

IEEE 802.15.6 无线体域网 CSMA/CA 接入机制建模与性能分析*

李燕君, 邵剑集, 朱艺华

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

通讯作者: 李燕君, E-mail: yjli@zjut.edu.cn

摘要: 无线体域网是由附着在人体表的可穿戴传感器或植入人体内的生物传感器组成的无线网络。IEEE 802.15 工作组于 2012 年正式发布了用于无线体域网的 IEEE 802.15.6 通信标准。该标准面向窄带通信主要采用支持 QoS 区分服务的时隙 CSMA/CA 接入机制。为深入理解该机制的内在特性, 利用 Markov 链对饱和状态下的退避过程进行建模, 并在此基础上分析了各个优先级的吞吐量、成功收包率和延迟等性能。仿真结果验证了模型分析的准确性。分析和仿真结果表明, 该标准为不同优先级提供了区分服务, 但在饱和状态下最高优先级会抢占大部分信道资源, 造成其他优先级的资源短缺。

关键词: IEEE 802.15.6; CSMA/CA; 马尔可夫链; QoS 区分服务; 无线体域网

中文引用格式: 李燕君, 邵剑集, 朱艺华. IEEE 802.15.6 无线体域网 CSMA/CA 接入机制建模与性能分析. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (1)): 19-29. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14003.htm>

英文引用格式: Li YJ, Shao JJ, Zhu YH. Modeling and performance analysis of the CSMA/CA access mechanism for IEEE 802.15.6 wireless body area networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 19-29 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14003.htm>

Modeling and Performance Analysis of the CSMA/CA Access Mechanism for IEEE 802.15.6 Wireless Body Area Networks

LI Yan-Jun, SHAO Jian-Ji, ZHU Yi-Hua

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Corresponding author: LI Yan-Jun, E-mail: yjli@zjut.edu.cn

Abstract: Wireless body area network (WBAN) is a network of wearable or implanted sensors around or inside human body. In 2012, the IEEE 802.15 Working Group developed a new communication standard IEEE 802.15.6 specifically for WBAN. The primary medium access control technique defined in this standard for narrow-band communication is slotted CSMA/CA mechanism supporting differentiated QoS service. To understand the intrinsic nature of this mechanism, the backoff procedure under saturation condition is modeled by Markov chain so that throughput, successful packet delivery rate, and delay are analyzed. Simulation results confirm the accuracy of the model analysis. Both analysis and simulation results show that this standard provides differentiated service for different priorities, however, also indicates that under saturation condition the medium is mostly preempted by the highest priority while starving other priorities.

Key words: IEEE 802.15.6; CSMA/CA; Markov chain; differentiated QoS service; wireless body area network

无线体域网(wireless body area network, 简称 WBAN)是由附着在人体表的可穿戴传感器或植入人体内的生物传感器组成的无线网络^[1-3]。这些传感器采集人体的生理信号(如体温、血压、心电信号等), 人体活动或动作信号(加速度、角速度等), 处理这些信号并传输到 WBAN 协调器, 再进一步与外部网络相连。WBAN 虽然覆盖面小, 但是惠及面极广, 在医疗服务、电子娱乐、体育运动、军事、公共安全等多个领域具有广阔的应用前景^[3]。

* 基金项目: 国家自然科学基金(61003264); 浙江省自然科学基金(LY13F020028, LY14F020020)

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

目前我们熟知的由 IEEE 802 标准委员会制定的无线网络标准主要有针对无线局域网(WLAN)的 IEEE 802.11 系列,针对无线城域网(WMAN)的 IEEE 802.16 系列和针对无线个人区域网(WPAN)的 IEEE 802.15 系列.WBAN 属于 WPAN 中的一种,但已有的 WPAN 标准,如 IEEE 802.15.4,蓝牙等不能满足 WBAN 对区分服务、高可靠性和抗干扰能力等方面的要求.为适应 WBAN 的应用需求,IEEE 802.15 工作组于 2007 年成立 TG6,开始起草 WBAN 通信协议,并最终于 2012 年 2 月正式发布了 IEEE 802.15.6 标准^[4],该标准专门针对人体表或体内的短距离、低功耗无线通信,详细定义了物理层和 MAC 子层的操作规程.IEEE 802.15.6 标准在物理层规定了 400MHz~2.4GHz 的窄带通信、UWB 超宽带通信和以人体为传输介质的体内通信这 3 种方式,在 MAC 子层支持基于竞争和基于调度的信道接入机制.其中,基于调度的接入方式用于支持上行/下行链路分配和轮询等,基于竞争的接入机制是不同优先级类型接入信道的主要方式,包括时隙 CSMA/CA(窄带通信使用)和时隙 Aloha(超宽带和人体通信使用)两种.

建模、仿真实验和搭建试验床是分析无线协议的主要方法.对协议的建模和性能分析可以帮助我们更深层次上把握协议的内在特性,不仅易于对网络性能进行预测,而且有助于系统的优化设计.本文主要针对窄带通信采用的支持 QoS 优先级区分服务的时隙 CSMA/CA 接入机制进行建模,并对饱和状态下的吞吐量、成功收包率和延迟等性能进行了理论和仿真分析.

