

基于 M/M/1/K 排队模型的低功耗无线通信网络 TDMA 协议延迟评估及仿真

冯 永 姚龙海 张 亮

(解放军电子工程学院网络系 合肥 230037)

摘 要 基于 M/M/1/K 排队模型对低功耗无线通信网络中的 TDMA 协议延迟特性进行了评估,利用网络仿真软件 QualNet 在单跳簇状网络拓扑的条件下对不同接口的 TDMA 延迟特性进行了相应的仿真,并将仿真结果与评估值进行了对比。仿真表明,该评估方案具有较好的近似性,同时,硬件接口的选择对于减少 TDMA 延迟时间有着较大的影响。

关键词 排队模型,时分多址,延迟评估,低功耗,仿真

中图分类号 TP393.0 文献标识码 A

Delay Evaluation and Simulation of TDMA Through M/M/1/K Queue Model in Low-energy Wireless Communication Environment

FENG Yong YAO Long-hai ZHANG Liang

(Department of Network, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

Abstract Evaluate the delay characteristic of TDMA in low-energy wireless communication environment based on M/M/1/K queue model, and simulate it by QualNet with two interfaces in single-hop network topology, the simulation data is compared with the evaluation one. It shows that, this evaluation scheme is nearly equal to the simulation outcome. Meantime, the selection of hardware interface lays more influence on the delay of TDMA protocol.

Keywords Queue model, TDMA, Delay evaluation, Low energy, Simulation

1 引言

随着低功耗无线通信技术成为当前学者研究的一个热点领域,相关通信协议和技术也逐步被提出和应用到生产和生活当中。信道协调和分配作为无线通信的一个重要环节,相关 MAC 协议的选择对于确保无冲突的信道访问起着至关重要的作用。与其它 MAC 协议相比,TDMA 协议通过时隙分配来协调信道争用,使通信节点在所属时隙内进行通信而在非时隙时间内转入睡眠状态成为可能,从而降低了节点能耗^[1]。因此,近年来部分研究人员提出了一些基于 TDMA 协议的低功耗 MAC 协议设计方案^[2,3]。但是,基于时隙分配的 TDMA 协议有可能带来一定程度的延时,其程度轻重直接关系到网络的部署质量和 QoS 要求。

近年来,大量学者提出了许多 TDMA 协议的延时评估方案^[4,5],对此类问题进行了十分有意义的探索。但这些文献提出的评估方法或者过于复杂,或者过于简化问题,与现实应用环境不符,因而所得出的结果与现实相比差异性较大。本文基于单服务台混合制排队模型(M/M/1/K)^[6]对单跳簇状无线网络 TDMA 延时进行评估,并在此模型基础上,通过网络仿真软件 QualNet^[7]对两种不同的数据读写接口 SPI 和 GPIO 进行了相关 TDMA 延时仿真,初步验证了延迟评估方

案的准确性。文章最后给出了相关结论。

2 低功耗无线通信网络

低功耗通信网络节点结构简单,数据处理能力和存储空间受限;数据传输速率较低,一般在几百千赫兹到几兆赫兹之间;节点通信范围较小,一般在 1000 米以下。

不同于有线及其它高速无线通信网络,在低功耗通信网络中,为尽可能减少处理级的硬件资源消耗,主流的低功耗无线通信模块均在射频部分集成了数据缓冲队列管理机构(如图 1 所示)。例如 Nordic 公司的 nRF24L01 模块收发队列长度为 96 字节;而 TI/ChipCon 公司的 CC1100 模块队列长度为 64 字节,这些无线模块一般运用最简单的 FIFO 队列管理策略^[8,9]。

