行分析, 提出了基于排队网络的复杂通信网的时延估算模型。通过分析复杂通信网结构, 按照通信方式, 提出有线网络模型和无线网络模型, 利用排队理论对网络中端到端的时延进行研究; 通过仿真软件进行仿真, 并对仿真值和理论值进行了对比。为模拟网络时延提供了有效的理论支撑, 增加了模拟网络时延的有效性。

1 相关研究

传统的网络时延分析大部分针对特定的网络或者特定的业务流进行分析, 文献[4]针对航电有线网络, 提出了一种拓展交换式拓扑结构, 结合排队论进行建模, 对端到端延迟进行分析, 可以看出排队论的方法对分析端到端的延迟是可行的; 文献[5]利用 opnet 仿真软件对 FC 交换式网络进行了建模与仿真, 并利用排队论对其端到端延迟进行了研究, 只

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-05

基金项目: 西安市智能兵器重点实验室基金(2019220514SYS020CG042)

作者简介: 冯小娟(1996—), 女, 陕西人, 硕士, 从事计算机网络、计算机仿真研究。E-mail: 1115312460@qq.com。

针对交换式网络；文献[6]用 M/D/1 模型研究无线 Mesh 网络网关处的数据包排队，该模型假设网关对数据包的处理时间为常量，对延迟进行估计，仅限于网关处的排队场景，适用范围窄；文献[7]通过 G/G/1 模型对 MAC 层接口队列进行建模分析，推导出无线网络客户端节点之间的数据包传输的平均延迟，忽略了数据包排队产生的时延；文献[8]针对不同数据对网络性能的影响，尤其是网络数据冲突产生的退避过程提出模型，求得平均延迟，侧重数据的影响，忽略数据排队和竞争产生的影响。

通过对上述文献的研究，笔者结合文献[4]的排队理论模型在网络中的应用以及文献[7]接口层信道协议产生的时延影响，提出了基于排队网络的复杂通信网的时延估算模型。通过分析有线网络和无线网络结构，研究排队论中的相关模型，将网络中的网络连接设备、存储设备等看作是排队系统中的服务台，如交换机、接入点、路由器、服务器等，其对应终端所产生的数据为顾客，使用排队论中的 M/M/1、IS 等模型来描述设备上的排队情况。同时，根据不同通信方式产生的时延因素不同，采取不同的估算方式，根据网络端到端的路径，建立串联排队网络模型，进而求解得到网络中端到端的时延。结果表明：笔者提出的网络模型能够为模拟网络时延提供有效支撑，且适用范围更广。

2 网络建模与分析

2.1 有线网络时延模型

有线网络在通信网中以高带宽、低延时、高可靠性的特点在通信网中得以应用。常见的网络连接设备有中继器、集线器、交换机和路由器等。笔者根据终端可以直连网络连接设备的特点，将端到端的数据包传输路径抽象为一条串联的排队网络结构，对抽象后的网络进行估算端到端时延。对于有线网络结构如图 1 所示。

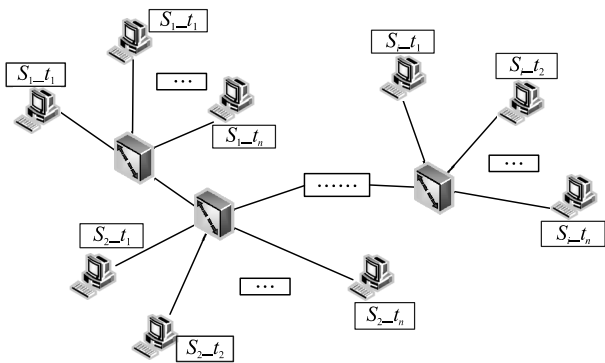


图 1 有线网络结构

上图中，将交换机所连的终端定义为子网 $S_i = \{S_{i-t_1}, S_{i-t_2}, \dots, S_{i-t_n}\}$ ， i 为交换机的编号， n 为交换机所连的终端数，源终端数据包的传输会经过多个交换机后到达目的终端。

