

一种用于提高 802.15.4 网络性能的区别服务模型

蔡雅平 白光伟

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)

摘要 IEEE802.15.4 作为低速率、低功耗的无线传感器网络标准,其媒体接入控制(MAC)协议的竞争接入时段(CAP)对所有数据帧和节点都采用相同的竞争参数,不能为某些需要服务区分的应用提供很好的服务。针对这一问题,提出了一种基于区别服务的改进 IEEE802.15.4 机制以支持高 QoS 要求。该机制的主要思想是根据服务质量要求(时延及吞吐量)为不同的数据流分配不同的优先级,对不同优先级数据设置不同的数据帧长度和竞争参数来达到区别服务的目的。与此同时提出一种区别服务的不饱和马尔科夫链模型来分析所提出的机制。该模型评估了采用此简单但有效的区别服务机制后两种优先级数据的信道接入概率、吞吐量、时延及能耗等性能。分析结果表明,此模型对区别服务起到了很好的效果。

关键词 IEEE 802.15.4, 竞争接入时段, 马尔可夫链模型, 区别服务

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Service Differentiation Model for Performance Enhancement of 802.15.4 Sensor Networks

CAI Ya-ping BAI Guang-wei

(Dept. of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract IEEE802.15.4 is one of the standards for a low rate, low power consumption wireless sensor networks. By assigning the same sets of contention access parameters for all data frames and nodes, the contention access period (CAP) of the slotted IEEE 802.15.4 medium access control(MAC) currently provides a priority-independent channel access functionality and no service differentiation. To solve this problem, this paper proposed a differentiated service mechanism to support high IEEE802.15.4 QoS requirements. The main idea of the mechanism is allowing different sets of access parameters and data frame lengths for different priority classes, we developed a Markov-chain-based analytical model of the CAP of the IEEE 802.15.4 MAC with service differentiation, under unsaturated traffic conditions. In particular, given two priority classes, our analytical model was used to evaluate the performance of a simple and effective service differentiation strategy, in terms of throughput, average frame service time, energy consumption, as well as access probability for each class. Our analysis results show that this model for differentiated services performs well.

Keywords IEEE 802.15.4, CAP, Markov chain model, Service differentiation

无线传感器网络(WSNs)是由部署在监测区域内的大量廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织网络系统。无线传感器网络的应用前景非常广阔,能够广泛应用于军事、环境监测和预报、健康护理、智能家居、建筑物状态监控、城市交通以及机场、大型工业园区的安全监测等领域^[1]。由 IEEE LAN/MAN 标准委员会认可的,旨在为简单低成本的短程通信网络提供通用平台,适合于能量、体积及计算能力限制较大但吞吐量要求不高的无线连接场合的低速无线个人局域网(LR-WPAN)协议 802.15.4 成为最适合传感器网络的标准^[2]。近年来,传感器网络受到越来越多的关注,特别是信标使能模式下的竞争访问时段(CAP)新颖的时槽接入协议吸引了更多的关注。早些时候,低速无线个域网的发展还主要集中在仿真和实验阶段^[3-6]。

从 2004 年开始,关于 IEEE802.15.4 理论的研究开始逐步出现,部分学者采用更多的数学手段估计低速无线个域网的性能(特别是信标使能模式下 CAP 时段的性能),从而产生了两种主要的模型分析方法。第一种是基于 Bianchi 在文献[7]中提出的针对 IEEE802.11 CSMA 算法的马尔可夫链模型改进后的关于 IEEE 802.15.14 的模型。文献[8]就是这种类型的代表。该作者修改了 Bianchi 的模型,使其适合基于时槽的 IEEE 802.15.4 竞争访问时段。第二种建模方法是文献[9]中提出的对节点和信道状态分别建模的马尔科夫链模型;节点状态链确定了每个节点在不同状态下消耗的时间;信道状态链可以用来估算网络的吞吐量。以上这些文献模型都不适合有些需要区别服务的情况。有的传感器网络需要服务区分使某些节点拥有更高的吞吐量和更少的时延(如警报或人体

到稿日期:2010-09-06 返修日期:2010-12-04 本文受国家自然科学基金项目(60673185,61073197),江苏省自然科学基金项目(BK2010548),教育部留学回国人员科研启动基金项目(教外司留[2007]1108号)资助。

