



基于 M/M/1 的无线 mesh 网络网关分析模型

李陶深,张宏宇,叶进,葛志辉

(广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)

摘要: 根据排队论 M/M/1 模型的特性以及无线 mesh 网络中顾客请求服务的生成特点, 构建了基于 M/M/1 模型的无线 mesh 网络网关队列模型, 该模型将请求服务中原来的无序状态集转变为有序状态集, 在网关节点前进行排队, 网关作为单一的服务台服务于整个集合; 利用数学方法对模型进行求解, 即推导出网络系统的关键参量和目标分析函数。通过验证实验, 该模型可以求得网络中非饱和资源分配状态下的一些关键参量值。理论分析和实验结果都说明了新模型是合理、有效的。

关键词: M/M/1 模型; 无线 mesh 网络; 网关; 排队优化; 性能分析

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015044

Analysis Model of Gateway in Wireless Mesh Network Based on M/M/1 Queuing Model

Li Taoshen, Zhang Hongyu, Ye Jin, Ge Zhihui

(School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: According to the characteristics of M/M/1 model and production features of customer request service in the wireless mesh network, a gateway queuing model in wireless mesh network based on M/M/1 model was constructed. The model puts the original disorder state sets in request service into order sets and it was queued at the gateway node. As a single service platform, gateway services in the whole collection. Then, to solve the model by using the mathematical method, the network system key parameters and target analysis function were derived. Finally, through verification experiment, the proposed model can obtain better network parameters in the network of non-saturated resource allocation. The theory analysis and experimental results show that the proposed model is reasonable and effective.

Key words: M/M/1 model, wireless mesh network, gateway, optimal queue, performance analysis

1 引言

无线 mesh 网络(wireless mesh network, WMN)是一种新兴的无线网络架构和组网方式, 而网关调度是整个 WMN 通向 Internet 的关键部分^[1]。以往由于资源分配不均, 时常会

造成网关节点中业务流大面积堵塞, 或者网络时延大量增加和负载异常^[2]。对此, 许多研究人员提出了一些解决方案。

人们常用最大最小(max-min)算法^[2]解决无线网络资源分配问题, 该算法利用跨层设计思想实现网络带宽的公平性分配, 即在网络层利用 max-min 算法分配网络的带

收稿日期: 2014-08-21; 修回日期: 2015-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61363067, No.60963022)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61363067, No.60963022)

宽,而在 MAC 层则是利用分级分组方法实现最大情形或者最小情形的带宽分配。从应用效果看,max-min 算法适用于 802.11 DCF 网络,但用于 WMN 则存在局限性,因为 WMN 中请求服务具有随机性,会出现不确定流。

队列机制也是用于保证 WMN 公平性的一种简单有效的方案。由磊^[3]提出了一个基于时延和吞吐量的网关节点模型,它将网关节点仿真为独立的 M/D/1 队列栈,推导出封闭形式的解决方案,给出了描述时延和吞吐量瓶颈的线性规划结论和相应的网格优化拓扑结构。闻世琦等人^[4]提出了一种改进的赤字轮询(DDR)算法,它对询问的每个客户端进行标记,然后通过染色的办法将节点加入队列中,以此来保证优先级高的业务能够获得更好的服务,并且该算法可以根据不同业务的需求调整其优先级,以保证相对公平性。

基于博弈机制,参考文献[5]提出了一种网络带宽分配方案(PF-DCF),该方案综合考虑了整个网络的资源分配情况,通过构建效用函数来描述用户行为,通过不断调整 CWmin 竞争窗口来寻求更加精确的公平性调度。参考文献[6]以优先级区分流业务,提出了一种 hard effort 模式,在一定程度上保证不同优先级的业务流能够享受不同的服务。参考文献[7]和参考文献[8]在保证公平性的前提下,采用窗口索引机制进行扫描,再利用启发式模型对整个 WMN 进行建模,大大简化了网络分析和运行方式。

WMN 的流量是向网关汇聚的,根据这一特点,在单条链路上用排队论的 M/M/1 模型模拟链路特点是十分符合实际的^[9]。从目前的研究情况看,把 M/M/1 模型应用于 WMN 网关节点调度的研究成果并不多见。本文用 M/M/1 模型对 WMN 网关队列进行建模,然后推导出相关的数学表达式,得到网络系统关键目标分析参量,通过模拟服从马尔科夫离散时间分布方案,使 WMN 系统得到合理的建立和组织。