1 时隙 CSMA/CA 接入机制概述及相关工作

如图 1 所示,在 IEEE 802.15.6 网络中,协调器周期性地发送信标帧 B 帧,时间被划分为一个个信标周期(又称超帧).每个活跃的信标周期内可包含若干个阶段:独占接入阶段(exclusive access period,简称 EAP)、随机接入阶段(random access period,简称 RAP)、受控接入阶段(managed access period,简称 MAP)和竞争接入阶段(contention access period,简称 CAP),其中,EAP1,RAP1,EAP2,RAP2 和 CAP 在物理层为窄带通信的方式下均采用 CSMA/CA 接入机制,MAP 采用无冲突的接入机制.标准规定,除 RAP1 外,其余阶段的长度值最小可设为 0,若 CAP 不为 0,需发送 B2 帧声明 CAP 长度.标准中定义了 {UP0,UP1,...,UP7} 共 8 种优先级类型以支持 QoS 区分服务,例如最高优先级类型 UP7 为紧急医疗数据,在信标周期中,EAP 只能由最高优先级,即优先级 7 接入,而 RAP 和 CAP 可以由所有优先级接入.

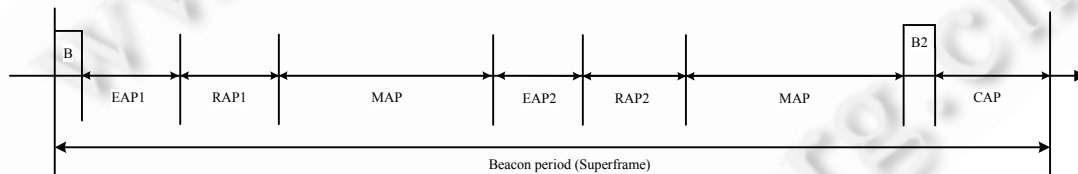


Fig.1 Illustration of the beacon period

图 1 信标周期示意图

基于 CSMA/CA 竞争机制,每个优先级类型都维护一个退避计数器和退避窗口,信道的载波检测和数据的发送均以时隙为基本单位.当节点有数据要发送时,启动二进制指数退避算法,退避计数器在区间 $[1, CW]$ 上随机取一个整数作为其初始值,其中 CW 为当前竞争窗口长度, CW 随退避阶段数动态改变,其取值范围为 $[CW_{min}, CW_{max}]$,不同的优先级类型对应不同的 CW_{min} 和 CW_{max} ,见表 1.从表 1 中可以看出,优先级越高,竞争窗口长度越小,接入信道的概率就越大.经过初始化后,每经过一个信道空闲时隙,退避计数器减 1,当节点侦听到信道忙或当前阶段的剩余时间不足以发送一个完整的数据帧时,退避计数器将被“冻结”,停止递减,并在信道恢复空闲一个 SIFS 时间或当前阶段的剩余足够发送一个完整的数据帧后,重新唤醒退避计数器;当计数器减到 0 时,节点发送数据.如果有两个或两个以上优先级的计数器同时减到 0,会产生冲突,进入下一退避阶段并更新退避窗口;当优先级 i 的重传次数超过最大重传次数 R_i 时,传输失败.优先级 i 在退避阶段 j 按照如下规则选择和更新退避窗口长度 $W_{i,j}$.

- $W_{i,0} = CW_{i,min}$;
- $W_{i,j} = \min\{2W_{i,j-1}, CW_{i,max}\}$, j 是偶数且 $2 \leq j \leq R_i$;

- $W_{i,j}=W_{i,j-1}j$ 是奇数且 $2 \leq j \leq R_i$.

Table 1 Contention window bounds for different priorities

表 1 不同优先级对应的最小和最大竞争窗口值

优先级类型	0	1	2	3	4	5	6	7
CW_{min}	16	16	8	8	4	4	2	1
CW_{max}	64	32	32	16	16	8	8	4

在无线协议的建模和仿真分析领域,最经典的是 Bianchi 采用 Markov 链模型分析饱和状态下 IEEE 802.11 的 DCF 协议^[5].有很多文献对该模型进行了完善和扩展^[6-9].为适应不同业务流的 QoS 要求,IEEE 802.11 工作组在 DCF 协议的基础上进一步推出了 EDCA(enhanced distributed channel access)协议^[10],EDCA 可以为不同类型的业务提供有优先级区分的信道接入服务.Xiao^[8],毛建兵^[9]和 Tursunova^[11]等人对 EDCA 进行了建模和仿真分析.而 IEEE 802.15.6 对 QoS 的支持很大程度上借鉴了 EDCA 协议中为不同优先级类型设置不同竞争窗口值的思想.自 2007 年提出草案以来,已有一些文献对 802.15.6 的性能进行了建模分析^[12-14],大多也借鉴了 Bianchi 和 Xiao 的模型思想.但是现有文献^[8,11-14]在建模时大多假设节点 i 在退避阶段检测到信道忙的概率(即计数器冻结概率)与节点 i 传输发生冲突的概率相同.对于竞争窗口长度较大的业务流,这两个概率值之间的误差几乎可以忽略,但是对于 802.15.6 来说,竞争窗口长度可以取很小的值,见表 1,这会导致性能分析结果有很大的偏差.例如,只考虑 RAPI 阶段,并且网络中只有优先级为 0 和优先级为 7 的节点,很容易得出优先级为 0 的节点计数器冻结的概率为 0.5,而它发生冲突的概率接近 1,因此在建模时不能简单认为这两个概率相同.本文在建模过程中将这两个概率设置为两个不同的变量以区分对待,使得理论分析结果与仿真结果更加吻合.