蔡雅平(1985-),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络、IEEE802.15.4 协议性能分析与评价等,E-mail:435120550@qq.com;白光伟(1961-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为无线传感器网络、网络体系结构和协议、网络系统性能分析、评价等。

传感器中的紧急报警)。文献[10]在文献[9]的基础上,采用优先级思想,对高优先级信号只进行了一次空闲信道评估(clear channel assessment, CCA),对低优先级数据信号进行了两次 CCA 检测,从而达到区分服务的目的。文献[11]与文献[10]方法一样,只是模型不同。文献[12]针对不同长度的数据帧,改变第二次 CCA 检测机制实现服务区分。

本文在文献[9,10]模型的基础上,引入优先级处理思想,把数据帧分为两种优先级(高优先级和低优先级),分别对这两种数据帧进行建模分析。

本文第1节分析 IEEE 802.15.4 MAC 协议以及时槽 CSMA-CA 算法;第2节提出基于服务区分的 IEEE802.15.4 分析模型;第3节对模型的性能进行分析与评价;最后总结全文。

1 IEEE802.15.4 CSMA/CA 信道接入机制

IEEE802.15.4 标准 MAC 协议定义了信标使能网络的超帧结构、参数设置和信道接入过程。具体的参数设置和信道竞争过程见文献[13]。一个完整的超帧结构如图1所示。

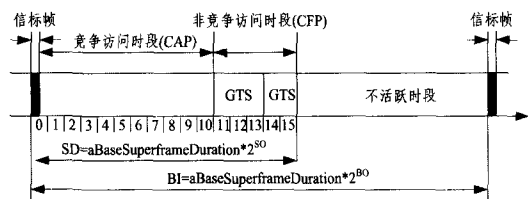


图1 超帧结构

超帧将通信时间划分为活跃期(active)和非活跃期(inactive)两个部分。在活跃期,协调器负责组织维持该网络,各设备间可进行数据通信;而在非活跃期,协调器和普通设备可以进入低功耗模式,网络中各设备不进行数据传输。

信标间隔周期 BI (beacon interval) 定义为两个连续信标帧之间的时间间隔,其时间长度可以通过信标指数 BO (macBeaconorder) 进行控制;活跃期间长度 SD (SuperframeDuration) 可以通过超帧指数 SO (macSuperframeorder) 进行控制。

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO}, 0 \leq BO \leq 14$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO}, 0 \leq SO \leq BO \leq 14$$

式中, $aBaseSuperframeDuration = 960\text{symbols}$ 或者 15.36ms 。

超帧的活跃期又被分为 16 个时间间隔相等的时槽,每个时槽持续 20 symbol (320 us), 编号 0-15。0 号时槽用于发送 Beacon。之后是一系列竞争时槽,它们组成了 CAP (contention access period)。CAP 时期的信道访问使用间隙 CSMA-CA 机制, CAP 之后是一系列 GTS (guaranteed time slot), 它们组成了 CFP (contention free Period)。GTS 是预先分配给某些节点的, 这些节点访问自己的 GTS 不需要竞争信道, GTS 通常被分配给那些据有固定速率的节点。可以根据具体应用决定是否在超帧活动期中使用 GTS。

在信标使能的通信网络中, PAN 网络协调器定时广播信标帧。信标帧表示帧的开始。设备之间通信使用基于时槽的 CSMA-CA 信道访问机制, PAN 网络中的设备都通过协调器发送的信标帧进行同步。在时槽 CSMA/CA 机制下, 每当设备需要发送数据帧或命令帧时, 它首先定位下一个时槽的边

界, 初始化后退次数 NB (number of backoffs) 为 0, 后退指数 BE (backoff exponent) 设置为 macMinBE (默认值为 3), 竞争窗口 CW (content window length) 设置为 2。然后等待随机数目 $[0, 2^{BE} - 1]$ 个时槽。等待完毕后, 设备执行第一次空闲信道评估操作, 检测信道是否空闲: 如果信道空闲, CW 的值减 1, 进行第二次信道空闲评估, 直到 CW 等于 0, 节点竞争信道成功, 发送数据帧; 如果信道忙, 则 NB 和 BE 的值加 1 (BE 的值不能超过 amaxBE (默认值为 5)), CW 的值重置为 2。如果 NB 的值小于或等于最大退避次数 (macMAXCSMABackoffs, 默认值为 5), 设备需要重新等待随机数目个时槽, 再检查信道状态, 重复这个过程直到有空闲信道出现, 否则信道接入失败, 算法终止。MAC 子层向上层报告失败信息。

