

# 基于 M/G/1/K 排队理论的 IEEE 802.15.4 网络吞吐量分析

郭宁<sup>1\*</sup>, 毛剑琳<sup>1</sup>, 王瑞<sup>2</sup>, 乔冠华<sup>1</sup>, 胡宇杰<sup>1</sup>, 张传龙<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 津桥学院, 昆明 650106)

(\* 通信作者电子邮箱 gnkuning@126.com)

**摘要:**针对 IEEE 802.15.4 时隙载波侦听多址接入与碰撞避免(CSMA/CA)算法,利用二维 Markov 链分析方法提出了一个网络分析模型。该模型特别考虑了 IEEE 802.15.4 协议的休眠模式以及退避窗口先于退避阶数(NB)达到最大值的情况。在此基础上,结合 M/G/1/K 排队理论推导得到了吞吐量的表达式,进而分析了网络在非饱和状态下数据包到达率对吞吐量的影响,利用模拟平台 NS2 进行了仿真。实验结果显示理论分析结果与仿真结果可以较好地拟合,并能准确描述网络吞吐量的变化,验证了分析模型的有效性。

**关键词:**无线传感器网络;时隙载波侦听多址接入与碰撞避免;Markov 链;M/G/1/K 排队模型;吞吐量

**中图分类号:** TP393.01 **文献标志码:** A

## Network throughput analysis of IEEE 802.15.4 based on M/G/1/K queuing theory

GUO Ning<sup>1\*</sup>, MAO Jianlin<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, QIAO Guanhua<sup>1</sup>, HU Yujie<sup>1</sup>, ZHANG Chuanlong<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China;

2. School of Jinqiao, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650106, China)

**Abstract:** According to the IEEE 802.15.4 slotted Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) algorithm, a network analysis model using analysis method of two-dimensional Markov chain was proposed. Not only the sleep mode of IEEE 802.15.4 agreement but also the condition where the backoff window reached the maximum value before the Number of Backoff (NB) were especially considered in the model. On this basis, combined with M/G/1/K queuing theory, the throughput expression was derived, and the packet arrival rate effect on the throughput was analyzed under unsaturated network. Using the simulation platform Network Simulator Version2 (NS2), the experimental results show that the theoretical analysis fits well with the simulation result, and the network throughput is described accurately. Then the effectiveness of the analytical model is validated.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); slotted Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA); Markov chain; M/G/1/K queuing model; throughput

## 0 引言

近年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的介质接入控制(Media Access Control, MAC)协议越来越受到人们的关注,而 MAC 层建模是研究 MAC 层性能的重要手段之一。针对 MAC 层的建模方法也并不单一,如:文献[1]的模型是基于对平均退避周期长度的分析得到的;文献[2]建立了 802.11 分布式协调访问控制方式的博弈模型,不过由于算法过于复杂而难于实现;文献[3]则通过建立 Markov 模型对网络的吞吐量进行了分析。

由于 Markov 过程是具有无后效性的随机过程,这一特征完全符合 MAC 层的运行机制,所以目前对于 IEEE 802.15.4 协议中时隙载波侦听多址接入与碰撞避免(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)机制性能的研究,广泛采用 Markov 链模型。国内外有不少关于此数学模型的研究:文献[4]建立了首个考虑双向传输的 Markov 链分析模型;文献[5]提出的 Markov 链模型首次考虑了节点在传输过程中的能量损失,并且通过模型计算得到了饱和态下

吞吐量和功耗的表达式;文献[6]建立了数据在最后一次碰撞后信道空闲期的 Markov 链模型,对超时隙进行了深入分析;文献[7]对文献[4–6]的模型进行了改进,但由于采用固定延时进行数据传输,建立的模型并不能如实反映网络的实际工作状态;文献[8]用一个改进的 Markov 链模型对在饱和和 IEEE 802.11 网络干扰下的 IEEE 802.15.4 网络吞吐量进行了评价;文献[9]把传感器节点进行分类,提出了带优先级的 CSMA/CA 机制,应用 Markov 链模型分析了该机制的性能。然而由于所建的 Markov 链模型大都比较简单,所以并不能很精确、全面地描述协议的特性。

