

IEEE 802.15.4 MAC 协议能耗与时延均衡的 GTS 调度新算法设计 *

李明¹, 周四清^{1,2}

(1.暨南大学,信息科学技术学院,广东 广州 510632;

2.暨南大学,经济学院,广东 广州 510632)

摘要: 简述了 IEEE 802.15.4 MAC 协议中超帧结构和保护时隙(GTS)分配机制,分析了星状网络中信标使能模式下设备节点利用 GTS 方式通信时超帧结构中各参数对能耗与时延性能的影响。在此基础上设计了一种 GTS 调度新算法,该调度算法对时延期限小的节点优先进行 GTS 分配并在满足其时延要求情况下,根据业务量调节超帧结构中的超帧序号 SO 与信标序号 BO,使设备节点能耗降到最低,从而实现星状网络中各节点的能耗与时延均衡,并用 NS2 仿真评估了调度新算法性能,其研究可为无线传感网络的实时应用系统提供参考价值。

关键词: IEEE 802.15.4; GTS; 能耗; 时延

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

Energy and delay trade-off of the new GTS scheduling algorithm in IEEE 802.15.4 MAC

LI Ming¹, ZHOU Si Qing^{1,2}

(1.College of Information and Science technology, JiNan University, Guangzhou 510632, China;

2.College of Economics, JiNan University, GuangZhou 510632, China)

Abstract: The guaranteed time slots(GTS) allocation mechanism and superframe struction in IEEE 802.15.4 are elaborated, the impacts of parameters in superframe struction on energy consumption and time delay is analyzed in beacon-enable star network where devices communicate through GTS mode. A new GTS allocation mechinism scheduling algorithm, which allocates GTS to device with low time delay bound firstly and adjusts the value of SO and BO in superframe according to the burst of device to minimize energy consumption, designed to meet with trade-off of energy consumption and time delay of devices in star network, then, the performance evaluation of the new scheduling algorithm is performed with NS2 simulator, the research is significant to promote the WSN'application in real-time system.

Key words: IEEE802.15.4; GTS; energy consumption; time delay

随着通信技术的飞速发展,人们对无线移动通信尤其是短距离无线移动通信的需求日益增多。为满足用户对低速率、低成本、低能耗的短距离无线通信需求,2003年5月,IEEE 802.15.4工作组正式发布了针对低速率无线个人区域网 LR-WPAN(Low-Rate Wireless Personal Network)的物理层(PHY)和媒体接入控制(MAC)的 IEEE

802.15.4 规范^[1]。2004年,ZigBee 联盟组织采纳了 IEEE 802.15.4 标准,为无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Network)等 LR-WPAN 奠定了良好的应用基础,从而为相关高新技术产业的发展提供了新契机。

WSN 起源于 20 世纪 90 年代末,并在 21 世纪得到迅速发展,在国防军事、环境监测、医疗卫生、智能家居、抗灾救险和交通领域等人类生活的各方面发挥着重要作用。例如,美国加州大学伯克利分校 Intel 实验室和

* 基金项目:广东省软科学资助项目(2008B070800029);暨南大学引进优秀人才科研启动基金资助项目(51205068)

大西洋学院联合在大鸭岛(Great Duck Island)上部署了1个多层次的传感器网络系统,用来监测岛上海燕的生活习性;在家电和家具中嵌入传感器节点,通过无线网络与Internet连接在一起,利用远程控制系统,可完成对家电的遥控,在人们回家之前打开电脑、电视和空调等。WSN将是人类与物理世界实现良好“沟通”的桥梁,它可以让人们更好地了解这个物理世界,生活得更加舒服。

WSN传感器节点的能量供应问题是WSN的关键技术之一。由于大部分WSN传感器节点利用干电池供电,其本身不能自动补充能量或者得不到充分补充,从而影响WSN运行效率。为了减少设备的功耗,必须尽量减少设备的工作时间,增加设备的休眠时间,但是这样会增加设备处理数据信息时产生时延。同时,为了保证设备之间能够正常工作,每个设备周期性监听其无线信道,判断是否有需要自己处理的数据信息。所有这些使得在实际应用中必须对能耗和时延进行综合考虑,以获得它们之间的相对平衡。因此,为了延长网络中设备节点的生命周期,节约能量就成为WSN中MAC协议设计首要考虑的因素,通过设计IEEE 802.15.4 MAC协议中的超帧结构可为降低能耗提供方案。随着应用WSN环境对实时性和可靠性要求越来越高,时延性也成为WSN中MAC协议设计考虑的重要因素,IEEE 802.15.4 MAC协议中保护时隙(GTS)机制为此提供解决方案。

本文的主要工作是在分析IEEE 802.15.4 MAC协议基础上,设计一种GTS分配机制调度新算法,通过IEEE 802.15.4 MAC协议的超帧结构和保护时隙(GTS)分配机制的设计来平衡WSN中传感器节点能耗与时延问题。