将 S_i 子网定义为一个 M/M/1 节点，子网之间的有线链路定义为 IS 节点，则任意端到端数据传输情况可以抽象为如图 2 所示的排队网络。

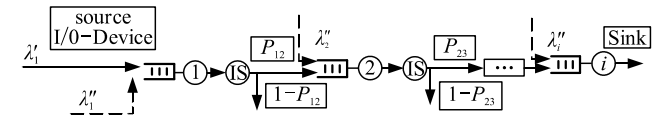


图 2 排队网络

源终端产生的数据类型为 class1，其到达率为 λ'_1 ，服从泊松分布，其他子网或者终端产生的数据类型为 class2，其到达率设为 λ''_1 ，同样服从泊松分布^[9]。 i 为排队网络中的节点数， $P_{i,i+1}$ 为节点 i 上的数据进入串联网络中下一节点的概率， $1-P_{i,i+1}$ 则为节点 i 上的数据在此服务完成离开的概率，则节点的数据到达率 λ_i 为：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda'_1 + \lambda''_1 \\ \lambda_2 &= \lambda_1 P_{12} + \lambda''_2 \\ \lambda_3 &= \lambda_2 P_{23} + \lambda''_3 \\ &\vdots \\ \lambda_i &= \lambda_{i-1} P_{(i-1)i} + \lambda''_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由于泊松分布之和仍为泊松分布，所以节点的数据服从到达率为 λ_i 的泊松分布，交换机的数据包转发速率为 μ_i (bit/s) 的负指数分布。则可以得到数据在 i 节点排队系统的平均滞留时延如下：

$$T_{re} = 1/(\mu_i - \lambda_i) \quad (2)$$

数据端到端的时延主要考虑的是数据在网络中的排队时间 T_{re} 和链路上传输时延 T_{tran} 。将链路看作 IS 节点，设定传输速率和数据包大小，即可获得传输时延，其中链路带宽为 W , bit/s；数据包大小为 L , bit。传输时延估算公式为：

$$T_{tran} = L/W \quad (3)$$

数据包在排队网络中一个节点的总时延为：

$$T_{delay} = T_{re} + T_{tran} \quad (4)$$

网络中端到端的时延 T_{end} 为：

$$T_{end} = \sum_{i=1}^i \frac{1}{\mu_i - \lambda_i} + \frac{L}{W} \quad (i=1, \dots, n) \quad (5)$$

2.2 无线网络时延模型

无线通信网以远距离传输的特点在复杂通信网中得以应用，常见的无线通信介质有微波、短波、

超短波、卫星和散射等。以军事通信网为例，电台通信网可以使用微波、短波、超短波的链路^[10]；卫星通信网使用卫星链路进行传输等。无线网络系统中端到端的时延指的是数据包从开始传输到传输成功所需时间。无线传输的时延有排队时延、竞争时延、链路传输时延，还受干扰和距离的影响，本文中不考虑链路干扰的影响。由于竞争影响的是数据包的排队，因此笔者将竞争产生的延迟以概率的方式影响数据包的到达率，从而实现竞争延迟的影响。无线网络结构如图 3 所示。

在此结构中，假定路由器所连终端为子网，则 $R_i = \{R_{i_t1}, R_{i_t2}, \dots, R_{i_tn}\}$, i 为路由器的个数, n

为路由器所连的终端个数，端到端的数据会通过路由器、基站等网络设备传输，将子网和其他设备定义为 M/M/1 排队系统，将无线链路定义为 IS 节点，则对端到端的数据传输可以抽象为如图 4 所示。