2 无线 mesh 网络网关调度数学模型

在 WMN 中,网关节点的路由器在 mesh 网络与 Internet 之间起着桥梁连接的作用。假设只考虑单流和单批次与单一服务台的通信情形,网关节点可以充当 M/M/1 系统中“1”的角色,即服务台。服务台接收服务请求的过程是以随机形式出现的,服务过程如图 1 所示。在这一服务请求过程中,网关节点接收来自路由器的服务请求,这些服务请求既有客户的请求,也有其他路由器转发的信息。当这些请求服务的信息以上行流的方式进入系统后,就可以根据它们进入系统的先后顺序,以排队的方式让它们进入队列。

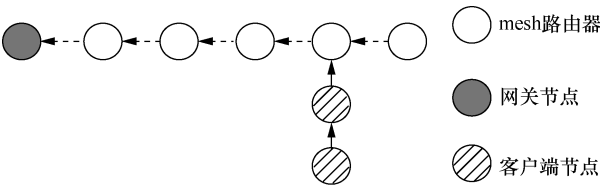


图 1 无线 mesh 网络请求服务过程

根据排队论,可以将上述的请求服务过程抽象为 M/M/1 的排队队列模型,如图 2 所示。在这个 M/M/1 的排队队列中,可以把路由器接收到的客户端服务请求认为是路由器服务流。在图 2 中,本文将一个队列独立对应于每个路由器节点,用于存放该路由器接收到的客户端请求流。

根据 WMN 的特点,在 WMN 中的一个较短时间内请求服务节点的访问是随机的,且变化时间较短,这符合排队理论的 M/M/1 基本特征。而且网络中前面出现的请求服务节点并不会影响到后面出现的请求服务节点,这符合马尔科夫性质。由排队论可知,WMN 中的一个或一批节点请求服务的过程符合排队论的生灭过程,可以把 WMN 节点的客户端请求服务定义为一次完整的排队顾客生灭过程。

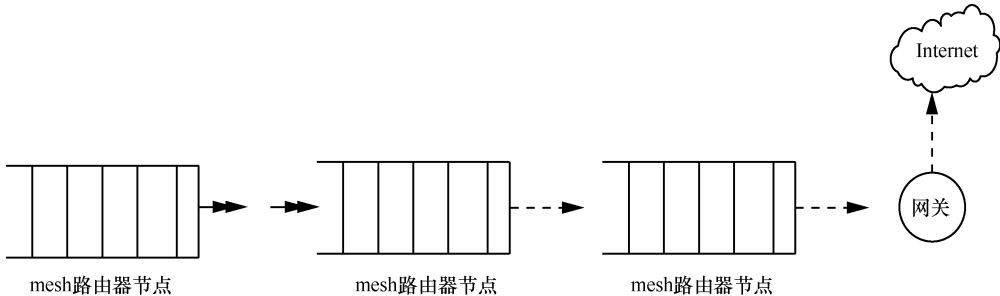


图 2 无线 mesh 网络请求服务过程抽象



网关的数学调度模型由 6 个基本参数和 2 个附带条件网络参量定义说明。6 个基本参数包括:网关节点空闲时的概率 p_0 、节点队列长度(包含在网关处接受调度的节点) L_s 、在网关前排队等待的节点数量 L_q 、请求服务节点的平均等待时间 W_q 、服务请求节点从请求服务到服务完成所需的总时间 W_s 、除在网关处动态进行调度的节点之外排队等候节点的平均队列长度 $E(l_q|l_q \geq 1)$ 。考虑到系统负荷和网络管理维护的需要,本文引入两个附带条件网络参量: $P(X > x)$ 用于表示网络中等待节点数量大于 x 的概率,这个参量的作用是在网络通信高峰时段便于网络管理员限制网络接入服务节点数量,当阈值 X 大于 x 时,需要对网络进行限制; $P(W_s > t)$ 用于表示在网络中请求服务节点的停留时间大于 t 的概率,这个参量的作用是在网络高峰时段便于网络管理员限制网络接入服务节点的服务时间。