2 分析模型

文献[9]精确地为 802.15.4 协议 CAP 时段进行了建模, 但是该模型没有区分服务的功能。本小节将文献[8]的模型扩展为两个节点状态链模型, 其对应两种优先级分类——高优先级和低优先级及一个信道状态链模型。通过改变 CSMA-CA 算法的参数 (NB, BE 或者 CW) 来达到区分服务的目的。在这里, 我们通过改变后退次数 NB 来实现服务区分。高优先级节点的后退次数 NB 设置为 1, 低优先级节点的 NB 为默认值 5, 其它的参数都为默认值。我们考虑的是一个单跳星型无线网络, 由一个网络协调器、M1 个高优先级节点和 M2 个低优先级节点组成。

2.1 模型假定

假定本文的模型与文献[9]中的相同。假定: (1) 所有的节点通过协调器发送的信标帧完全时间同步并且每个节点都在其他节点通信范围之内 (没有隐蔽站问题); (2) 节点不进入睡眠状态, 整个超帧时间都是活跃时期。因为数据包必须在超帧剩余时槽里完成发送, 如果时槽不够必须等到下一个超帧发送, 所以本文假定超帧时间足够长 ($BO = SO = 6$), 以近似 CSMA-CA 机制; (3) 节点的优先级一旦确定, 在整个分析过程中就不再更改; (4) 超帧整个活跃时期都分配给 CAP, 不考虑超帧中有 CFP 的情况; (5) 本文只考虑直接传输并且将协调器配置成不需要对收到的数据包做出应答。两种优先级数据包的时槽长度固定为 N1 和 N2。

为了方便起见, 所有信道状态的概率用上标 C 表示, 节点状态的概率用上标 n 表示。q 表示节点优先级分类, 取值 1 或 2, 1 为高优先级, 2 为低优先级。

2.2 节点状态模型

图2和图3分别对应分类1和分类2节点的马尔科夫模型。

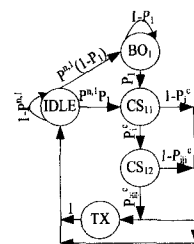


图2 高优先级(分类1)节点的马尔科夫链模型

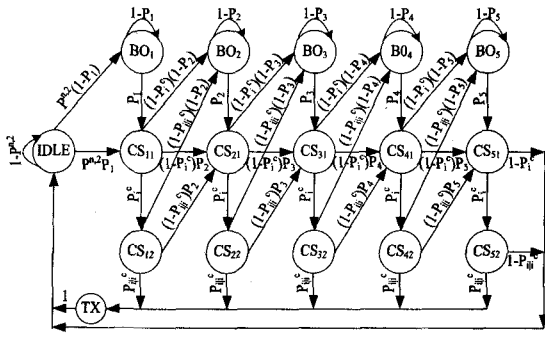


图3 高优先级(分类2)节点的马尔科夫链模型

q 类型节点没有数据包要发送时处在空闲(IDLE)状态并一直停留在此状态,直到概率 $p^{n,q} = \lambda q / Nq$ 。收到数据包后需要发送出去。 λq 表示 q 类节点的数据包投递率, Nq 为 q 类节点发送成功所需的时槽个数,即数据帧的长度。当节点有数据包要发送时,此节点就进入随即退避阶段 BO_1 (第一次退避尝试)。因为退避指数 $BE=3$,所以第一次退避阶段 BO_1 在 0 到 $2^{BE}-1=7$ 之间随机选择一个数作为退避计数器的值进行退避。选择某个数的概率用 p_1 表示, $p_1=1/4.5$ (具体参考文献[9])。离开 BO_1 状态(退避计数器退到 0)节点则进入 CS_{11} 状态,对应于两次 CCA 检测中的第一次。第一次 CCA 检测信道为空闲的概率为 p_i , 忙的概率为 $(1-p_i)$ 。如果信道空闲,则在下一时槽进入 CS_{12} 状态进行第二次 CCA 检测。第二次 CCA 检测信道依然空闲的概率为 p_{i1} , 忙的概率为 $(1-p_{i1})$ 。如果两次检测都空闲,节点就会进入发送(TX)阶段,并会持续 Nq 个退避时槽。一旦发送结束,节点以概率 1 从 TX 状态回到空闲状态。分类 1 的节点只进行一次退避,只有分类 2 的节点在第一次退避结束后检测到信道不空闲才会进入下一退避阶段。第二次退避阶段 BO_2 重复第一次的退避和信道检测过程,只是退避参数 p_1 用 p_2 代替。 $p_2=1/8.5$, 对应于第二次退避时的退避指数 $BE=4$ 。 $BO_i (1 \leq i \leq 5)$ 表示低优先级节点第 i 次退避,相应的 CS_{ij} 则表示第 i 次退避阶段的第 $j (1 \leq j \leq 2)$ 次侦听信道。因为在 $BO_i (3 \leq i \leq 5)$ 阶段, $BE=5$, 所以 $p_3=p_4=p_5=1/16.5$ [8]。