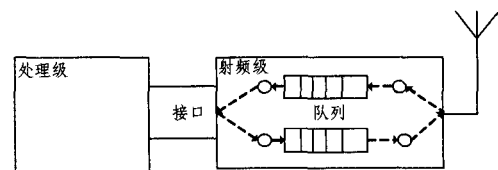


图 1 通信节点抽象模型

在这种前提下,射频级至处理级的接口读写速度的大小,决定着能否尽快将所收到的数据上传至处理级进行处理而使

本文受安徽省自然科学基金(1208085QF107)资助。

冯 永(1986—),男,硕士生,主要研究方向为嵌入式技术、Ad hoc 网络、无线传感网络,E-mail: superferras@163.com;姚龙海(1963—),男,教授,主要研究方向为嵌入式技术、Ad hoc 网络、无线传感网络;张 亮(1982—),男,博士,讲师,主要研究方向为网络技术、模式识别技术。

射频级中的队列保持较为空闲的状态,对于提高数据传输的成功率有着非常重要的影响。

3 TDMA 延时初步分析

为使分析简单化,我们基于簇状网络(见图 2)进行 TDMA 延时分析。在该簇网络中,如果运用 TDMA 协议,最典型的策略是由簇头进行间隙分配,簇节点在各自所分配的间隙内向簇头进行数据收发通信。

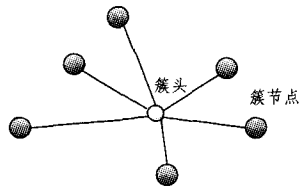


图 2 簇状网络拓扑

在不考虑信道延迟和节点移动性的条件下,单簇内平均端到端延时主要由两部分组成:

一是各簇节点分别等待各自间隙到来的等待时间。该时间一般与间隙大小和节点数量有关。

二是簇节点所发送的数据在簇头节点队列中等待处理的排队时间。该时间的确定比较复杂,依赖于所建立的分析模型,一般而言,主要与数据收发速度和队列长度有关。因此,本文所建立的 TDMA 延时分析模型主要是基于排队论中的 on-off 过程^[6],从簇头节点队列中等待处理的排队时间角度进行延时分析的。

4 生灭过程(on-off)的排队系统

生灭过程(on-off)是一类非常重要且广泛存在的排队系统。在该系统中,用“on”表示顾客的到达,用“off”表示顾客的离去^[6],如图 2 所示。



图 3 on-off 过程排队模型

在排队论中,若 $N(t)$ 的概率分布具有以下性质:

- (1) 假设 $N(t)=n$, 则从时刻 t 起到下一个顾客到达时刻止的时间服从参数为 λ_n 的负指数分布(用 M 表示,即具有无记忆性(Markov 性)的指数分布)。
- (2) 假设 $N(t)=n$, 则从时刻 t 起到下一个顾客离去时刻止的时间服从参数为 μ_n 的负指数分布。
- (3) 同一时刻只有一个顾客到达或离去,则称 $\{N(t), t \geq 0\}$ 为 on-off 过程。

一般来说,得到 $N(t)$ 的分布 $P_n(t) = P\{N(t)=n\}$ 是比较困难的,因此通常是求当系统到达平衡后的状态分布(见图 4)。

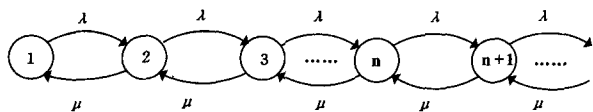


图 4 生灭过程 Markov 状态转变图

当系统运行相当时间而到达平衡状态后,对任一状态 n 来说,单位时间内进入该状态的平均次数和单位时间内离开该状态的平均次数应该相等。根据这一原理,可得到任一状

态下的平衡方程如下:

$$\lambda_{n-1} p_{n-1} + \mu_{n+1} p_{n+1} = (\lambda_n + \mu_n) p_n$$

由上述平衡方程可求得:

$$p_n = \delta_n p_0$$

其中

$$\delta_n = \frac{\lambda_{n-1} \lambda_{n-2} \cdots \lambda_0}{\mu_n \mu_{n-1} \cdots \mu_1} \quad (1)$$