在 WMN 中,顾客群可以看作是一个马尔科夫链: $X = \{X(t), t \in T = [0, +\infty]\}$,其状态空间为 $E = \{0, 1, 2, \dots\}$,其密度矩阵 Q 如下:

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda_0 & \lambda_0 & & & & \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_1) & \lambda_1 & & & \\ & \mu_2 & -(\mu_2 + \lambda_2) & \lambda_2 & & \\ & & \mu_3 & -(\mu_3 + \lambda_3) & \lambda_3 & \dots \\ & & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, λ 为平均的服务强度, μ 为平均的服务时间效率。

假设以 i 表示生灭过程中状态的转换,那么状态的变换有以下几种。

- $i \rightarrow i+1$, 说明有一个新成员加入到网络中,即 X 产生一个新个体。
- $i \rightarrow i-1$, 说明有一个成员离开网络,即 X 减少一个个体。
- $i \rightarrow i$, 说明 X 状态没有变化,即无新成员加入网络。

当顾客群作为 X 进入 WMN 后开始请求服务,可以为其建立起 M/M/1 排队模型,然后针对其中具体参数对模型进行求解和推导。

3 无线 mesh 网络网关调度数学模型的推导求解

3.1 基本参量求解的预备知识

假设在一次排队顾客生灭过程中,节点进入网络

系统请求服务是随机且无后效性的,符合 λ 的泊松分布,且每个节点请求服务的时间间隔和在网关处停留时间均服从负指数分布,设参数 μ 为平均服务效率,表示单位时间内通过网关进入互联网的节点数量的平均值。

在上述的生灭矩阵 Q 中,参量可为 $\lambda_k = \lambda (k=0, 1, 2, \dots)$, $\mu_k = \mu (k=0, 1, 2, \dots)$ 。假设模型中有 k 个节点进入网络,网关为忙,其余的 $k-1$ 个节点在等待,则满足排队顾客生灭过程的状态转换微分方程表示为:

$$\begin{cases} p'_k(t) = -(\lambda + \mu)p_k(t) + \lambda p_{k-1}(t) + \mu p_{k+1}(t), k \geq 1 \\ p'_0(t) = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, p_k 为系统中 k 个节点在网关节点前排队等待的概率。当时间 t 为 ∞ (无穷大)时,系统处于稳定状态,网络达到动态平稳状态,可将式(2)重写为:

$$\begin{cases} (\lambda + \mu)p_k = \lambda p_{k-1} + \mu p_{k+1}, k \geq 1 \\ \lambda p_0 = \mu p_1 \end{cases} \quad (3)$$

求解上述的微分方程,可得:

$$p_k = \frac{\lambda}{\mu} p_{k-1} = \rho^k p_0, k \geq 1 \quad (4)$$

经过上面的预处理后,下面就可以对模型中提到的变量进行推导和求解。

3.2 网络基本参量求解

(1) 求解网关节点空闲时的概率 p_0 和一般情况的概率 p_k

根据微分方程的正则性质,由式(4)可以推导得出:

$$1 = \sum_{k=0}^{\infty} p_k = \sum_{k=0}^{\infty} \rho^k p_0 = \frac{p_0}{1 - \rho} \quad (5)$$

所以,网关节点空闲概率 p_0 可表示为:

$$p_0 = 1 - \rho \quad (6)$$

在求解过程中发现,网关被占用的概率是 $\rho = 1 - p_0$, ρ 的数值越大,说明网络负载越高。如果在网络高负载时能保障数据传输稳定,可认为网络负载性能良好。根据几何分布和式(6)可得到 p_k 为:

$$p_k = \rho^k (1 - \rho) \quad (7)$$

(2) 求解 WMN 中节点队列长度 L_s

在 WMN 中节点排队队列的长度 L_s 可按式(8)计算。

$$\begin{aligned} L_s &= \sum_{k=0}^{\infty} k p_k = \rho (1 - \rho) \sum_{k=0}^{\infty} k \rho^{k-1} \\ &= \rho (1 - \rho) \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right)' = \frac{\rho}{1 - \rho} \end{aligned} \quad (8)$$