由马尔科夫链的相关性质可得:

对于分类 1, 有:

$$\begin{aligned} \pi(idle) &= (1-p^{n,1})\pi(idle) + \pi(tx) + (1-p_i^c)\pi(cs_{11}) + \\ & \quad (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{12}) \\ \pi(bo_1) &= (1-p_1)[p^{n,1}\pi(idle) + \pi(bo_1)] \\ \pi(cs_{11}) &= p_1[p^{n,1}\pi(idle) + \pi(bo_1)] \\ \pi(cs_{12}) &= p_i^c\pi(cs_{11}) \\ \pi(idle) + \pi(tx) + \pi(bo_1) + \pi(cs_{11}) + \pi(cs_{12}) &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

对于分类 2, 有:

$$\begin{aligned} \pi(idle) &= (1-p^{n,2})\pi(idle) + \pi(tx) + (1-p_i^c)\pi(cs_{51}) + \\ & \quad (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{52}) \\ \pi(bo_1) &= (1-p_1)[p^{n,2}\pi(idle) + \pi(bo_1)] \\ \pi(cs_{11}) &= p_1[p^{n,2}\pi(idle) + \pi(bo_1)] \\ \pi(cs_{12}) &= p_i^c\pi(cs_{11}) \\ \pi(bo_2) &= (1-p_2)[(1-p_i^c)\pi(cs_{11}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{12}) + \pi(bo_2)] \\ \pi(cs_{21}) &= p_2[(1-p_i^c)\pi(cs_{11}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{12}) + \pi(bo_2)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi(cs_{22}) &= p_i^c\pi(cs_{21}) \\ \pi(bo_3) &= (1-p_3)[(1-p_i^c)\pi(cs_{21}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{22}) + \pi(bo_3)] \\ \pi(cs_{31}) &= p_3[(1-p_i^c)\pi(cs_{21}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{22}) + \pi(bo_3)] \\ \pi(cs_{32}) &= p_i^c\pi(cs_{31}) \\ \pi(bo_4) &= (1-p_4)[(1-p_i^c)\pi(cs_{31}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{32}) + \pi(bo_4)] \\ \pi(cs_{41}) &= p_4[(1-p_i^c)\pi(cs_{31}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{32}) + \pi(bo_4)] \\ \pi(cs_{42}) &= p_i^c\pi(cs_{41}) \\ \pi(bo_5) &= (1-p_5)[(1-p_i^c)\pi(cs_{41}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{42}) + \pi(bo_5)] \\ \pi(cs_{51}) &= p_5[(1-p_i^c)\pi(cs_{41}) + (1-p_{i1}^c)\pi(cs_{42}) + \pi(bo_5)] \\ \pi(cs_{52}) &= p_i^c\pi(cs_{51}) \\ \pi(idle) + \pi(tx) + \sum_{i=1}^5 [\pi(bo_i) + \pi(cs_{i1}) + \pi(cs_{i2})] &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

令 $p_i^{n,q}$ 表示分类 1 和分类 2 在某个时槽开始发送数据包的概率。由图 2 和图 3 可知, 节点只有在某个退避阶段最后一次 CCA 检测发现信道空闲时才会发送数据包, 因此:

$$p_i^{n,1} = \frac{\pi_{CS_{12}}^{n,1}}{1 + (N_1 - 1)\pi_{tx}^{n,1} p_{i1}^c} \quad (3)$$

$$p_i^{n,2} = \frac{\sum_{i=1}^5 \pi_{CS_{i2}}^{n,2}}{1 + (N_2 - 1)\pi_{tx}^{n,2} p_{i1}^c} \quad (4)$$