2 时隙 CSMA/CA 接入机制建模

2.1 网络模型

假设网络采用星型拓扑,包含 n 个传感器节点和 1 个 WBAN 协调器,不考虑隐藏终端和暴露终端问题,节点访问信道的方式为时隙 CSMA/CA.与文献[5-8]类似,我们假定网络处于饱和状态,即节点在任一时隙其发送队列中均有帧等待被发送.考虑 N 个优先级类型,优先级 i 有 n_i 个节点,因此总的节点数为 $n=n_1+n_2+\dots+n_N$.本文假设每个节点只有一种优先级类型的数据.实际上,每个节点可包含多种优先级数据,节点为每种优先级数据维护一个队列,如图 2 所示,每个优先级仍然按照各自的竞争窗口进行退避,当多个优先级队列的计数器同时减到 0 时,可以通过一个虚拟处理机制在节点内部进行虚拟冲突处理,与外部冲突的处理机制相似,计数器同时减到 0 的多个优先级类型被认为发生了“冲突”,重新选择退避窗口进行退避,没有发生冲突的优先级可以接入信道传输数据.这样,每个优先级队列实际相当于一个节点.与外部冲突处理机制唯一不同的是,各个优先级的退避计数器需设置为全局变量,以便在不同优先级之间共享.由此可以认为,假设每个节点只有一种优先级类型是合理的且可以推广到实际情况.

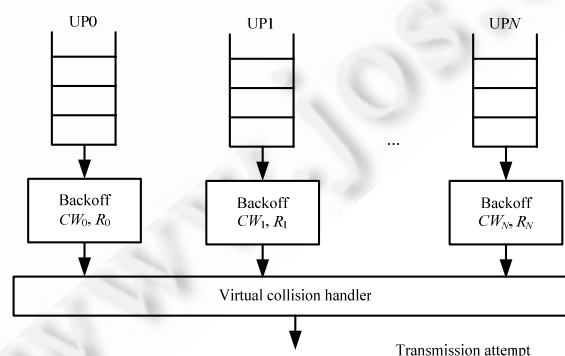


Fig.2 Virtual collision handling mechanism inside a node

图 2 节点内部优先级冲突处理机制

由于本文主要关注时隙 CSMA/CA 接入机制的性能,因此将 MAP 的长度设为 0.此外,由于 EAP2,RAP2 和 CAP 这些阶段的竞争机制与 EAP1 和 RAP1 类似,因此我们仅考虑 EAP1 和 RAP1 长度不为 0,而其他阶段长度均为 0 的情况,但是本文的研究结果可以推广到 EAP2,RAP2 和 CAP 长度不为 0 的情况.

2.2 退避过程Markov链模型

以数对 (j,k) 表示节点的状态 j 为退避阶段数 $j=0,1,\dots,R_i$,其中 R_i 表示优先级为 i 的节点**的最大重传次数, $i=0,1,\dots,N-1$; k 为退避计数器值, $k \in \{0,1,\dots,W_{i,j}\}$,其中 $W_{i,j}$ 表示优先级为 i 的节点在阶段 j 的竞争窗口长度.于是,节点的状态空间 $\Omega = \{(j,k) | j=0,1,\dots,R_i; k \in \{0,1,\dots,W_{i,j}\}; i=0,1,\dots,N-1\}$.定义 p_i 为优先级 i 的节点在退避过程中检测到信道忙的概率,即计数器被“冻结”的概率,定义 p_{bi} 为优先级 i 的节点发送失败即发生冲突的概率,定义 $s(i,t)$ 和 $b(i,t)$ 分别为描述优先级为 i 的节点在 t 时刻的退避阶段数和退避计数器值的随机过程.与 Bianchi^[4]的模型类似,我们用状态空间为 Ω 的二维 Markov 链 $\{s(i,t),b(i,t)\}$ 对 t 时刻优先级为 i 的节点状态进行建模,其状态转移情况如图 3 所示.定义以下单步状态转移概率 $P\{u,v|i,j\} \equiv P\{s(i,t+1)=u,b(i,t+1)=v | s(i,t)=j,b(i,t)=k\}$.