本文在分析现有的 IEEE 802.15.4 MAC 协议模型的基础上,针对星形拓扑结构的无线传感器网络,提出了一个新的 Markov 链模型。用此模型得出各状态转移概率的解析式,并使用 M/G/1/K 排队理论分析了节点数不同与数据包到达率变化的情况下网络吞吐量的性能。

## 1 理论建模与分析

### 1.1 时隙 CSMA/CA 算法

时隙 CSMA/CA 算法是 IEEE 802.15.4 在其信标使能模

收稿日期:2013-09-24;修回日期:2013-11-14。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61163051);云南省应用基础研究基金资助项目(2009ZC050M)。

作者简介:郭宁(1983–),女,山西河津人,实验师,硕士,主要研究方向:无线传感器网络、随机过程;毛剑琳(1976–),女,广西桂林人,副教授,博士,主要研究方向:无线传感器网络、网络控制系统;王瑞(1983–),女,山东东明人,讲师,硕士,主要研究方向:智能优化、软测量。

式中采用的信道接入算法。对其中的每个设备而言都有3个变量:初始值为0的退避阶数(Number of Backoff, NB)、初始值为2的竞争窗口长度(Contention Window, CW)和退避指数(Backoff Exponent, BE)。当MAC定位时隙边界之后,在当前区间 $[0, 2^{BE} - 1]$ 中随机选择一个退避数,并按照一定的退避时隙进行退避等待。等待结束后开始侦听信道,通过物理层实施的空闲信道评估(Clear Channel Assessment, CCA)来判断当前的信道状态。如果信道忙, NB和BE值增加1,同时重置CW值为2;若NB还没有达到其上限值,则重新进行退避等待;否则算法终止。如果信道空闲, CW减1;若CW没有减至0,继续进行信道侦听;若减至0,则MAC已成功接入信道并可以进行缓冲区中数据帧的发送。

### 1.2 Markov链模型及推导

考虑到IEEE 802.15.4协议中的低功耗休眠模式,假设节点在当前竞争接入时期内的剩余时隙不足以完成数据传输或者为了发送数据帧尝试的退避阶数达到最大值却依然无法接入信道时便进入休眠即空闲等待状态。同时,随着网络中的节点数增多,在竞争信道的过程中退避窗口会先于退避阶数达到最大值,此时在保持退避窗口为最大值不变的情况下,退避阶数会因信道竞争失败而逐次增1直至达到其上限值。

假设 $n$ 个设备与一个协调器组成一个单跳星形拓扑网络结构,设备访问信道的方式为时隙CSMA/CA模式。令随机变量 $b(t)$ 表示设备在时刻 $t$ 所对应的退避计数器值, $s(t)$ 表示其所处的退避阶数。由此建立二维离散时间Markov链 $\{s(t), b(t)\}$ ,如图1所示。