式中, $\pi_{CS_{12}}^{n,1}$, $\pi_{tx}^{n,1}$ 和 $\pi_{CS_{i2}}^{n,2}$, $\pi_{tx}^{n,2}$ 分别表示 1 类和 2 类节点进入 CS_{i2} (1 类节点, $i=1; 2$ 类节点, $1 \leq i \leq 5$) 和 TX 状态的比例。

2.3 信道状态模型

信道的运转情况可用图 4 所示的离散马尔科夫链模型表示。

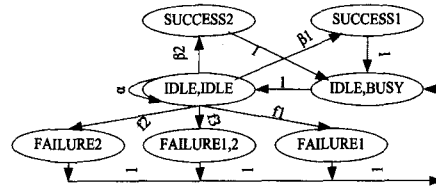


图4 信道马尔科夫链模型

当前时槽信道空闲有两种情况: (IDLE, BUSY) 和 (IDLE, IDLE)。其中 (IDLE, BUSY) 状态表示前一退避时槽忙而当前时槽空闲, (IDLE, IDLE) 状态表示两个相连的空闲退避时槽。节点必须在检测到两个连续的空闲时槽后才能发送数据。所以, 只有在 (IDLE, IDLE) 状态下, 节点才有可能成功发送数据或因为冲突而发送失败。当节点处在 (IDLE, IDLE) 阶段, 如果 1 优先级节点发送数据并且发送成功, 则进入 (SUCCESS1) 状态; 如果有两个以上 1 优先级节点同时发送数据导致发送失败, 则进入 (FAILURE1) 状态。同理, (SUCCESS2) 和 (FAILURE2) 状态表示优先级为 2 的节点发送成功或失败。如果两种优先级节点同时发送数据导致失败, 则进入 (FAILURE1, 2) 状态。

由马尔科夫链的性质可得:

$$\pi_{ii} = \alpha \pi_{ii} + \pi_{ib}, \quad \pi_{S1} = \beta_1 \pi_{ii}$$

$$\pi_{S2} = \beta_2 \pi_{ii}, \pi_{f1} = f_1 \pi_{ii} \quad (5)$$

$$\pi_{f2} = f_2 \pi_{ii}, \pi_{f12} = f_3 \pi_{ii}$$

式中, $\pi_b, \pi_{ii}, \pi_{S1}, \pi_{S2}, \pi_{f1}, \pi_{f2}, \pi_{f12}$ 分别表示进入状态 (IDLE, BUSY), (IDLE, IDLE), (SUCCESS1), (SUCCESS2), (FAILURE1), (FAILURE2) 和 (FAILURE1, 2) 的比例。

令 $p_{i|ii}^{n,q}$ 表示两种优先级节点在第二次 CCA 检测信道为空闲时发送数据的条件概率, 则:

$$p_{i|ii}^{n,q} = \frac{p_i^{n,q}}{p_{ii}^c} \quad (6)$$

式中, p_{ii}^c 表示两个连续退避时槽都空闲的概率。

当信道处在 (IDLE, IDLE) 状态并保持这个状态的概率为 $\alpha = (1 - p_{i|ii}^{n,1})^{M_1} (1 - p_{i|ii}^{n,2})^{M_2}$ 时, 即没有节点发送数据。从 (IDLE, IDLE) 状态转移到其他 5 种状态的概率如下所示:

(1) SUCCESS1 状态: 只有一个高优先级节点发送数据, 低优先级节点中没有节点发送数据。概率为 $\beta_1 = M_1 p_{i|ii}^{n,1} (1 - p_{i|ii}^{n,1})^{M_1 - 1} (1 - p_{i|ii}^{n,2})^{M_2}$ 。

(2) SUCCESS2 状态: 只有一个低优先级节点发送数据, 其他节点不发送数据。可以用以下概率表示: $\beta_2 = M_2 p_{i|ii}^{n,2} (1 - p_{i|ii}^{n,2})^{M_2 - 1} (1 - p_{i|ii}^{n,1})^{M_1}$ 。

(3) FAILURE1 状态: 至少有两个高优先级节点同时发送数据帧, 而低优先级没有节点在此刻接入信道。这种情况发生的概率用 f_1 表示: $f_1 = (1 - p_{i|ii}^{n,2})^{M_2} \sum_{k=2}^{M_1} \binom{M_1}{k} (p_{i|ii}^{n,1})^k (1 - p_{i|ii}^{n,1})^{M_1 - k}$ 。