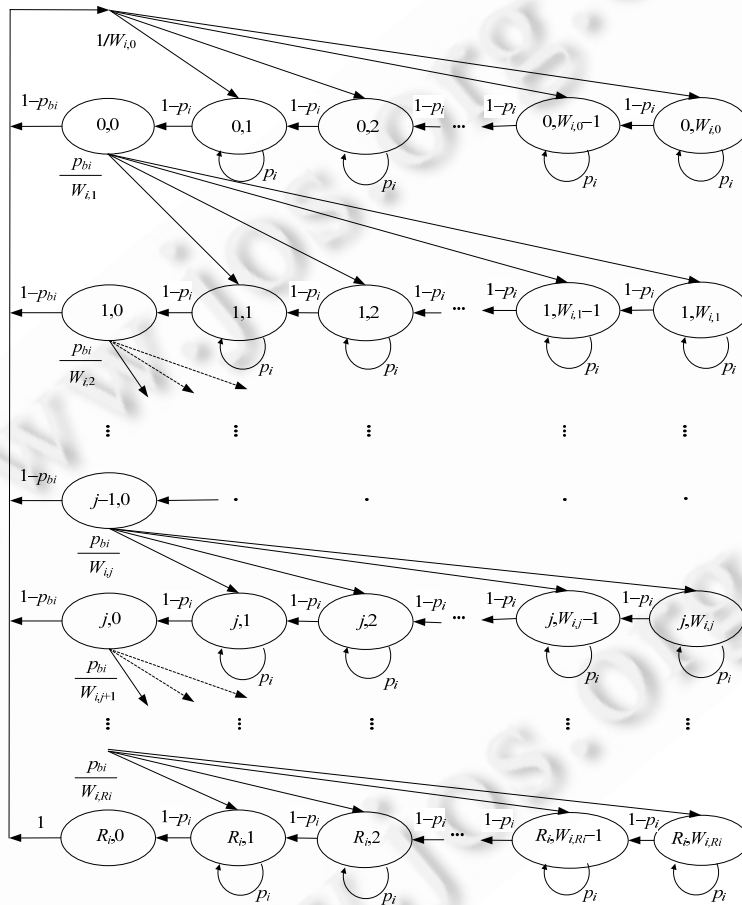


Fig.3 State transition diagram for the node of UP i
图 3 优先级为 i 的节点状态转移图

根据图 3,可以得到各状态的非零转移概率如下:

**由于我们假设每个节点只有一种优先级类型的数据,所以这里节点优先级等同于数据优先级.

$$\begin{cases} P\{(0,k)|(j,0)\} = (1-p_{bi})/W_{i,0}, & k \in [1, W_{i,0}], j \in [0, R_i] \\ P\{(0,k)|(R_i,0)\} = 1/W_{i,0}, & k \in [1, W_{i,0}] \\ P\{(j,k)|(j,k)\} = p_i, & k \in [1, W_{i,j}], j \in [0, R_i] \\ P\{(j,k)|(j,k+1)\} = 1-p_i, & k \in [0, W_{i,j}-1], j \in [0, R_i] \\ P\{(j,k)|(j-1,0)\} = p_{bi}/W_{i,j}, & k \in [1, W_{i,j}], j \in [1, R_i] \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)中,第1行表示节点在第*j*阶段传输成功后,将重置退避窗口为 $W_{i,0}$,节点传输成功的概率为 $1-p_{bi}$;第2行表示节点重传 R_i 次后无论传输成功与否,都将进入下一个第0阶段并重置退避窗口;第3行表示节点在退避阶段侦听到信道忙,计数器处于冻结状态的概率;第4行表示节点在退避阶段侦听到信道空闲,计数器减1的概率;第5行表示节点在第*j*-1阶段传输失败后,将进入第*j*阶段,重置退避窗口为 $W_{i,j}$,传输失败的概率为 p_{bi} .

2.3 系统方程及稳态概率分析

以 $b_{i,j,k}$ 表示优先级为 *i* 的节点 Markov 链模型中状态 (j,k) 的稳态概率,即 $b_{i,j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(i,t) = j, b(i,t) = k\}$. 根据 Markov 链的状态转移特性,可以得到如式(2)~式(4)所示的平衡方程:

$$b_{i,j,0} = p_{bi}^j \cdot b_{i,0,0}, \quad j \in [0, R_i] \quad (2)$$

$$b_{i,j,k} = \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot p_{bi} \cdot b_{i,j-1,0}, \quad j \in [1, R_i], k \in [1, W_{i,j}] \quad (3)$$

$$b_{i,0,k} = \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot \left((1-p_{bi}) \sum_{j=0}^{R_i-1} b_{i,j,0} + b_{i,R_i,0} \right), \quad k \in [1, W_{i,j}] \quad (4)$$

将式(2)代入式(3)得:

$$b_{i,j,k} = \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot p_{bi}^j \cdot b_{i,0,0}, \quad j \in [1, R_i], k \in [0, W_{i,j}] \quad (5)$$

将式(2)代入式(4)得:

$$\begin{aligned} b_{i,0,k} &= \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot \left((1-p_{bi}) \sum_{j=0}^{R_i-1} b_{i,j,0} + b_{i,R_i,0} \right) \\ &= \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot \left((1-p_{bi}) b_{i,0,0} \sum_{j=0}^{R_i-1} p_{bi}^j + p_{bi}^{R_i} b_{i,0,0} \right) = \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot b_{i,0,0}, \quad k \in [1, W_{i,j}] \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)和式(6)可以合并为

$$b_{i,j,k} = \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot p_{bi}^j \cdot b_{i,0,0}, \quad j \in [1, R_i], k \in [1, W_{i,j}] \quad (7)$$

这样,通过式(2)和式(7),所有状态的稳态概率均可以用 $b_{i,0,0}$ 进行表示.由于所有状态的稳态概率之和为1,于是有:

$$\sum_{j=0}^{R_i} \sum_{k=0}^{W_{i,j}} b_{i,j,k} = 1 \quad (8)$$

将式(2)和式(7)代入式(8):

$$\sum_{j=0}^{R_i} \left(\sum_{k=1}^{W_{i,j}} \frac{W_{i,j} + 1 - k}{W_{i,j}(1-p_i)} \cdot p_{bi}^j \cdot b_{i,0,0} + p_{bi}^j \cdot b_{i,0,0} \right) = \sum_{j=0}^{R_i} p_{bi}^j \cdot b_{i,0,0} \cdot \left(\frac{W_{i,j} + 1}{2(1-p_i)} + 1 \right) = 1,$$

解得:

$$b_{i,0,0} = \frac{2(1-p_i)}{\sum_{j=0}^{R_i} (W_{i,j} + 3 - 2p_i) p_{bi}^j} \quad (9)$$