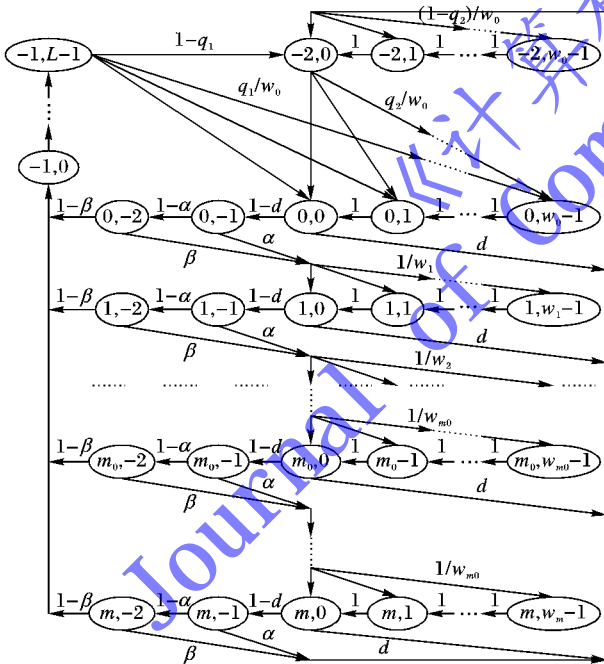


图1 CSMA/CA算法离散时间Markov链模型

IEEE 802.15.4 MAC支持两种工作模式:信标使能和无信标使能。本文只考虑信标使能模式,此时协议使用超帧进行定时。对于超帧的活跃期,本文只研究采用CSMA/CA的竞争接入时期,忽略其他信道接入方式。 $\{s(t), b(t) = 0\}$ 表示设备判断当前竞争接入时期剩余时隙是否足够完成数据的传输; $\{s(t), b(t) = -1\}$ 表示CCA1即设备进行第一次空闲信道检测; $\{s(t), b(t) = -2\}$ 表示CCA2即设备进行第二次空闲信道检测; $\{s(t) = -1, b(t)\}$ 表示设备在进行数据传输,  $L$ 为传输数据帧需要的时隙数; $\{s(t) = -2, b(t)\}$ 表示设

备处于空闲状态。

图1所示的模型中, $w_i$ 表示设备的竞争窗口大小,其中: $w_0 = 2^{macMinBE}$ ;  $m_0$ 为最大退避级数且 $m_0 \leq m$ ,即当设备退避 $m_0$ 次后,竞争窗口值达到最大。它们之间的关系如式(1)所示:

$$w_i = \begin{cases} w_0, & i = -2 \\ 2^i w_0, & 0 \leq i < m_0 \\ 2^{m_0} w_0, & m_0 \leq i \leq m \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\alpha$ 和 $\beta$ 分别表示CCA1与CCA2信道繁忙的概率,当退避计数器减至0时执行CCA1,而当执行CCA1的结果为信道空闲时才可以执行CCA2; $d$ 为当前竞争接入时期剩余时隙不足以完成数据传输的概率; $q_1$ 表示发送队列中总有数据包等待发送的概率; $q_2$ 表示 $\{s(t) = -2, b(t)\}$ 状态时有数据包要传输的概率。

在建立的Markov链中,各主要状态间的转移概率描述如方程组(2)所示:

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k+1\} = 1, & k \in [0, w_i - 2], i \in [-2, m] \\ P\{i, k | i-1, 0\} = (1-d)[\alpha + (1-\alpha)\beta]/w_i, & i \in [1, m], k \in [0, w_i - 1] \\ P\{0, k | i, 0\} = [(1-d)(1-\alpha)(1-\beta)(1-q_1)q_2 + (1-d)(1-\alpha)(1-\beta)q_1 + d \cdot q_2]/w_0, & i \in [0, m-1], k \in [0, w_0 - 1] \\ P\{0, k | m, 0\} = (1-d)(1-\alpha)(1-\beta)(1-q_1)q_2/w_0 + (1-d)(1-\alpha)(1-\beta)q_1/w_0 + (1-d)[\alpha + (1-\alpha)\beta]q_2/w_0 + dq_2/w_0, & k \in [0, w_0 - 1] \\ P\{i, -1 | i, 0\} = 1-d, & i \in [0, m] \\ P\{i, -2 | i, 0\} = (1-d)(1-\alpha), & i \in [0, m] \\ P\{-2, k | i, 0\} = (1-d)(1-\alpha)(1-\beta)(1-q_1)/w_0 + d + (1-d)[\alpha + (1-\alpha)\beta], & k \in [0, w_0 - 1], i \in [0, m] \end{cases} \quad (2)$$