(4) FAILURE2 状态: 至少有两个低优先级节点同时发送数据帧, 而高优先级没有节点在此刻接入信道。 $f_2 = (1 - p_{i|ii}^{n,1})^{M_1} \sum_{k=2}^{M_2} \binom{M_2}{k} (p_{i|ii}^{n,2})^k (1 - p_{i|ii}^{n,2})^{M_2 - k}$ 表示这种情况发生的概率。

(5) FAILURE1, 2 状态: 至少有一个低优先级节点和一个高优先级节点同时发送数据帧, 造成冲突。这种情况发生的概率为 $f_3 = 1 - (\alpha + \beta_1 + \beta_2 + f_1 + f_2)$ 。

在发送数据之后, 不管成功与否, 信道以概率 1 回到 (IDLE, BUSY) 状态。信道处于 (IDLE, BUSY) 和 (IDLE, IDLE) 状态的稳态概率 P_b^c 和 P_{ii}^c 分别为:

$$P_b^c = \frac{\pi_b}{\sum_{k \in \Omega} T_k \pi_k}, P_{ii}^c = \frac{\pi_{ii}}{\sum_{k \in \Omega} T_k \pi_k} \quad (7)$$

由式(5)可以得出 $\pi_b = (1 - \alpha) \pi_{ii}$ 。

K 和 T_K 为信道状态 k 和在此状态的时间(时槽个数)。 K 属于信道状态 $\Omega = \{ib, ii, s_1, s_2, f_1, f_2, f_{12}\}$ 。给出每种优先级的数据包长度, 可以得出 $T_b = T_{ii} = 1, T_{s1} = T_{f1} = N_1, T_{s2} = T_{f2} = N_2, T_{f12} = N_m = \max(N_1, N_2)$ 。因此有:

$$\sum_{k \in \Omega} T_k \pi_k = \pi_{ii} \left[\frac{1 + (1 + N_m)(1 - \alpha) - (N_m - N_1)}{(\beta_1 + f_1) - (N_m - N_2)(\beta_2 + f_2)} \right] \quad (8)$$

把式(8)代入式(7)可以得出 P_b^c 和 P_{ii}^c 的值。在 2.2 节提到的 p_i^c , 即第一次 CCA 检测空闲的概率, 包括两种情况: 两次 CCA 检测都空闲和第一次 CCA 检测信道空闲而第二次信道忙。所以 $p_i^c = p_b^c + p_{ii}^c$ 。 $p_{i|ii}^c$ 为在第一次 CCA 检测信道空闲基础上第二次信道空闲的概率, 是个条件概率, 因此 $p_{i|ii}^c = p_{ii}^c / p_i^c$ 。

2.4 相关性能公式

(1) 信道接入概率: 节点接入信道的概率即为一个普通的

退避时槽开始发送数据的概率, 对应于式(1)和式(2)。

(2) 总信道吞吐量: q 节点总信道吞吐量定义为 q 节点在 SUCCESS $_q$ 状态所处的时间占总时间的比重, 用稳态概率 S_q 表示。

$$S_q = \frac{N_q \pi_{S_q}}{\sum_{k \in \Omega} T_k \pi_k} \quad (9)$$

式中, 分母可以由式(8)得出, 进入状态 SUCCESS $_q$ 的比例 π_{S1} 和 π_{S2} 由式(5)给出。把式(5)和式(8)代入式(9)就可以得出两种优先级节点的总信道吞吐量。

(3) 数据帧平均服务时间: 数据帧平均服务时间 L_q 即 MAC 层时延定义为数据帧从可以发送的瞬间到成功发送结束的平均时间。对于 q 优先级节点, 此时延等于两个成功的 q 优先级数据传输平均时间减去一个 q 类型节点处于空闲状态的平均时间。

$$L_q = \frac{N_q M_q}{S_q} (1 - p_i^{n,q}) \quad (10)$$

$p_i^{n,q}$ 表示 q 类型节点处于空闲 (IDLE) 状态的时间。可由式(12)求得。

(4) 单个节点平均能耗

本文以 CC2420 为例, 说明无线电收发器在各个状态和在状态之间转换消耗的能量。无线电收发器支持以下 4 个状态: 关闭 (Shutdown) 或休眠、空闲 (Idle)、发送 (Transmit) 和接收 (Receive)。本文不考虑关闭收发器以节省能量, 即只考虑空闲、发送和接收 3 个状态。