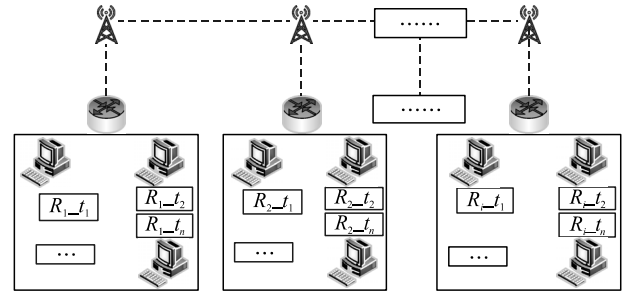


图 3 无线网络结构

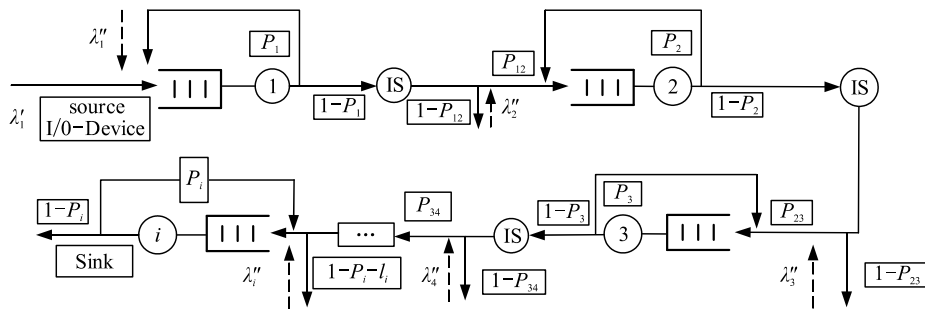


图 4 排队网络

源终端的数据类型为 class1，其到达率为 λ_1' ，服从泊松分布，其他终端产生的数据类型为 class2，其到达率设为 λ_2' ，服从泊松分布。 i 为排队网络中的节点数， P_i 为节点 i 上的数据一次争用信道失败的概率， $1-P_i$ 则为节点 i 上的数据传输成功的概率； $P_{i,i+1}$ 为数据进入下一节点的概率， $1-P_{i,i+1}$ 为数据服务结束离开的概率。无线网络存在获取信道的过程，信道的获取也对端到端时延产生着影响，目前常见的 2 种获取信道的方法为 CSMA 和 TDMA，前者是监测信道是否空闲，等待空闲进行传输；后者是等待对应的时隙，时隙对应才可以发送。笔者将信道获取失败，需要等待的概率设为 P_i 。以 CSMA 来估算，则其竞争失败，需要等待的概率可参考文献[11]中 CSMA 的终端发送失败的概率：

$$P_i = (N * p(1-p)^{N-1}) * \frac{(1-N * p(1-p)^{N-1})}{N * p(1-p)^{N-1}} \quad (6)$$

式中： N 为竞争的终端个数； p 为终端发送数据的概率。而在无线网络 MAC 层的竞争机制，需在检测到信道空闲后等待一个 DIFS 或者 SIFS。802.x 系列中，不同标准规定的 SIFS 和 DIFS 的值不同，如表 1 所示。

表 1 协议参数标准值

协议	SIFS	DIFS
IEEE 802.11b	10	20、50
IEEE 802.11a	16	9、34
IEEE 802.11g	10	9、20、28、50

TDMA 使用的时分多址，在此 P_i 为需要等待时隙的概率，节点的时隙与其对应的终端个数有关，若 N 表示竞争的终端个数，则其等待的概率为：

$$P_i = (N-1)/N. \quad (7)$$

根据图 4 可得，节点的数据到达率可以表示为：

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= (\lambda_1' + \lambda_1'')(1 + P_1) \\ \lambda_2 &= (\lambda_1(1 - P_1)P_{12} + \lambda_2'')(1 + P_2) \\ \lambda_3 &= (\lambda_2(1 - P_2)P_{23} + \lambda_3'')(1 + P_3) \\ \lambda_i &= (\lambda_{i-1}(1 - P_{i-1})P_{(i-1)i} + \lambda_i'')(1 + P_i) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

节点的数据包转发速率服从 μ_i (bit/s) 的负指数分布。在确定端到端的数据到达率以及中间节点的到达率和服务率后，对源终端至目的终端的时延做以下 3 种时延的和：