令 τ_i 表示优先级为 *i* 的节点在某个时隙发起传输的概率.只有当退避计数器值为0时,节点才可能发起传输,因此, τ_i 可以表示为

$$\tau_i = \sum_{j=0}^{R_i} b_{i,j,0} = \frac{1-p_{bi}^{R_i+1}}{1-p_{bi}} \cdot b_{i,0,0} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)可得:

$$\tau_i = \frac{2(1-p_{bi}^{R_i+1})(1-p_i)}{(1-p_{bi}) \sum_{j=0}^{R_i} (W_{i,j} + 3 - 2p_i) p_{bi}^j} \quad (11)$$

令 $n_i(i=0, \dots, N-1)$ 表示优先级为 i 的节点数量. 在 RAP 中, 所有优先级类型都可以竞争信道, 而在 EAP 中, 只有优先级 7 可以竞争信道, 因此我们将这两个阶段分开计算. 首先考虑 RAP 阶段, 优先级为 i 的节点在回退阶段检测到信道忙的情况是除当前节点外其余节点至少有一个正在发送帧, 其概率 p_i 可表示为

$$p_i = 1 - (1-\tau_i)^{n_i-1} \prod_{h=0, h \neq i}^{N-1} (1-\tau_h)^{n_h} \quad (12)$$

优先级为 i 的节点发生冲突表明, 除 i 节点外至少有一个节点退避计数器同时减为 0, 可以推断它们在前一个时隙必为空闲 (否则计数器不会减到 0), 那么发生冲突的概率为除 i 节点外, 其他至少有一个节点在不处于发送状态的条件下, 处于计数器值为 1 状态的概率, 表达式如下:

$$p_{bi} = 1 - \prod_{h=0, h \neq i}^N \left(1 - \frac{\tau_h}{(1-p_h)(1-\tau_h)} \right)^{n_h} \quad (13)$$

联立式(11)~式(13), 由于 $W_{i,j}$ 和 R_i 已知, 因此有 $3N$ 个变量且对应 $3N$ 个等式, 可以解出任意优先级 i 的节点对应的 τ_i, p_i 和 p_{bi} .

在 EAP 中, 只有优先级为 7 的节点可以竞争信道, 令该阶段节点的发送概率、回退阶段检测到信道忙的概率和冲突概率分别为 τ_7^E, p_7^E 和 p_{b7}^E , 式(11)~式(13)可以改写为

$$\tau_7^E = \frac{2(1-(p_{b7}^E)^{R_7+1})(1-p_7^E)}{(1-p_{b7}^E) \sum_{j=0}^{R_7} (W_{7,j} + 3 - 2p_7^E) (p_{b7}^E)^j} \quad (14)$$

$$p_7^E = 1 - (1-\tau_7^E)^{n_7-1} \quad (15)$$

$$p_{b7}^E = 1 - \left(1 - \frac{\tau_7^E}{(1-p_7^E)(1-\tau_7^E)} \right)^{n_7-1} \quad (16)$$

联立式(14)~式(16), 可以解出 τ_7^E, p_7^E 和 p_{b7}^E .

3 性能分析

本节将利用第 2 节的结果, 推导出每种优先级类型的饱和吞吐量、成功收包率和延迟性能的表达式.

3.1 饱和吞吐量

对于饱和系统, 每个优先级的发送队列中始终有数据在等待发送, 用 T 表示信道上连续两次传输结束之间的时间间隔, 包括前一次传输结束后信道空闲时间和信道上再次出现节点传输所致的信道忙时间 (包括发送时间和冲突时间). 以 T_i 表示一个周期 T 内有效数据传输占用的时间长度. 于是, 优先级 i 的归一化吞吐量 S_i 定义为节点成功传输负载部分的时间 T_i 占总时间 T 的比率. 首先考虑 RAP 阶段, 所有优先级都可以竞争信道. 令 $p_{s,i}$ 表示在任意时隙优先级为 i 节点传输成功的概率, p_s 表示在任意时隙任意节点传输成功的概率, p_{idle} 表示任意时隙信道空闲的概率, 那么 $p_{s,i}, p_s$ 和 p_{idle} 的表达式为

$$p_{s,i} = n_i \tau_i (1-p_{bi}) \quad (17)$$

$$p_s = \sum_{i=0}^{N-1} p_{s,i} \quad (18)$$

$$p_{idle} = \prod_{h=0}^{N-1} (1 - \tau_h)^{n_h} \quad (19)$$

令 δ, T_L, T_s 和 T_c 分别表示一个空闲时隙长度、长度为 L 的负载发送时间、物理层协议数据单元(包括物理层前导码,物理层头部,MAC 头部和尾部校验及负载,如图 4 所示)的发送时间和发生冲突的信道占用时间.那么 RAP 阶段优先级 i 节点的吞吐量 S_i^R 为

$$S_i^R = \frac{E(T_i)}{E(T)} = \frac{p_{s,i} T_L}{p_{idle} \delta + p_s T_s + (1 - p_{idle} - p_s) T_c} \quad (20)$$

$$T_s = T_H + T_L + T_{SIFS} + T_{ACK} \quad (21)$$

$$T_c = T_H + T_L + T_{SIFS} + T_{ACK} + T_{time_out} \quad (22)$$

其中, T_H 为物理层前导码、物理层头部和 MAC 头部的发送时间, T_{SIFS}, T_{ACK} 和 T_{time_out} 分别为 SIFS、发送 ACK 和 ACK 超时占用的时间.