将 $\rho = \lambda / \mu$ 代入式(8),得到:

$$L_s = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (9)$$

(3) 求解 WMN 网关前排队等待的节点数量 L_q

根据 Little 公式, 可得到:

$$L_q = L_s - L_f = \sum_{k=1}^{\infty} (k-1)p_k = (1-\rho)\rho^2 \left(\frac{\rho}{1-\rho} \right)' = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad (10)$$

其中, L_f 为在网关节点中接受调度的节点平均数量。在网络中, 由于网关处是否有节点排队是一个非 0 即 1 的事件, 是一个布尔变量, 所以 L_f 的计算式为:

$$L_f = 0 \times (1-\rho) + 1 \times \rho = \rho \quad (11)$$

则有:

$$L_q = L_s - \rho = \frac{\rho}{1-\rho} - \rho = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad (12)$$

将 $\rho = \lambda/\mu$ 代入式 (12), 可得:

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (13)$$

(4) 求解 W_s 和 W_q

W_s 为某个请求服务节点从进入 WMN 请求服务到服务完成离开所需要的总时间, 它用于衡量节点在网络内平均的停留时间, 便于网络管理员监管网络。根据排队论的 Little 公式, W_s 的值可表示为:

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} = \frac{1}{\mu(1-\rho)} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (14)$$

同理, 网络中请求服务节点的平均等待时间 W_q 也可表示为:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{\rho^2}{\lambda(1-\rho)} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (15)$$

以上求出的参量可以用于推导附带条件的网络参量。

3.3 附带条件网络参量求解

(1) $P(X > x)$ 的计算

根据条件概率公式, 网络中等待节点数量大于 x 的概率 $P(X > x)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} p &= P(X > x) = 1 - \sum_{i=0}^x p_i = 1 - p_0 \sum_{i=0}^x \rho^i \\ &= 1 - (1 - \rho^{x+1}) = \rho^{x+1} \end{aligned} \quad (16)$$

(2) $E(l_q | l_q \geq 1)$ 的计算

$E(l_q | l_q \geq 1)$ 是 l_q 的有条件期望。要计算 $E(l_q | l_q \geq 1)$, 首先要计算变量 l_q 的方差 σ_q^2 。

$$\begin{aligned} \sigma_q^2 &= D(l_q) = E(l_q^2) - L_q^2 = \sum_{k=0}^{\infty} k^2 p_{k+1} - L_q^2 \\ &= \rho^2 (1-\rho) \sum_{k=0}^{\infty} k^2 \rho^{k-1} - L_q^2 \\ &= \frac{\rho^2 (1+\rho)}{(1-\rho)^2} - \left(\frac{\rho^2}{1-\rho} \right)^2 = \frac{\rho^2 (1+\rho - \rho^2)}{(1-\rho)^2} \end{aligned} \quad (17)$$

然后计算当网关节点处于繁忙状态时, 整个网络处于等待状态的排队队列长度的分布为:

$$\begin{aligned} P(l_q = k | l_q \geq 1) &= \frac{P(l_q = k, l_q \geq 1)}{P(l_q \geq 1)} = \frac{P(l_q = k)}{P(l_q \geq 1)} \\ &= \frac{p_{k+1}}{1 - P(l_q < 1)} = \frac{p_{k+1}}{1 - p_0 - p_1} = (1-\rho)\rho^{k-1} \end{aligned} \quad (18)$$

由此, 可以计算出 $E(l_q | l_q \geq 1)$, 即除在网关处动态进行调度的节点之外, 在队列中排队等待节点的平均队列长度为:

$$\begin{aligned} E(l_q | l_q \geq 1) &= \sum_{k=1}^{\infty} k (1-\rho) \rho^{k-1} \\ &= (1-\rho) \times \frac{1}{(1-\rho)^2} = \frac{1}{1-\rho} \end{aligned} \quad (19)$$

在方差确定后, 平均等待的队列长度值就可用于衡量和评价网络压力。

(3) $P(W_s > t)$ 的求解

假设 WMN 中有 k 个节点, 第 $k+1$ 个节点排在这 k 个节点之后进入网关, 于是, $W_q(k)$ 为 k 个节点进入网关接受服务的时间之和。假设 T_i 为第 i ($1 \leq i \leq k$) 个节点进入网关后接受服务所需要的时间, 则有 $W_q(k) = \sum_{i=1}^k T_i$ 。根据马尔科夫特性, 可知 T_i 是相互独立无关联的, T_i 的分布密度 $f_{T_i}(t) = \mu e^{-\mu t}$, $t \geq 0$ 。通过求 W_q 的特征分布和期望方差, 可以求得 $P(W_s > t)$ 。