1) 排队时延。

使用 M/M/1 系统已有的结论，即顾客在系统逗留的时间为：

$$T_{queue} = 1/(\mu_i - \lambda_i). \quad (9)$$

2) 传输时延。

传输延迟是指数据包使用无线手段实现端到端的传输时间, 因此可以将链路看作 IS 节点, 不考虑链路上的损耗和干扰。因此, 在理想状态下, 设定传输速率和数据包大小, 即可获得传输时延, 其中链路带宽为 W , bit/s; 数据包大小为 L , bit:

$$T_{\text{tran}}=L/W. \quad (10)$$

3) 等待信道时延。

在无线网络的 CSMA 协议中, 每个节点需要等 DIFS 后再发送数据, 可以得到如下公式:

$$T_{\text{wait}}=\text{DIFS} * i. \quad (11)$$

排队网络节点的传输时延为:

$$T_{\text{end}}=T_{\text{queue}}+T_{\text{tran}}+T_{\text{wait}}. \quad (12)$$

网络中端到端的时延 T_{end} 为:

$$T_{\text{end}} = \sum_{i=0}^i (1/(\mu'_i - \lambda'_i) + \lambda'_i/\mu'_i + T_{\text{wait}}) + \text{DIFS} * i. \quad (13)$$

3 仿真与结果分析

笔者在 opnet 仿真平台上搭建有线网络和无线网络模型, 通过对比端到端时延的仿真值和理论值, 进而验证笔者所建模型的有效性。

3.1 有线网络实验结果对比分析

文献[12]中的分布式战略战术军事通信网架构, 笔者搭建有线通信网模型, 网络拓扑如图 5 所示, 使用双绞线链路, 传输速率为 10 M/s(约为 83 886 080 bit/s); 终端均为 ethernet_wkstn_adv 模型, 其发送速率为 1 000 packet/s(packet 的大小为 1 500 bit); 交换机使用的 3C_SSII_1100_4s_ae52_e48_ge3_adv, 其处理速率为 1 200 000 packet/s。仿真时长 60 min, 统计终端 3 至终端 12 产生的时延。

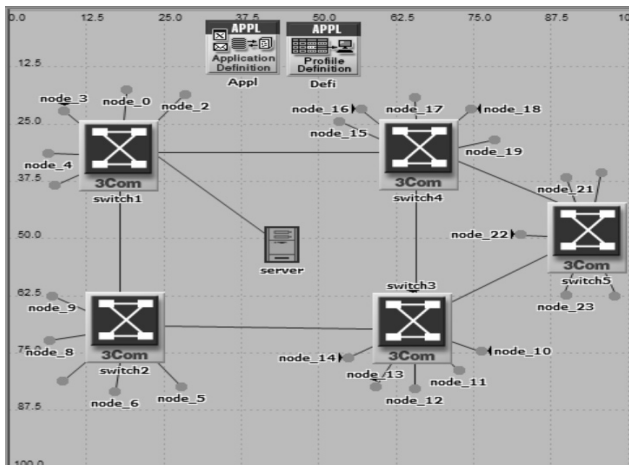


图 5 有线网络拓扑

根据上述理论, 对仿真网络进行抽象建模, 将

交换机看作服务台, 通过对链路上的数据进行查看后可知, 数据传输选择的路径是交换机 1-2-3, 离开网络的概率为 0.1; 因此, 对网络模型进行建模并化简, 如图 6 所示。

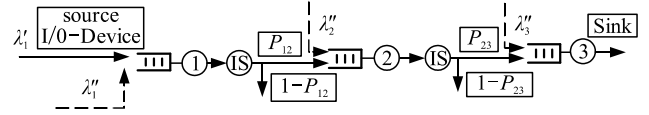


图 6 有线排队网络模型

根据仿真模型参数设置可知, 数据进入网络的速率, 即终端的到达率 $\lambda'_1=1\ 500\ 000$ bit/s, 交换机的发送速率, 即节点 1 的服务率 $\mu=1\ 800\ 000\ 000$ bit/s。估算端到端时延, 根据有线排队网络建模方式, 将各路径上的节点时延进行求和得到结果为 0.000 67 s。