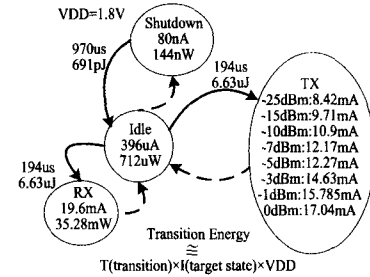


图 5 无线电收发器状态转移图

图 5 给出了无线电收发器在各个状态消耗的能量和在各个状态之间转换所需的时间及能量。每个 q 类型节点消耗的平均能量如下所示:

$$Y_{av}^q = (p_i^{n,q} - p_{beacon}^n + p_{bo}^{n,q} - p_{ir}^n) Y_{idle} + (p_{cs}^{n,q} + p_{ir}^n + p_{beacon}^n) Y_{rx} + p_{tr}^{n,q} Y_{tx} \quad (11)$$

式中, Y_{idle}, Y_{rx} 和 Y_{tx} 分别是无线电收发器在 Idle, Receive 和 Transmit 状态消耗的能量。 $p_i^{n,q}, p_{bo}^{n,q}, p_{cs}^{n,q}, p_{tr}^{n,q}$ 分别表示 q 类型的节点处于空闲、退避、侦听信道和发送状态的时间, 从式(12)可以求出。超帧的信标指数 $BO = 6$, 可得 $p_{beacon}^n = 1/3072$ 。 p_{ir}^n 定义为无线电收发器从 Idle 状态转换为 Receive 状态的时间。从图 5 可知 $p_{ir}^n = 0.194\text{ms}$ (修改之前是 $0.194\mu\text{s}$)。

$$p_i^{n,q} = \frac{\pi_{idle}^{n,q}}{1 + (N_q - 1) \pi_{cs}^{n,q}}, p_{bo}^{n,q} = \frac{\sum_{i=1}^m \pi_{bo}^{n,q}}{1 + (N_q - 1) \pi_{tr}^{n,q}} \quad (12)$$

$$p_{cs}^{n,q} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^2 \pi_{cs}^{n,q}}{1 + (N_q - 1) \pi_{cs}^{n,q}}, p_{tr}^{n,q} = \frac{N_q \pi_{tr}^{n,q}}{1 + (N_q - 1) \pi_{tr}^{n,q}}$$

q 类型节点在发送状态需要 N_q 个时槽, 在其余状态需要

1个时槽时间,式(12)的分母由 $\pi_{00}^{n,q} + \sum_{i=1}^m \pi_{0i}^{n,q} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^2 \pi_{cij}^{n,q} + N_q \pi_{cx}^{n,q}$ 化简得到。

3 模型验证和性能分析

这里考虑一个单跳的星型网络场景,节点处于一个能够相互监听信道区域内。除网络协调器之外的节点个数 $M1=M2=0.5M$,其中 $M=12$;数据包到达率 $\lambda=\lambda1=\lambda2$;数据包长度 $N1=N2=10$ 个退避时槽。基于此设置,图6—图9分别给出了两种优先级数据信号在不同的数据包到达概率 λ 下的信道接入概率、吞吐量、时延和单个节点平均能耗的分析结果。4幅图一致地说明了本文提出的机制对提高高优先级数据的性能确实起到了很好的效果。

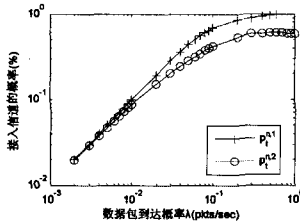


图6 信道接入概率

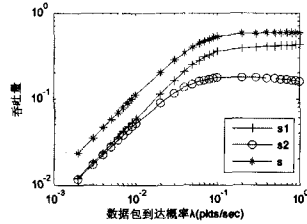


图7 总信道吞吐量

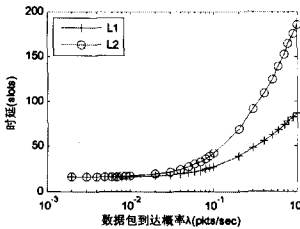


图8 端到端时延

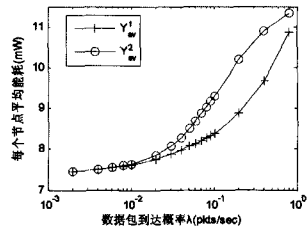


图9 单个节点平均能耗

研究发现,在低数据包到达率 $\lambda < 0.01$ 的情况下,基于退避次数的区分服务机制并没有起到很明显的效果,因为节点大部分处于空闲状态,有两个以上节点同时尝试接入信道的机率很小,不需要区分服务。