PHY preamble	PHY header	MAC header	MAC frame body	FCS
--------------	------------	------------	----------------	-----

Fig.4 PPDU format

图 4 物理层协议数据单元格式

在 EAP 阶段,只有优先级 7 可以竞争信道,因此对应的成功发送概率 $p_{s,7}^E$ 、信道空闲的概率 p_{idle}^E 和优先级 7 的吞吐量 S_7^E 分别为

$$p_{s,7}^E = n_7 \tau_7 (1 - \tau_7)^{n_7 - 1} \quad (23)$$

$$p_{idle}^E = (1 - \tau_7)^{n_7} \quad (24)$$

$$S_7^E = \frac{p_{s,7}^E T_L}{p_{idle}^E \delta + p_{s,7}^E T_s + (1 - p_{idle}^E - p_{s,7}^E) T_c} \quad (25)$$

令 T_{RAP} 和 T_{EAP} 分别为 EAP 和 RAP 的时间长度,那么,总的吞吐量可表示为

$$S_i = \frac{T_{RAP}}{T_{EAP} + T_{RAP}} S_i^R, \quad i = 0, 1, \dots, 6 \quad (26)$$

$$S_7 = \frac{T_{RAP}}{T_{EAP} + T_{RAP}} S_7^R + \frac{T_{EAP}}{T_{EAP} + T_{RAP}} S_7^E \quad (27)$$

3.2 成功收包率

令 $p_{i,suc}$ 表示优先级 i 节点的成功收包率.在 RAP 阶段,所有优先级类型的节点都可以竞争信道,而在 EAP 阶段,只有优先级为 7 的节点才能接入信道,因此 $p_{i,suc}$ 的表达式为

$$p_{i,suc} = \sum_{j=0}^{R_i} p_{bi}^j (1 - p_{bi}) = 1 - p_{bi}^{R_i + 1}, \quad i = 0, 1, \dots, 6 \quad (28)$$

$$p_{7,suc} = \left(\tau_7 T_{RAP} (1 - p_{b7}^{R_7 + 1}) + \tau_7^E T_{EAP} \left(1 - (p_{b7}^E)^{R_7 + 1} \right) \right) / \left(\tau_7 T_{RAP} + \tau_7^E T_{EAP} \right) \quad (29)$$

3.3 饱和延迟

定义饱和延迟 T_p 为两个成功收到的数据包之间的时间间隔,假设优先级为 i 的节点传输 V 个数据包的总时间为 $T_i(V)$,那么优先级 i 的吞吐量可表示为

$$S_i = VT_p / T_i(V) \quad (30)$$

于是,优先级 i 的饱和延迟可表示为

$$D_i = T_i(V) / V = T_p / S_i \quad (31)$$

4 仿真实验

为了验证上述模型和分析的正确性,采用 C++编写了仿真程序,参照 IEEE 802.15.6 标准^[3]进行了参数设置,具体参数见表 2.首先我们考虑的网络场景是 1 个 WBAN 协调器和 8 个不同优先级类型节点组成的星型拓扑,各个优先级类型的竞争窗口长度见表 1.每个信标周期中除 EAP1 和 RAP1 不为 0 外,其余阶段长度均为 0.物理层协议数据单元(physical layer protocol data unit,简称 PDU)格式如图 4 所示.根据式(21)和式(22)、图 4 和表 2,很容易计算得到 T_L , T_s 和 T_c .

Table 2 Simulation parameters

表 2 仿真参数设置

Parameters	Values	Parameters	Values
PHY preamble	90bits	Data rate	242.9kbps
PHY header	31bits	ACK payload	3bytes
MAC header	7bytes	ACK timeout	30 μ s
Data payload	100bytes	SIFS	75 μ s
FCS	2bytes	Slot time	145 μ s
Symbol rate	600ksps	Retry limit	2 for UP \leq 5, 4 for UP \geq 6

表 3 显示,当 EAP1=RAP1=0.5s 时,按照表 2 设置参数得到的 UP0~UP7 优先级节点的吞吐量、成功收包率和延迟这 3 个性能指标的理论分析与仿真结果;表 4 显示了 EAP1=0.1s, RAP=0.5s 时相应的结果,其他参数保持不变.从表 3 和表 4 可以看出,仿真结果与理论分析结果非常接近,验证了模型分析的准确性.

Table 3 Analysis and simulation results for throughput, successful packet delivery ratio and delay, EAP1=RAP1=0.5s

表 3 EAP1=RAP1=0.5s 时,吞吐量、成功收包率和延迟的理论分析与仿真结果

UP	Throughput		Success probability		Delay (s)	
	Analytical	Simulation	Analytical	Simulation	Analytical	Simulation
0	0.001 548 11	0.001 710 72	0.134 243	0.138 825	2.127 45	1.928 85
1	0.001 548 11	0.001 648 68	0.134 243	0.133 348	2.127 45	2.001 05
2	0.003 262 94	0.003 532 98	0.147 008	0.148 959	1.009 37	0.933 946
3	0.003 262 94	0.003 581 82	0.147 008	0.151 056	1.009 37	0.921 259
4	0.007 317 67	0.007 687 68	0.176 689	0.174 095	0.450 079	0.429 241
5	0.007 317 67	0.007 782 72	0.176 689	0.176 131	0.450 079	0.423 990
6	0.011 137 6	0.012 020 6	0.313 373	0.317 759	0.295 714	0.274 516
7	0.413 561 5	0.416 895	0.844 627	0.878 675	0.007 963 83	0.007 915 66

Table 4 Analysis and simulation results for throughput, successful packet delivery ratio and delay, EAP1=0.1s, RAP1=0.5s