端到端时延仿真结果如图 7 所示, 其平均值为 0.000 8 s。可以看出, 估算得到的理论值, 即端到端节点的平均时延, 与仿真网络的时延结果相近, 其相对误差为 16%。

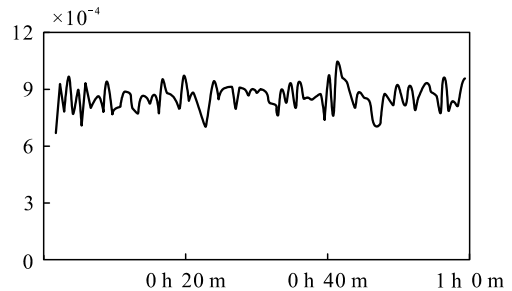


图 7 有线网络时延

3.2 复杂通信网络实验结果对比分析

文献[13]中的局域网与广域网连接方式, 以 opnet 仿真平台提供的 wlan_wimax_deployment 模型来进行仿真验证。网络拓扑如图 8 所示, 无线网络分为 BBS0 和 BBS1 2 个区域, 使用的节点以及节点所使用的链路类型如表 2 所示。

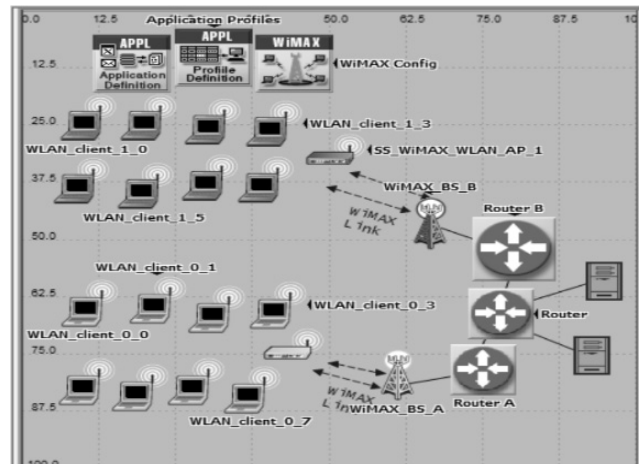


图 8 复杂通信网络仿真

表 2 网络节点类型

节点	类型	连接方式	速率/(bit/s)
终端	wlan_wkstn_adv	wiress_lan	1 000 000
接入点	wlan_router_ad	wiress_lan、Wimax	750 000 000、92 274 688
基站	wimax_bs_router-adv	ethernet4_slip8_gtwy_adv	750 000 000、92 274 688
路由器	Wimax、PPP	PPP	750 000 000、92 274 688
服务器	wimax_bs_router-adv	ethernet4_slip8_gtwy_adv	750 000 000、92 274 688

无线链路使用 wireless_lan 链路和 wimax 链路，终端节点通过 AP 与基站连接，模型使用 CSMA 信道竞争方式。无线传输使用 IS 节点模型，其到达率与对应的排队系统到达率一致。则将终端 1 经过 BBS1 区域发送数据至基站的传输过程进行建模，如图 9 所示。