由概率分布的要求 $\sum_0^{\infty} p_n = 1$, 则有:

$$[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \delta_n] p_0 = 1 \quad (2)$$

于是, $p_0 = 1 / (1 + \sum_{n=1}^{\infty} \delta_n)$, p_0 只有当级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \delta_n$ 收敛时才有意义,即当 $\sum_{n=1}^{\infty} \delta_n < \infty$ 时,才能由上述公式得到平稳状态的概率分布。

5 单服务台混合制模型 M/M/1/K

单服务台混合制模型 M/M/1/K 是指:当单位时间内到达的顾客数服从泊松分布时,顾客的相继到达时间服从参数为 λ 的负指数分布,服务台个数为 1,服务时间服从参数为 μ 的负指数分布,系统的空间为 K ,当 K 个位置已被顾客占用时,新到的顾客自动离去,当系统中有空位置时,新到的顾客进入系统排队等待。由于所考虑的排队系统中最多只能容纳 K 个顾客(等待位置只有 $K-1$ 个),因而有:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & n=0, 1, 2, \dots, K-1 \\ 0, & n \geq K \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_n = \mu, n=1, 2, 3, \dots, K$$

由式(1)、式(3)可得:

$$\delta_n = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n = \tau^n, & n=1, 2, \dots, K \\ 0, & n > K \end{cases} \quad (4)$$

故 $p_n = \tau^n p_0, n=1, 2, \dots, K$ 。易得:

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^K \tau^n} = \begin{cases} \frac{1-\tau}{1-\tau^{K+1}}, & \tau \neq 1 \\ \frac{1}{K+1}, & \tau = 1 \end{cases}$$

由已得到的单服务台混合制排队系统平稳状态下队长的分布,可知当 $\tau \neq 1$ 时,平均队长 L_s 为:

$$\begin{aligned} L_s &= \sum_{n=0}^K n p_n = p_0 \tau \sum_{n=1}^K n \tau^{n-1} \\ &= \frac{p_0 \tau}{(1-\tau)^2} [1 - \tau^K - (1-\tau)K\tau^K] \\ &= \frac{\tau}{1-\tau} - \frac{(K+1)\tau^{K+1}}{1-\tau^{K+1}} \end{aligned}$$

当 $\tau=1$ 时,

$$L_s = \sum_{n=0}^K n p_n = \sum_{n=1}^K n \tau^n p_0 = \frac{1}{K+1} \sum_{n=1}^K n = K/2$$

由于排队系统的容量有限,只有 $K-1$ 个排队位置,因此,当系统空间被占满时,再来的顾客将不能进入系统排队,也就是说不能保证所有到达的顾客都能进入系统等待服务。假设顾客的到达率(单位时间内来到系统的顾客的平均数)为 λ ,则当系统处于状态 K 时,顾客不能进入系统,即顾客可进入系统的概率是 $1 - P_K$ 。因此,单位时间内实际可进入系统的顾客的平均数为:

$$\lambda_e = \lambda(1 - p_K) = \mu(1 - p_0)$$

根据 Little 公式^[6],可得平均逗留时间 W_s 为:

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda_e} = \frac{L_s}{\lambda(1-p_K)}$$

平均等待时间 W_q 为:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_e} = \frac{L_q}{\lambda(1-p_K)}$$

平均逗留时间 W_s 包括平均等待时间 W_q 和服务时间, 则系统的平均排队延迟时间 T_{delay} 为:

$$T_{queue} = W_s = \frac{L_s}{\lambda_e} = \frac{L_s}{\lambda(1-p_K)} \quad (5)$$

6 TDMA 延迟评估

以数据包作为分析对象, 设数据速率为 R_b , 接口的读写速度为 R_i , 平均包大小为 L_p 字节, 射频级队列的大小为 L_q 个数据包, 时隙数为 N , 时隙大小为 t_{slot} , 则单位时间内到达接收节点的数据包个数为 $R_b/8L_p$, 单位时间内接口上传的数据包个数为 $R_i/8L_p$ 。则由上述基于 M/M/1/K 单位服务台混合抽排队模型而得到的平均端到端的延迟时间可表示为:

当 $\tau \neq 1$ 时, 平均队长 L_s 为:

$$L_s = \frac{\tau}{1-\tau} \frac{(K+1)\tau^{K+1}}{1-\tau^{K+1}} \\ = \frac{R_b/R_i}{1-R_b/R_i} \frac{(K+1)(R_b/R_i)^{K+1}}{1-(R_b/R_i)^{K+1}}$$

当 $\tau=1$ 时, 平均队长 L_s 为:

$$L_s = K/2$$

同样可得到平均排队长 L_q 为

$$L_q = \begin{cases} \frac{R_b/R_i}{1-R_b/R_i} \frac{(R_b/R_i)(1+K(R_b/R_i^K))}{1-(R_b/R_i)^{K+1}}, & R_b/R_i \neq 1 \\ \frac{K(K-1)}{2(K+1)}, & R_b/R_i = 1 \end{cases}$$

而同时, 单位时间内实际可进入系统的顾客的平均数为:

$$\lambda_e = \lambda(1-p_K) = \mu(1-p_0)$$

此时, $\lambda = R_b/8L_p$, $\mu = R_i/8L_p$ 。

同时, 单簇网络中的簇节点等待时隙的平均时间为:

$$T_{wait} = \frac{N(N-1) \cdot t_{slot}}{2}$$

则系统的平均端到端延迟时间 $T_{delay} = T_{queue} + T_{wait}$ 。

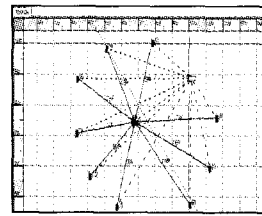
7 仿真

7.1 场景建立

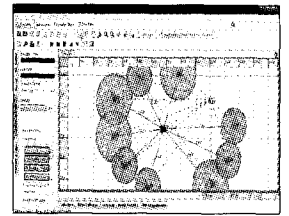
我们利用网络仿真软件 QualNet 5.1 构建一个简单的簇状网络, 并将其与前文基于排队论的模型得到的延时计算值进行初步比较。为尽可能减少仿真建立初始化阶段的通信消耗, 我们采取源路由协议 (DSR) 和单跳网络拓扑。仿真参数和仿真场景分别如表 1 和图 5 所示。

表 1 QualNet 仿真参数设置

| 参数 | 值 |
|--------|---------------|
| 节点数 | 10 |
| 时隙数 | 9 |
| 时隙大小 | 10ms |
| 数据速率 | 2Mbps |
| 数据包大小 | 50B |
| 接口处理速度 | 1Mbps/500kbps |
| 路由协议 | DSR |



(a) 网络拓扑



(b) 场景运行

图 5

我们在相同的网络拓扑条件下, 设定不同的队列长度 (K), 通过设置不同的接口处理速度分别模拟两种不同的数据读写接口 SPI(1Mbps) 和 GPIO(500kbps), 通过 TDMA 延时分析和软件仿真所得到的对比值如图 6 所示。

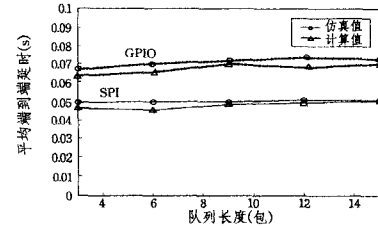


图 6 仿真值与计算值对比图

7.2 结果分析

由仿真结果我们可以得知, 利用 M/M/1/K 单服务台混合制排队模型所建立的 TDMA 延时评估模型所计算得到的延时与仿真值非常接近。存在细小差异的原因在于仿真初始化阶段通信节点建立单跳路由时的通信耗费。