表 4 EAP1=0.1s, RAP1=0.5s 时,吞吐量、成功收包率和延迟的理论分析与仿真结果

UP	Throughput		Success probability		Delay (s)	
	Analytical	Simulation	Analytical	Simulation	Analytical	Simulation
0	0.002 580 19	0.002 843 94	0.134 243	0.137 787	1.276 47	1.159 74
1	0.002 580 19	0.002 846 58	0.134 243	0.137 906	1.276 47	1.159 23
2	0.005 438 23	0.005 879 94	0.147 008	0.148 439	0.605 626	0.561 086
3	0.005 438 23	0.005 831 1	0.147 008	0.149 176	0.605 626	0.565 849
4	0.012 196 1	0.012 902 3	0.176 689	0.174 523	0.270 047	0.255 76
5	0.012 196 1	0.012 868 7	0.176 689	0.176 815	0.270 047	0.256 423
6	0.018 562 6	0.019 868 6	0.316 337	0.314 757	0.177 428	0.166 082
7	0.191 023	0.193 157	0.678 765	0.683 118	0.017 241 5	0.017 084 6

图 5 和图 6 进一步给出了吞吐量、成功收包率和延迟随节点数量增加的变化情况,为消除不同重传次数的影响,仿真中设置所有优先级的最大重传次数均为 7,图 5 中 EAP1=RAP1=0.5s,图 6 中 EAP1=0.1s, RAP1=0.5s,其他仿真参数与表 2 一致.两种场景设置下,模型分析结果和仿真结果均取得了非常好的一致性.

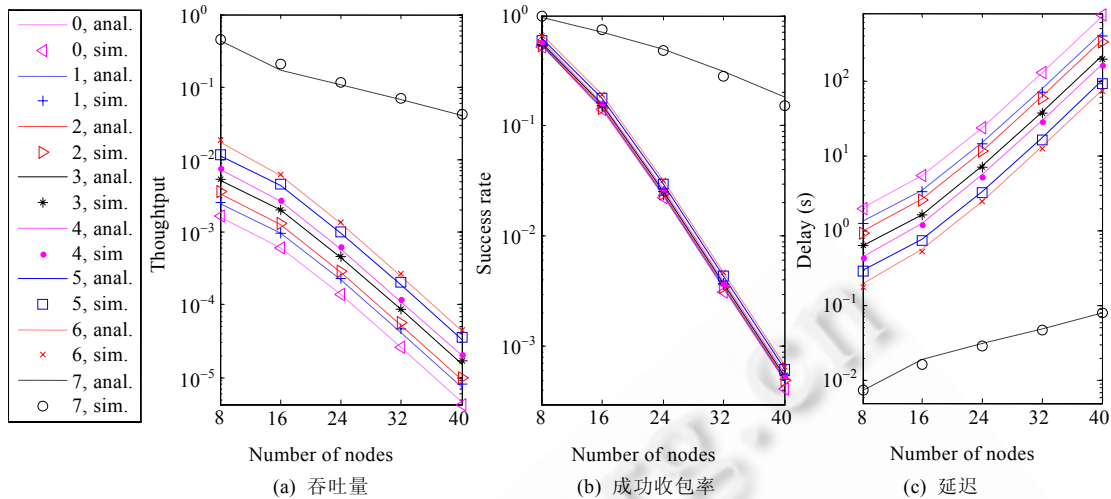


Fig.5 Comparison of analysis and simulation results for throughput, successful packet delivery ratio and delay vs. the number of nodes, EAP1=RAP1=0.5s

图 5 吞吐量、成功收包率和延迟随节点数量的变化情况,理论与仿真结果比较,EAP1=RAP1=0.5s

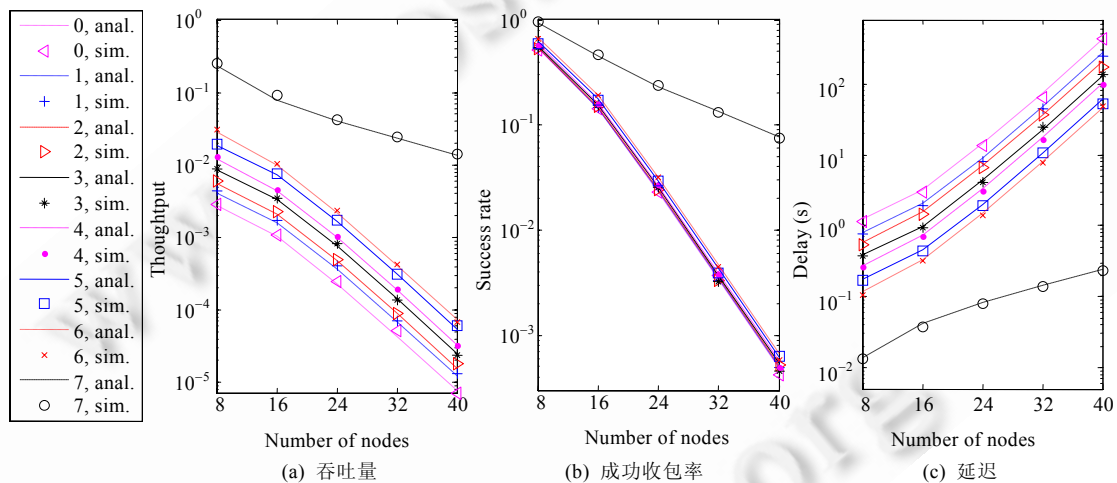


Fig.6 Comparison of analysis and simulation results for throughput, successful packet delivery ratio and delay vs. the number of nodes, EAP1=0.1s, RAP1=0.5s