其中 $P\{i, k | i, k+1\}$ 表示从状态 $\{s(t) = i, b(t) = k+1\}$ 转移到状态 $\{s(t+1) = i, b(t+1) = k\}$ 。方程组(2)中的第1个表达式表示在退避过程中,退避计数器在每个退避时隙开始时刻自动减1;第2个表达式表示发送数据失败后进入下一个退避阶段,退避级数加1,退避计数器等概率地从 $[0, w_i - 1]$ 中取值;第3个表达式表示设备处理完数据后,发送队列非空而进入一个新的退避过程,退避级数为0,退避计数器等概率地从 $[0, w_i - 1]$ 中取值;第4个表达式表示设备在退避级数达到最大时处理完传输数据后,发送队列非空而进入一个新的退避过程;第5个表达式表示退避计数器减至0时判断当前竞争接入时期剩余时隙可以完成数据传输而执行CCA1;第6个表达式表示设备执行CCA1发现信道空闲而执行CCA2;第7个表达式表示设备处理完数据后,发送队列为空而进入空闲状态。

根据Markov链的遍历性可知 $\{s(t), b(t)\}$ 的平稳分布就是极限分布,于是定义极限分布为:

$$b_{i,k} = \begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} p\{s(t) = i, b(t) = k\}, & i \in [0, m], k \in [-2, w_i - 1] \\ \lim_{t \rightarrow \infty} p\{s(t) = i, b(t) = k\}, & i = -2, k \in [0, w_i - 1] \end{cases} \quad (3)$$

由Markov链的正则性可知,所有状态的概率之和为1,即:

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{w_i-1} b_{i,k} + \sum_{i=0}^m b_{i,-1} + \sum_{i=0}^m b_{i,-2} + \sum_{k=0}^{L-1} b_{-1,k} + \sum_{k=0}^{w_0-1} b_{-2,k} = 1 \quad (4)$$

当退避计数器减至 0 时,开始判断当前竞争接入时期的剩余时间是否足以传输长度为  $L$  的数据帧,如果不能,则进入下一级退避状态:

$$b_{i-1,0}(1-d)[\alpha + (1-\alpha)\beta] = b_{i,0}; \quad i \in [1, m] \quad (5)$$

于是得到:

$$b_{i,0} = \{(1-d)[\alpha + (1-\alpha)\beta]\}^i b_{0,0} = q^i b_{0,0}; i \in [0, m] \quad (6)$$

定义  $\tau$  为节点在稳定状态下准备发送分组的概率,则:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{1-q^{m+1}}{1-q} b_{0,0} \quad (7)$$

结合方程组(2)中的第2个表达式,可得:

$$b_{i,k} = \frac{w_i - k}{w_i} b_{i,0}; \quad i \in [1, m], k \in [0, w_i - 1] \quad (8)$$

从而方程(4)中的各个项的表达式为:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{w_i-1} b_{i,k} = \frac{b_{0,0}}{2} \left( w_0 \frac{1-(2q)^{m_0+1}}{1-2q} + 2^{m_0} \frac{1-q^{m-m_0}}{1-q} + \frac{1-q^{m+1}}{1-q} \right) \\ \sum_{i=0}^m b_{i,-1} = \tau(1-d) = \frac{1-q^{m+1}}{1-q} (1-d) b_{0,0} \\ \sum_{i=0}^m b_{i,-2} = \tau(1-d)(1-\alpha) = \frac{1-q^{m+1}}{1-q} (1-d)(1-\alpha) b_{0,0} \\ \sum_{k=0}^{L-1} b_{-1,k} = \tau(1-d)(1-\alpha)(1-\beta) = L(1-q^{m+1}) b_{0,0} \\ \sum_{k=0}^{w_0-1} b_{-2,k} = \frac{w_0+1}{2} \left[ (1-q_1)(1-q^{m+1}) b_{0,0} + \frac{(1-q^{m+1}) db_{0,0}}{1-q} + \right. \\ \left. q^{m+1} b_{0,0} + (1-q_2) \frac{1-q_1(1-q^{m+1})}{q_2} b_{0,0} \right] \end{cases} \quad (9)$$