T_i 的特征函数为:

$$\phi_{T_i}(z) = E(e^{jzT_i}) = \int_0^{\infty} \mu e^{-\mu t} e^{jz t} dt = \frac{\mu}{\mu - jz} \quad (20)$$

其中, z 为常量 ($\sqrt{-1}$)。同理, $W_q(k)$ 的特征函数可表示为:

$$\begin{aligned} \phi_{W_q(k)}(z) &= E[\exp(jz \sum_{i=1}^k T_i)] \\ &= \prod_{i=1}^k E[\exp(jz T_i)] = \left(\frac{\mu}{\mu - jz} \right)^k \end{aligned} \quad (21)$$

那么, W_q 的特征函数可表示为:



$$\begin{aligned}\varphi_{w_q}(z) &= \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\mu}{\mu - jz} \right)^k p_k = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\mu}{\mu - jz} \right)^k (1-\rho)\rho^k \\ &= (1-\rho) \left[1 + \frac{\lambda}{\mu(1-\rho) - jz} \right]\end{aligned}\quad (22)$$

对式(22)进行傅立叶变换,可得到 W_q 的分布密度为:

$$\begin{aligned}f_{w_q}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{w_q}(z) \exp(-jzt) dz \\ &= (1-\rho)\delta(t) + (1-\rho)\lambda \exp[-\mu(1-\rho)t]\end{aligned}\quad (23)$$

求得 $f_{w_q}(t)$ 后,就可以计算请求服务节点在网络内停留时间大于定值 t 的概率 $P(W_s > t)$ 。求此概率,首先要求得它的分布密度 $f_{w_s}(t)$ 。对单一节点来说,其在网络内全部时间 W_s 等于 W_q 与网关调度时间 T 之和。由于 W_q 和 T 均是独立分布的变量,所以 T 的分布密度可表示为:

$$f_T(t) = \mu e^{-\mu t}, t \geq 0 \quad (24)$$

因为在 $t < 0$ 时, W_s 分布为 0, 所以 W_s 的分布密度为 $f_{w_q}(t)$ 与 $f_T(t)$ 的卷积值,即:

$$\begin{aligned}f_{w_s}(t) &= f_{w_q}(t) * f_T(t) \\ &= \int_0^t f_{w_q}(t-x) f_T(x) dx + f_{w_q}(0) f_T(t) \\ &= \int_0^t \lambda(1-\rho) e^{-(\mu-\lambda)(t-x)} \mu e^{-\mu x} dx + (1-\rho) \mu e^{-\mu t} \\ &= \lambda \mu (1-\rho) e^{-(\mu-\lambda)t} \int_0^t e^{-\lambda x} dx + (1-\rho) \mu e^{-\mu t} \\ &= \mu(1-\rho) e^{-(\mu-\lambda)t} = \mu(1-\rho) e^{-\mu(1-\rho)t}\end{aligned}\quad (25)$$

通过式(25)的推导, $P(W_s > t)$ 可以表示为:

$$P\{W_s > t\} = \int_t^{\infty} \mu(1-\rho) e^{-\mu(1-\rho)h} dh = e^{-\mu(1-\rho)t} = e^{-(\mu-\lambda)t} \quad (26)$$

至此,所有网络模型中关键性能指标已通过上述的式子推导求解完毕。

4 性能分析与评价

为了对本文提出的 WMN 网关分析模型进行评价,需要对前面提到的模型的性能参量进行观察与分析,通过时间和队列长度指标评价模型的优劣。

实验场景设置在一个大小不变、网状拓扑布局的区域内,内设若干个 WMN 的专用无线路由器,其中一个路由器作为 WMN 与互联网连接的网关节点。节点数量和相关参数由人工设定,其中设定了在网络中单位时间内出现的节点流量值(以秒为单位)和网关通过率(即单位时间可以