我们建立的分析模型是基于单跳的网络拓扑, 且不考虑信道延迟及节点通信距离, 因此这种基于 M/M/1/K 单服务台混合制排队模型有一定的应用局限性。随着网络拓扑规模的扩大, 路由耗费和信道干扰对于传输延迟的影响也增大, 延迟情况的分析也将更为复杂, 但是对于层数较少的分簇型网络拓扑, 该模型仍具有较好的数值近似性。

结束语 本文基于 M/M/1/K 单服务台混合制排队模型建立了 TDMA 延迟分析模型, 并通过仿真证明了在单跳网络拓扑环境下模型分析结果的正确性。另一方面, 在低功耗通信网络硬件资源条件受限的条件下, 如何选择合适的射频级与处理级的接口类型, 对于优化通信延迟具有重要的作用, 这是硬件设计人员在进行相关低功耗无线通信节点设计时需要考虑的一个方面。

参考文献

- [1] Cano C, Bellalta B, Sfairpoulou A, et al. Low energy operation in WSNs: A survey of preamble sampling MAC protocols[J]. Computer Networks, 2011, 55: 3351-3363
- [2] Lou Wei, Wu Yan-wei, Li Xiang-yang, et al. Energy Efficient TDMA Sleep Scheduling in Wireless Sensor Networks[C]// IEEE INFOCOM 2009 - IEEE Conference on Computer Communications, Riode Janeiro, Brazil, April 2009. NY USA: IEEE eXpress Conference Publishing, 2009: 630-638
- [3] Lee W L, Datta A, Oliver R C. FlexiTP: A Flexible-Schedule-Based TDMA Protocol for Fault-Tolerant and Energy-Efficient Wireless Sensor Networks[J]. Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on, 2008, 19(6): 851-864

(下转第 286 页)

级依据一定规则进入队列,若实时数据传输任务指定了使用 DL 中某条数据链通信,则可将该实时数据任务优先级提高并分配到可抢占优先级队列。按照 PC-EDF 调度实时数据,并根据 DL 中的各数据链路传输速率的高低以及是否是允许发送的状态优先选择速率最高的数据链进行传输。

3.2.3 SL 通信分组调度管理

对于指定了使用 SL 通信的实时数据,为每条数据链建立优先级的排队模型并使用 PC-EDF 调度,对于每个排队模型,由于只有一个数据链作为服务窗,每次调度时分组调度管理器则根据数据链是否是允许发送的状态发送实时数据,若可抢占优先级队列有任务的截止时间已超期,则可抢占数据链优先发送。

4 实验验证

采用 NS2 网络模拟仿真软件进行验证,模拟了带宽受限条件下的数据链通信环境,根据上述 QoS 分级算法以及 PC-EDF 调度算法实现了实时数据传输 QoS 控制的分级分类器和分组调度器,将优先级划分 0~9 十个优先级,将缓冲队列划分为逻辑上三级优先级队列,分别为:1. 可抢占优先级队列;2. 优先级队列;3. 普通队列。1 级队列分配时延上界为 2ms,2 级队列分配时延上界为 40ms,3 级队列分配时延上界为 400ms。实验模拟了不同负载条件下算法的性能,比较了三级优先级队列与先入先出队列在分组到达强度一样条件下的排队队长,如图 1 所示,纵坐标表示队列长度,横坐标表示分组到达持续时间,

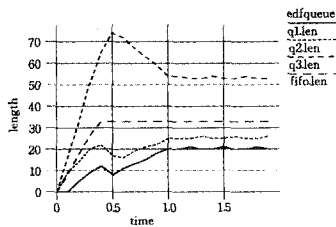


图 1 PC-EDF 三级队列与 FIFO 队列队长比较

实验结果表明,最早截止时间优先三级队列长度在不同负载条件下均趋于稳定,可抢占队列平均队长小于 2 级队列队长,而且都小于先入先出队长和 3 级队列队长。由 Little 式(1),在到达强度一致条件下,队长越小则排队等待时间越短,可抢占队列有最小的排队等待时间,1 级、2 级队列排队等待时间都小于先入先出队列和 3 级队列,可见 PC-EDF 比 FIFO 能提供更好的 QoS 分级并能提供时延保证。