### 1.3 M/G/1/K 排队模型

设定数据包传输过程服从到达率为  $\lambda$  的泊松分布,则设备的缓存队列可以看作 M/G/1/K 排队模型。于是,队列中总有数据包等待发送的概率  $q_1$  可以表示为:

$$q_1 = \lambda/v \quad (10)$$

其中  $v = 1/T_{\text{service}}$  表示数据帧平均服务率。 $T_{\text{service}}$  是平均服务时间,它包括设备访问信道所需要的退避时间、数据在信道中传输的时间总和。用  $t_b$  表示退避时间,  $t_s$  表示数据包传输成功所用的时间,  $t_f$  表示数据包传输失败所用的时间<sup>[11]</sup>。则:

$$\begin{cases} T_{\text{service}} = t_b + t_s + t_f \\ t_b = \delta(1-\alpha)(1-\beta) \frac{1-q^{m_0+1}}{1-q} \left[ (2^{m_0+2}-1)w_0 - \frac{(1+m_0)m_0}{2} - (m_0+1)(w_0+1) \right] / 2 + \delta(1-\alpha)(1-\beta) \left[ (2^{m_0+1}w_0 - m_0 - w_0 - 1) + (m-m_0)(2^{m_0}w_0 - 1) \right] / 2 \cdot \frac{1-q^{m-m_0}}{1-q} \\ t_s = N\tau(1-d)[1-\tau(1-d)]^{N-1}(1-\alpha)(1-\beta)(t_h + t_p + 2\delta + t_{\text{ack}} + T_{\text{ack}} + t_{\text{LIFS}}) \\ t_f = (1-\alpha)(1-\beta)[1-(1-\tau(1-d))^N] - N\tau(1-d)[1-\tau(1-d)]^{N-1}(t_h + t_p + \delta + t_{\text{ack}-t_0}) \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $\delta$  是单位退避时隙长度,  $\delta$  是数据传输延迟,  $t_h$  是数据包的物理层 (Physical Layer, PHY) 和 MAC 头部负载,  $t_p$  是数据帧载荷,  $t_{\text{ack}}$  是等待确认帧的时间,  $T_{\text{ack}}$  是确认帧的传输时间,  $t_{\text{ack}-t_0}$  是确认帧超时的时间,  $t_{\text{LIFS}}$  是长帧间距。

根据泊松到达原理可知,设备在  $\{s(t) = -2, b(t)\}$  状态时有数据包要传输的概率  $q_2$  的表达式为:

$$q_2 = 1 - e^{-\lambda \frac{w_0-1}{2}\delta} \quad (12)$$

### 1.4 信道检测概率及吞吐量解析式

$d$  和  $\alpha$  的表达式确定采用与文献[10]类似的方法。如果设备在退避之后,当前竞争接入时期内的剩余时间不够传输时隙长为  $L$  的数据帧,则 MAC 将放弃在当前竞争接入时期发送待发数据帧而进入队列缓冲区内。若令  $SD$  为超帧持续时间,则转移概率  $d$  由式(13)确定:

$$d = L/SD \quad (13)$$

如果其他  $N-1$  个节点中,有一个在信道上传输,就会导致当前节点首次侦听信道的结果为忙状态,并且每个传输都持续了  $L$  个时隙。因此概率  $\alpha$  为:

$$\alpha = L(1-(1-\tau(1-d))^{N-1})(1-\alpha)(1-\beta) \quad (14)$$

要使当前节点第二次检测信道时结果为忙,那么其他  $N-1$  个节点中至少有一个在 CCA1 开始侦听信道,并且此时 CCA2 时隙的概率为空。于是  $\beta$  的表达式为:

$$\beta = (1-(1-\tau(1-d))^{N-1})(1-\beta) \quad (15)$$

定义  $S$  为网络的吞吐量,它表示为一个时隙内传输有效载荷的平均时间与时隙平均长度的比值:

$$S = \frac{t_s}{t_s + t_f + (1-(1-(1-\tau(1-d))^N)(1-\alpha)(1-\beta))\delta} \quad (16)$$