通过网关的节点数量),前者的数值通常是相对的,后者则用于表示网关节点接入互联网的能力。在实验验证过程中,为了方便观察与分析,使用 MATLAB 2010a 软件工具模拟数学分析过程,用 PC 机模拟网络服务过程,最后复杂的数学过程通过直观的图形方式表现出来。通过验证性实验,可以证明了基于 M/M/1 模型的 WMN 网关分析模型的准确性和高效性,同时也可以发现其中的不足,并加以改进。不同的验证对应的实验参数设置也不尽相同,在下面的分析中分别设置。

4.1 与长度相关的参量

在分析与队列长度相关的参数过程中,首先设置网关通过率和其他相关参数,然后将 M/M/1 模型队列的变化情况与线性队列进行比较。图 3 和图 4 分别给出了两个队列的长度和等待节点数量随着网关节点通过率不断增加而变化的情况。实验开始时,网关节点通过率设置为单位时间 500 个,然后该值不断增加。从图 3 和图 4 中可以看出,

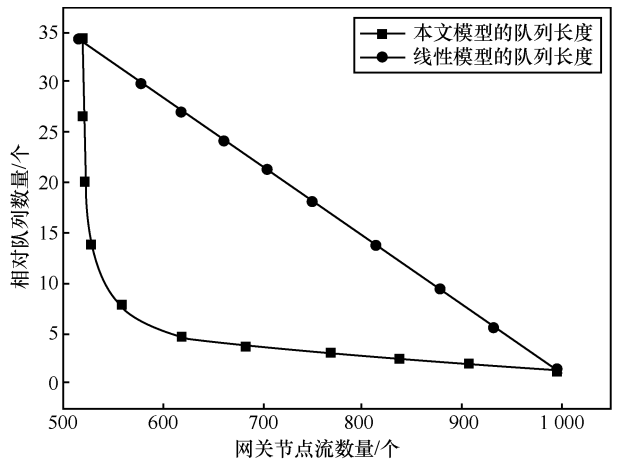


图 3 队列长度

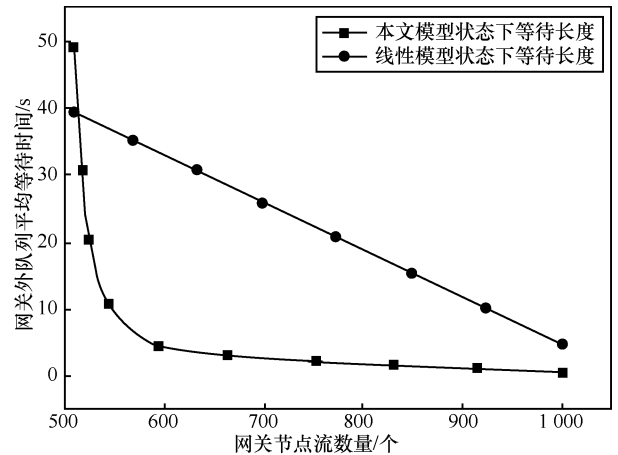


图 4 平均等待节点数量

在初始阶段,本文提出的 M/M/1 模型因队列长度较长,导致了队列中出现一定积压,但随着网关节点通过率达到并超过单位时间 550 个时,本文模型队列的长度和平均等待节点数量显著下降,其到达性能比线性队列有显著提高。这充分说明与随机线性进入网关相比,本文模型可以通过调整网关节点通过率,能够快速组织起有效的队列,使得整个网络内节点更加有序,效率更高。

4.2 与时间相关的参量

在分析与时间相关的参数过程中,首先设置网关通过率、在网关处排队的节点数量以及相关的参数,然后通过验证性实验分别观察本文模型队列等待时间和节点在网络中平均滞留时间的变化情况。实验开始时,网络节点流量设为单位时间 500 个。从图 5 和图 6 中可以看出,本文模型队列的等待时间随着网络节点流量的增加而显著下降,平均滞留时间在网关节点流量由单位时间 500 个到单位时间 550 个的变化过程中下降比较明显,而在网关

节点流量由单位时间 550 个到单位时间 700 个的变化过程中下降得比较缓慢,但是等待时间并无过多差异,还需在后面的处理中做进一步优化。如果队列等待时间或平均停留时间过长,就会对后续节点处理带来不良影响,会严重影响到网络的 QoS。