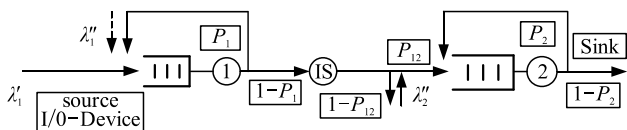


图 9 无线排队网络模型

仿真网络中终端至基站所产生的时延如图 10 所示。

时延呈周期波动特性，将时延数据导出进行平均值计算，得到其时延平均值为 0.224 559 32 s，而根据笔者提出的无线排队网络模型估算得到时延的

理论值为 0.178 767 s。理论值与仿真值的相对误差为 9.9%。

图 8 中，BBS1 区域的终端发送数据到服务器，经过 2 次无线传输、3 次有线传输，端到端数据传输的排队网络模型如图 11 所示。

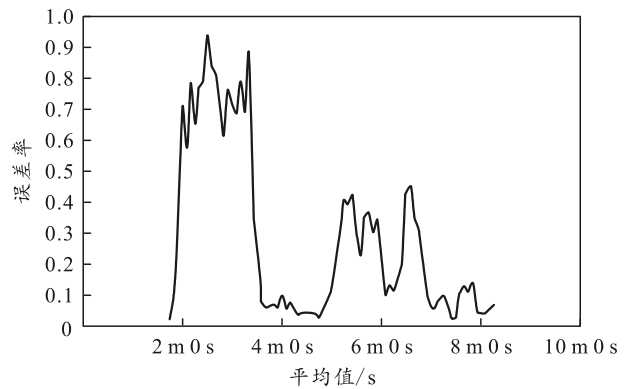


图 10 无线网络时延

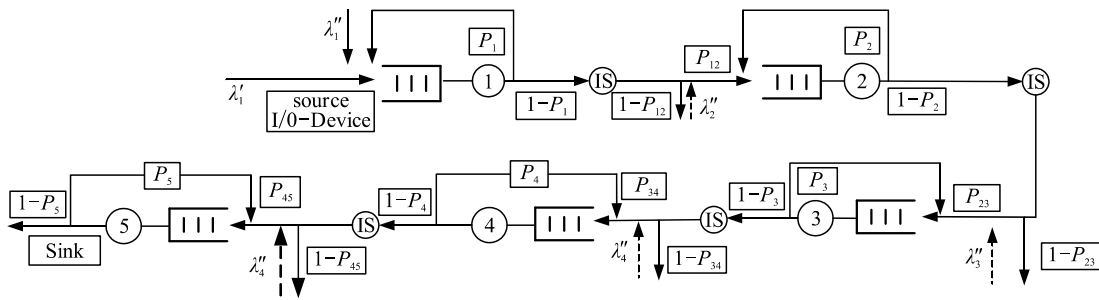


图 11 复杂通信网络排队网络模型

按照笔者所建模型进行估算，得到的结果为 0.220 017 s，将图 12 的端到端的时延数据导出，求得平均值为 0.255 191 s，与理论值的相对误差为 13.78%。

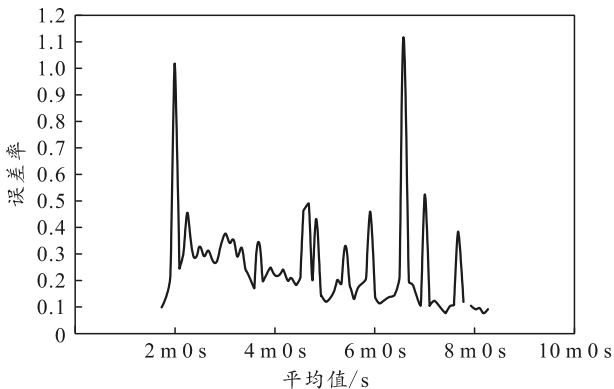


图 12 复杂网络端到端时延

4 结论

笔者围绕复杂通信网结构进行分析，基于排队网络技术，建立有线网络和无线网络时延的排队网络模型，对端到端的延时实现了快速估算。同时，利用 opnet 仿真工具，分别对有线网络、无线网络、有线无线相结合的复杂多跳网络进行建模仿真，其中快速时延估算结果与仿真结果在有线网络、无线网络、复杂网络的相对误差分别为 16%、9.9%和 13.78%，可见本文中排队网络时延模型与仿真模型基本一致。通过进一步引入多种类型的排队网络节点，如 M/M/C 节点、PS 节点等，可进一步将该成果应用到更大更复杂网络端到端的时延快速估算中。