以上列出的所有模型参数和各状态的稳态概率都可以通过数值方法对非线性方程组求解得到。

## 2 实验与分析

为了验证本文所提模型的准确性,采用网络仿真软件 NS2-2.28 对协议 IEEE 802.15.4 进行相关仿真实验。

### 2.1 仿真模型

实验场景设置为星形网络拓扑,节点 0 为网络协调器节点,位于圆点,其余节点均匀分布在半径为 10 m 的圆四周。分别实验设备数量为 5, 10, 15, 20 及 25 的情况,它们的拓扑结构类似,只是分布在协调器周围的节点数不同。

实验的工作模式设置为信标使能,同时设定以下参数:  $BO = 6$ ,  $SO = 4$ ,  $macMinBE = 3$ ,  $aMaxBE = 5$ ,  $macMaxCSMABackoffs = 4$ ,  $\delta = 320 \mu s$ ,  $\delta = 1 \mu s$ , 数据帧载荷 100 B, MAC 头部 13 B, PHY 头部 6 B,  $t_{\text{ack}}$  为 12 symbols,  $t_{\text{LIFS}}$  为 40 symbols,  $T_{\text{ack}}$  为 11 B,  $t_{\text{ack}-t_0}$  为 54 symbols。

### 2.2 结果分析

实验采用泊松流进行数据传输,数据包的到达过程服从速率为  $\lambda$  的泊松分布。设置信道速率为 250 Kb/s,仿真时间为 200 s,可以得到设备数量分别为 5, 10, 15, 20, 25 时不同的数据包速率对吞吐量的影响情况,如图 2~3 所示。

从图 2~3 可以看出,吞吐量的理论分析结果与实验的仿



真结果有较好的拟合。由于网络的总负载量<sup>[11]</sup>为:节点数 $\times$ 数据帧载荷 $\times$ 数据包到达率,为了使网络总负载量一致,在节点数为5,10,15时,设置包的发送速率在每秒10个到150个之间变化;当节点数增大到20与25时,将包的发送速率控制在每秒10个到90个之间变化。同时考虑到实际中的网络一般处于不饱和状态,根据M/G/1/K排队理论在实验中保证包到达率 $\lambda$ 小于数据帧平均服务率 $v$ 。

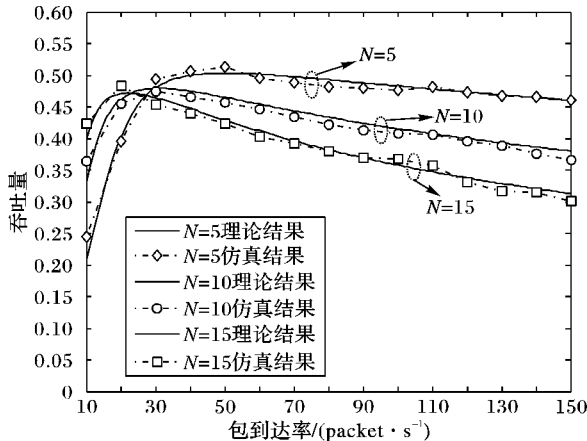


图2 数据包到达率对吞吐量的影响曲线( $N=5, 10, 15$ )

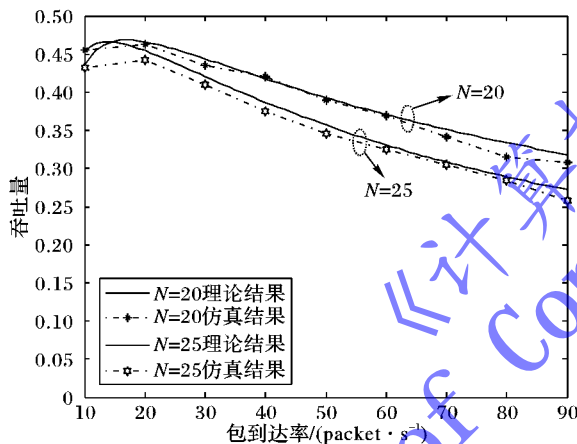


图3 数据包到达率对吞吐量的影响曲线( $N=20, 25$ )