4.3 附加条件相关参量分析

在节点流平均等待长度相关参量分析过程中,主要分析在网关节点数量逐渐增加情况下,对于不同的节点变化流,本文模型的平均等待队列长度变化的情况。从图 7 的实验结果可以看到,网络内节点数量不超过 750 个之前,整个网络性能比较平稳。网络内节点数量超过 750 个之后,不同的节点变化流对本文模型的平均等待队列长度产生不同的影响。因为在不同节点流变化时,网络内会出现抖动,使得网络性能不稳。图 8 给出了节点在网络内停留时间概率的实验结果。节点最初进入网络时,会有一定的积压和拥挤,利用本文模型对节点进行组织后,节点在队

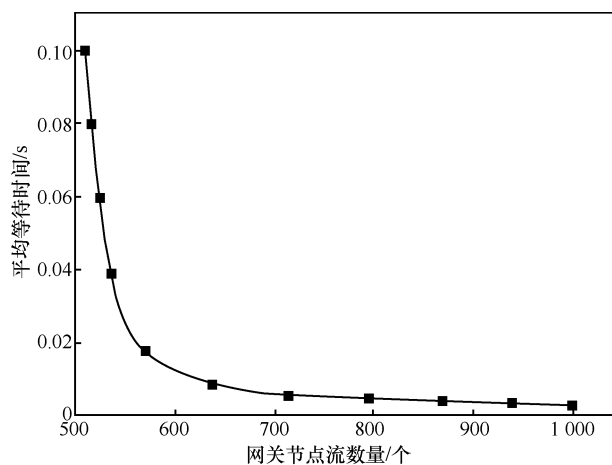


图 5 队列等待时间

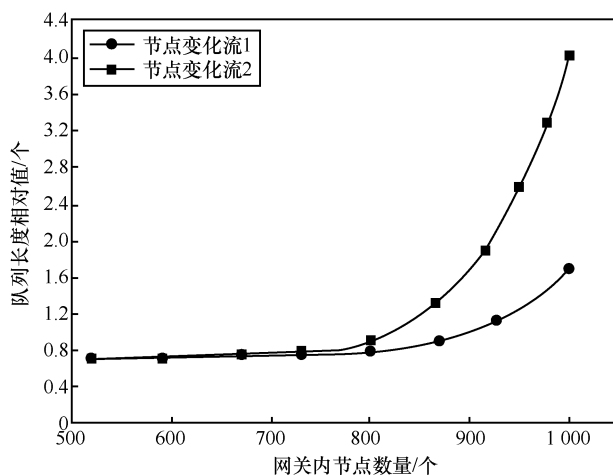


图 7 平均等待队列长度

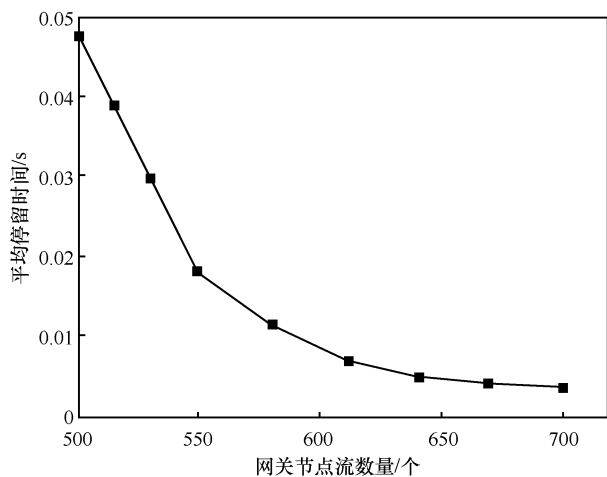


图 6 队列平均停留时间

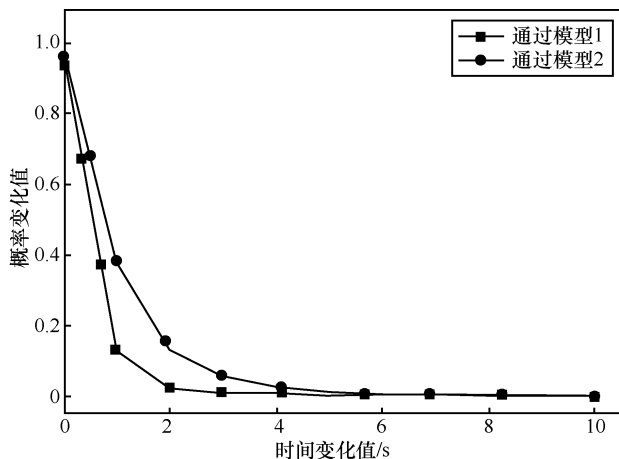


图 8 节点停留时间概率



列中的停留时间概率快速下降,效果显著。但实验中显示,如果突发性客户流过多,节点在网络中的停留时间仍然较长。如果能做进一步优化,区分度会更加明显。

5 结束语

本文根据排队论 M/M/1 模型的特点以及 WMN 网关调度的特性,构建了基于 M/M/1 模型的 WMN 网关队列模型。通过数学方法对模型进行求解,即列出具有针对性的网络求解变量目标,求出网络中关键量的数学分析表达式和目标分析函数,使目标参量和函数得出了具体的量化指标。通过数学实验平台对提出的模型进行验证,得到了有效的网络运行数据,并对得到的数值结果进行了验证和分析。理论分析和实验结果都充分说明了新模型是合理、有效的。

参考文献

- 1 葛志辉,李陶深,张继成. 无线 mesh 网络逐层信道分配策略研究. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(6): 1002~1006
Ge Z H, Li T S, Zhang J C. Research on channel assignment algorithm for wireless mesh networks. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(6): 1002~1006
- 2 Wu X B, Liu J C, Chen G H. Analysis of bottleneck delay and throughput in wireless mesh networks. Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Vancouver, British Columbia, Canada, 2006: 765~770
- 3 由磊. 无线多跳网络跨层设计与优化的相关理论和算法研究. 北京邮电大学硕士学位论文, 2009
You L. Research on the Theory and Algorithms of Cross-Layer Design and Optimization for Wireless Multihop Network. Beijing University of Posts and Communications, 2009
- 4 闻世琦,戎璐,赵晓群等. 基于赤字轮询算法的无线 mesh 网络公平性研究. 计算机应用研究, 2009, 26(3): 1022~1025