结束语 本文在基于数据链通信的应用层提出了一种实

时数据传输 QoS 控制方法,包括可扩展的 QoS 分级算法和一种基于最早截止时间优先的优先级可控制调度算法 PC-EDF。仿真结果显示,提出的调度模型和算法相比传统的先来先服务模型具有更高的性能,能保证高优先级的实时数据传输任务较好的 QoS。实现基于数据链通信端到端的实时数据传输 QoS 控制是一种全局概念,本文仅在数据链通信服务器的应用层做了 QoS 控制研究,将应用层的 QoS 控制与数据链网络层 QoS 控制相结合是下一步的研究工作。

参考文献

- [1] 骆光明,杨斌,邱致和,等. 数据链[M]. 北京:国防工业出版社,2010
- [2] Alemeida J, Dabu M, Manikutty A, et al. Providing differentiated level of service in Web content hosting[C]//Proceedings 1998 SIGMETRICS Workshop on Internet Server Performance. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998
- [3] Eggert L, Heidemann J. Application-level differentiated services for Web servers[J]. World Wide Web Journal, 1999, 2(3): 133-142
- [4] 陆传贵. 排队论(第 2 版)[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2009
- [5] QoS for Web services. Requirements and Possible Approaches [EB/OL]. <http://www.w3c.org.kr/kr-office/TR/2003/ws-qos>, 2011-01-05
- [6] Liu, Layland j. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment[J]. Journal of ACM, 1973, 20(1): 46-61
- [7] Zhang H, Ferrari D. Rate-controlled service disciplines [J]. Journal of High Speed Networks, 1995, 3(4): 389-412
- [8] Ferrari D, Verma D C. A scheme for real-time channel establishment in wide-area networks[J]. IEEE JSAC, 1990, 8(3)
- [9] Verma D, Zhang H, Ferrari D. Delay jitter control for real-time communication in a packet switching network[C]//Proceedings of the TriComm'91. Chapel Hill, NC, Mar. 1991
- [10] Georgiadis L, Guerin R, Peris V, et al. Efficient network QoS provisioning based on per node traffic shaping[C]//IEEE/ACM Trans on Networking, 1996, 4(4)
- [11] Zhu Kai, Zhuang Yan, Yannis V. Achieving end-to-end delay boundes by EDF scheduling without traffic shaping[J]. IEEE INFOCOM, 2011
- [12] Liebeherr J, Yilmaz E. Work-conserving vs. nonworkconserving packet scheduling: An issue revisited[C]//Proceedings IEEE/IFIP 7th International Workshop on Quality of Service(IWQoS'99). June 1999

(上接第 264 页)

- [4] Xie Min, Haenggi M. Towards an end-to-end delay analysis of wireless multihop networks[J]. Ad hoc Networks, 2009, 7: 849-861
- [5] Cui Shu-guang, Madan R, Goldsmith A J, et al. Energy Minimization and Delay Analysis in TDMA-based Sensor Networks [Z]. Wireless Communications, 2004
- [6] Yue Wu-yi, Takahashi Y, Takagi H. Advances in Queueing Theory and Network Applications[M]. NY USA: Springer Science + Business Media, 2009: 70-82, 182-196

- [7] Scalable Network Technologies. QualNet [EB/OL]. <http://www.scalable-networks.com/content/products/qualnet>
- [8] Nordic Semiconductor. nRF24L01 single chip 2.4GHz transceiver product specification[EB/OL]. <http://www.nordic-semi.no>, 2007. com, 2012-12-19
- [9] Texas Instruments. CC1100 Single Chip Low Cost Low Power RF Transceiver[EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=cc1100&fileType=pdf>, 2012-12-19