观察图2~3可知,随着数据包到达率的增加,吞吐量也由此变大,但当达到各自的峰值之后,吞吐量的变化不明显,并且整体呈现下降趋势。对比图2~3可以发现,节点数量越多,其对应的吞吐量峰值来临越快;吞吐量的数值随节点数量的增多而减少;同时,虽然包的发送速率增至某一值后节点的吞吐量都会下降,但是节点数目越多,吞吐量下降的趋势越明显。这些变化说明网络所能承载的负荷量是一定的,数据包到达率越高、节点数目越多,网络会越快达到满载。而网络满负荷后,数据包发送速率的变化就会对吞吐量的影响甚微;节点数增大会使数据的冲突碰撞概率增加,故相应的吞吐量减小明显。

### 3 结语

利用Markov链分析方法,本文提出了一种基于IEEE 802.15.4时隙CSMA/CA算法的分析模型;并使用M/G/1/K排队论得到了协议的理论吞吐量。通过数值计算分析了网络在不饱和状态下吞吐量的变化情况;将理论结果与NS2得到的仿真结果进行对比,发现两种结果拟合较好,说明所建模型

可以用来描述IEEE 802.15.4 MAC协议,也可用于分析非饱和和负载对网络性能的影响。

### 参考文献:

- [1] GAO J L, HU J, MIN G Y. A new analytical model for slotted IEEE 802.15.4 medium access control protocol in sensor networks [C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Communications and Mobile Computing, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 427 - 431.
- [2] XIAO Y, SHAN X, REN Y. Game theory models for IEEE 802.11 DCF in wireless Ad Hoc networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(3): S22 - S26.
- [3] SHU F, SAKURAI T. A new analytical model for the IEEE 802.15.4 CSMA-CA protocol [J]. Computer Networks, 2011, 55(11): 2576 - 2591.
- [4] MISIC J, SHAFI S, MISIC V B. Performance of a beacon enabled IEEE 802.15.4 cluster with downlink and uplink traffic [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(4): 361 - 376.
- [5] PARK T R, KIM T H, CHOI J Y, et al. Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA [J]. IEEE Electronics Letters, 2005, 41(18): 1017 - 1019.
- [6] ZHANG Y, XU P, ZHANG Z, et al. Comments on throughput analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA considering timeout period [J]. IEEE Electronics Letters, 2006, 42(19): 1127 - 1128.
- [7] POLLIN S, ERGEN M, ERGEN S C, et al. Performance analysis of slotted carrier sense IEEE 802.15.4 medium access layer [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(9): 3359 - 3371.
- [8] SHIN, S Y. Throughput analysis of IEEE 802.15.4 network under IEEE 802.11 network interference [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2013, 67(8): 686 - 689.
- [9] ZHAO L, BAI G W, SHEN H, et al. Priority-based IEEE 802.15.4 CSMA/CA mechanism for WSNs [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2013, 20(1): 47 - 53.
- [10] GAO B, HE C, JIANG L. A Markov based analytical model for IEEE 802.15.4 MAC considering sleep mode [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(6): 918 - 922. (高博, 何晨, 蒋铃鸽. 一种考虑休眠模式的IEEE 802.15.4 MAC协议Markov分析模型[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 918 - 922.)
- [11] LU Y, FANG M, GUAN J, et al. Throughput analysis of 802.15.4 networks working on non-saturation situation [J]. Journal of System Simulation, 2010, 2(4): 1037 - 1041. (陆阳, 方梅, 官骏鸣, 等. 非饱和态802.15.4网络吞吐量建模分析[J]. 系统仿真学报, 2010, 2(4): 1037 - 1041.)
- [12] HUANG H, FENG S, QIN L, et al. NS network simulation and protocol simulation [M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2010. (黄化吉, 冯穗力, 秦丽姣, 等. NS网络模拟和协议仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.)
- [13] KE Z. NS2 simulation-multimedia and wireless network communication [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (柯志亨. NS2仿真实验——多媒体和无线网络通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.)