Wen S Q, Rong L, Zhao X Q, *et al.* Fairness research of wireless mesh networks based on deficit round robin. Application Research of Computers, 2009, 26(3): 1022~1025
- 5 张国鹏,张海林,赵力强. WLAN 中基于协作博弈的比例公平性带宽分配机制. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 87~93
Zhang G P, Zhang H L, Zhao L Q. Cooperative game theoretic bandwidth sharing scheme for proportional fairness in WLAN. Journal of Xidian University, 2009, 36(1): 87~93
- 6 Dong C, Chen G H, Wang H. Research of QoS on wireless mesh networks. Journal of Software, 2009, 20(6): 1539~1552
- 7 Liu Z, Yang M, Tu J, *et al.* Throughput-effective scheduling with fairness guarantee in wireless mesh networks. Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Dalian, China, 2008:1~4
- 8 Artail H, Merashad K. MDPF: minimum distance packet forwarding for search applications in mobile ad hoc networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(10): 1412~1426
- 9 Li X Y, Nusairat A, Wu Y W, *et al.* Joint throughput optimization for wireless mesh networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(7): 895~909

[作者简介]



李陶深,男,博士,广西大学计算机与电子信息学院教授,主要研究方向为无线 mesh 网络、分布式数据库、云计算。

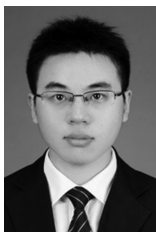
张宏宇,男,广西大学计算机与电子信息学院硕士生,主要研究方向为无线 mesh 网络。

叶进,女,博士,广西大学计算机与电子信息学院教授,主要研究方向为无线传感器网络、移动计算。

葛志辉,男,博士,广西大学计算机与电子信息学院教授,主要研究方向为无线网络、移动计算。

2015044-7

(上接 2015005-5)



王源,男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为混沌同步、混沌保密通信等。



王颖,女,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为微弱信号混沌检测。

2015005-6