随着数据包到达率 λ 的增加,高优先级数据得到更大的信道接入概率、更高的吞吐量、更少的时延和能耗。因为当 λ 值增加但信道还没有达到饱和状态时,要发送的两种优先级数据也相应增加。节点对于信道的竞争更激烈,而高优先级的数据流因为区分服务机制比低优先级数据更容易接入信道。区分服务机制在一定程度上损害了低优先级节点的利益,使两种优先级数据性能差别更大。

当信道达到饱和之后 ($\lambda > 0.1$),网络拥塞变得严重,数据冲突的概率大大增加。由于频繁的冲突和重传,两种优先级数据的信道接入概率和吞吐量增加趋势变得平缓,更可能呈现下降趋势。图7中,当 $\lambda > 0.1$ 后,低优先级节点的吞吐量不再随着 λ 增加而下降了;从图6可以看出,当 λ 增加到 0.1 以后,低优先级节点的信道接入概率基本保持平衡且稍有下降,这就表示低优先级数据吞吐量达到饱和,丢包率增加,因此吞吐量有所下降。由于采用了区分服务机制,在同等网络条件下,即使网络拥塞,高优先级节点还是比低优先级节点更容易接入信道,从而节省了时延,保证了高吞吐量和低能耗的要求。

结束语 针对传统无线传感器网络不能提供数据流优先级区分的问题,本文提出了一种基于 802.15.4MAC 协议的

改进机制,该机制对不同优先级数据采用不同的退避机制从而确保了高优先级数据业务的传输性能。相关分析结果表明,该区分服务机制使高优先级数据流更容易接入信道,吞吐量更高,时延更少且消耗的能量也较少,在一定程度上满足了实时数据流低时延、高吞吐量的要求。下一步将继续深入探讨如何使无线传感器网络的 MAC 协议能更公平有效地区分服务并建立更精确的区分服务模型,以及如何提高实时多媒体业务在无线网络中的传输性能。

参考文献

- [1] 孙利民,李建中,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005
- [2] 朱建新,高蕾娜,张新访. 低速无线个人区域网 802.15.4 的安全研究[J]. 计算机科学,2009,36(1):71-76
- [3] Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C. Performance evaluation of the IEEE802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks [C]//Proc. of Workshop on Energy-Efficient Wireless Communications and Networks(EWCN). 2004:701-706
- [4] Zheng J, Lee M J. A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4 [J]. Sensor Network Operations, IEEE Press, Wiley Interscience, 2006, 4: 218-237
- [5] Zheng J, Lee M J. Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a Reality—a discussion on a potential low power, low bit rate standard [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42: 140-146
- [6] Koubaa A, Alves M, Tovar E. A comprehensive simulation study of slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks [C]// Proc. of IEEE Workshop. on Factory Comm. Sys (WFCS'06). Torino, Italy, 2006: 183-192
- [7] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. IEEE Journal in Selected Areas on Communications, 2000, 18(3): 535-547
- [8] Chen Z, Lin C, Wen P H. An Analytical Model for Evaluating IEEE 802.15.4 CSMA/CA protocol in Low-rate wireless application [C]//Proc. of International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Niagara Falls, Ont, Canada, 2007: 899-904
- [9] Ramachandran I, Das A K, Roy S. Analysis of the contention access period of IEEE 802.15.4 [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2007, 3(1)
- [10] Ndihi E D N, Khaled N, De Micheli G. An Analytical Model for the Contention Access Period of the Slotted IEEE 802.15.4 with Service Differentiation [C]//Proc. of International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Dresden, Germany, 2009: 1-6
- [11] 周明伟,樊晓平,刘少. 基于优先级的 IEEE 802_15_4 CSMA_CA 建模与分析[J]. 传感技术学报, 2009, 22(3): 422-426
- [12] Kim T-Y, Youm S, Kim E-J, et al. A Service Differentiation Mechanism for Improving the Performance of IEEE 802.15.4 Sensor Networks [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4330: 231-245
- [13] Callaway E, Gorday P, Hester L, et al. Home networking with IEEE802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40: 70-77