图 6 吞吐量、成功收包率和延迟随节点数量的变化情况,理论与仿真结果比较,EAP1=0.1s, RAP1=0.5s

从图 5 和图 6 可以看出,较高优先级的节点拥有较大的吞吐量、成功收包率和较小的延迟.从图 5(a)和图 6(a)的吞吐量性能看,随着网络中节点数量的增加,UP0~UP6 的吞吐量下降得越来越急剧,这是由于随着节点数量的增加,节点传输发生碰撞的概率增大,导致信道利用率降低,因而吞吐量减小.而 UP7 的吞吐量下降幅度最缓慢,这是由于最高优先级的节点不但竞争窗口较小,而且在 EAP 阶段仍然可以竞争信道,接入信道的概率远大于其他优先级.此外,图 6(b)、图 6(c)和图 7(b)、图 7(c)的结果表明,高优先级除了可以获得更大的吞吐量外,在成功收包率和延迟方面也占据优势.最高优先级由于其竞争窗口和 EAP 独占阶段的双重优势,使得它接入信道的能力远远大于其他优先级,说明在饱和状态下最高优先级会抢占信道资源,一定程度上造成其他优先级的资源短缺.

5 结束语

针对 IEEE 802.15.6 支持 QoS 优先级区分的时隙 CSMA/CA 机制,用 Markov 链进行了建模.通过模型分析,获得系统中各优先级传输的饱和吞吐量、成功收包率和饱和延迟等性能分析.与已有文献中所提建模不同的是,我们的模型分析将退避过程中监听到信道忙的概率与传输发生冲突的概率区分为两个变量分别对待.仿真验证结果表明,模型分析结果和仿真结果取得了很好的一致性.通过研究我们发现,IEEE 802.15.6 的时隙 CSMA/CA 机制所提供的区分信道接入机制可以为系统中不同优先级的业务提供有效的服务区分,在饱和状态下,最高优先级抢占信道的能力远大于其他优先级,这意味着紧急数据的传输能得到有效保证,但会造成其他优先级资源短缺和性能的下降.本文的分析结果对于今后分析非饱和状态下的系统性能和设计自适应的接入控制策略具有重要的理论参考价值.

References:

- [1] Chen M, Gonzalez S, Vasilakos A, Cao H, Leung VC. Body area networks: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 2011, 16(2):171–193.
- [2] Latre B, Braem B, Moerman I, Blondia C, Demeester P. A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks*, 2011, 17(1): 1–18.
- [3] Gong JB, Wang R, Cui L. Research advances and challenges of body sensor network (BSN). *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(5):737–753 (in Chinese with English abstract).
- [4] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.6. *Wireless Body Area Networks*. New York: IEEE Computer Society, 2012.
- [5] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3):535–547.
- [6] Ziouva E, Antonakopoulos T. CSMA/CA performance under high traffic conditions: Throughput and delay analysis. *Computer Communications*, 2002, 25(3):313–321.
- [7] Zhu YH, Xu H, Peng J. Two-Step backoff algorithm for IEEE 802.11 based wireless networks. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11):2575–2581 (in Chinese with English abstract).
- [8] Xiao Y. Performance analysis of priority schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(4):1506–1515.
- [9] Mao JB, Mao YM, Leng SP, Bai X. Performance optimization for IEEE 802.11 with QoS differentiation supporting. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010, 21(11):2866–2882 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3682.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03682]
- [10] IEEE 802.11. *Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications*. IEEE Std. 802.11, 2007.
- [11] Tursunova S, Kim Y. Realistic IEEE 802.11e EDCA model for QoS-aware mobile cloud service provisioning. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2012, 58(1):60–68.
- [12] Rashwand S, Mistic J, Khazaei H. Performance analysis of IEEE 802.15.6 under saturation condition and error-prone channel. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*. Cancun: IEEE, 2011. 1167–1172. [doi: 10.1109/WCNC.2011.5779296]
- [13] Rashwand S, Mistic J, Khazaei H. IEEE 802.15.6 under saturation: Some problems to be expected. *Journal of Communications and Networks*, 2011, 13(2):142–148.
- [14] Rashwand S, Mistic J. Effects of access phases lengths on performance of IEEE 802.15.6 CSMA/CA. *Computer Networks*, 2012, 56(12):2832–2846.

附中文参考文献:

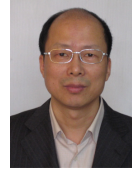
- [3] 宫继兵,王睿,崔莉.体域网 BSN 的研究进展及面临的挑战. *计算机研究与发展*, 2010, 47(5):737–753.
- [7] 朱艺华,徐晖,彭静. IEEE 802.11 无线网络的两步指数退避算法. *电子与信息学报*, 2011, 33(11):2575–2581.

- [9] 毛建兵,毛玉明,冷甦鹏,白翔.IEEE 802.11 支持 QoS 区分服务的性能优化.软件学报,2010,21(11):2866-2882. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3682.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03682]



李燕君(1982-),女,江苏南通人,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线网络的协议与算法.

E-mail: yjli@zjut.edu.cn



朱艺华(1961-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为移动计算,无线网络协议.

E-mail: yhzhu@zjut.edu.cn



邵剑集(1991-),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究领域为无线网络协议,算法仿真.

E-mail: shaojianji@126.com

www.jos.org.cn