1 IEEE 802.15.4 MAC协议分析

IEEE 802.15.4协议支持信标使能和非信标使能2种通信模式。信标模式实现网络中所有设备的同步工作和同步休眠,以达到最大限度的节省功耗,而非信标模式则只允许终端设备进行周期性休眠,协调器和所有路由设备必须长期处于工作状态。信标模式下提供了超帧结构和GTS分配机制^[2]。

1.1 超帧结构

超帧结构由网络中的主协调来定义,由网络信标来限定。超帧结构一般由激活区间和非激活区间两部分组成。图1给出了1个超帧结构实例。

激活区间称为超帧,它由16个长度相等的时隙组成,每个时隙的长度与超帧序号相关,信标间隙的长度与信标序号相关。超帧长度用 SD 表示,信标间隙用 BI 表示,超帧序号与信标序号分别用 SO 和 BO 表示。则 SD 和 BI 分别与 SO 和 BO 之间的关系可以用公式(1)表示。

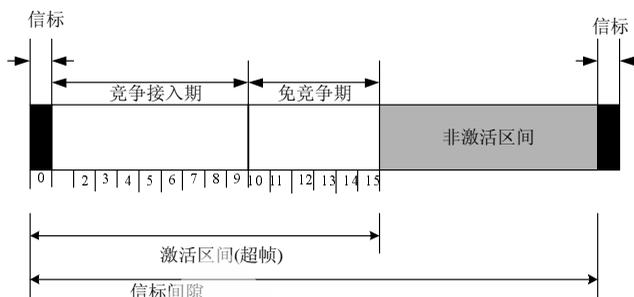


图1 超帧结构示意图

$$SD = asuperframeduration \times 2^{SO} \quad 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (1)$$

$$BI = asuperframeduration \times 2^{BO}$$

其中, $asuperframeduration$ 是IEEE 802.15.4协议定义的常量,表示超帧序号为0时,组成超帧的时隙符号数。

超帧由竞争接入期(CAP)和免竞争期(CFP)两部分组成。如果分配了保护时隙(GTS),则免竞争期(CFP)由GTS构成,每个GTS由1个或几个时隙组成;否则CFP长度为零。

在竞争接入期(CAP),各网络设备节点采用时隙的CSMA-CA机制访问信道,只有在当前时隙获得信道访问权限的节点才能在该时隙内进行发送或接收帧。在免竞争期(CFP),数据的传输不使用CSMA-CA机制。只要节点分配了GTS,则节点就可以在该GTS包含时隙内直接进行数据的传输。在非激活期内,节点进入休眠状态,以节省能耗。

1.2 GTS分配机制

设备节点要使用GTS进行数据传输,必须向网络中的PAN协调器进行申请,发送GTS分配请求命令,GTS请求命令帧的GTS特性域的特性类型子域设置为1(表示GTS分配),根据所需的GTS特性设置GTS时隙长度和方向。

PAN协调器接收到GTS请求命令帧,将发送确认帧,对接收进行确认。然后,PAN协调器根据CAP中所剩余的长度和请求GTS长度,检查在当前超帧中是否有足够的容量。如果没有达到保护时隙的最大数目(在1超帧中最多分配7个GTS),并且所需分配长度的GTS不会将CAP的长度减少到小于 $aMinCAPLength$ (IEEE 802.15.4规定的CAP最小长度)。只要PAN协调器能有效地提供足够的带宽,就会根据先来先服务(FIFS)的原则分配保护时隙。PAN协调器在信标帧中的GTS域说明GTS分配情况。设备节点在4个信标周期内,对接收到的信标帧的GTS域进行分析,判断是否被分配了GTS时隙。

1.3 GTS数据传输方式

数据以GTS方式进行传输,MAC层将判断是否存在1个有效的保护时隙。如果设备是1个PAN协调器,那么MAC层将判断协调器是否存在数据目的设备的接收保护时隙;如果不是PAN协调器,那么该设备MAC层将判断是否被分配了发送保护时隙。如果存在有效的

网络与通信 Network and Communication

保护时隙,MAC层将根据实际情况,产生一个延迟,直到该设备的有效接收保护到来,在保护时隙内,将数据发送到所指定的目标设备。这时,MAC层将以非CSMA-CA方式传输数据,整个传输和应答过程(如需要确认帧)应在该保护时隙内完成。

假设GTS时隙长度为 TS ,数据帧的传输时间为 T_{dae} ,帧间隙为 IFS (与数据帧的大小相关),确认帧的传输时间为 T_{ACK} ,则它们之间的关系满足如下关系式:

$$TS \geq T_{dae} + IFS + T_{ACK} \quad (2)$$

1.4 性能分析

参考文献[3]运用网络微积分理论(假设备节点业务量及传输曲线如图2所示)分析了星状网络中,节点以GTS方式进行数据传输时时延、能耗与SD之间的关系,其表达式为:

$$DC = \frac{SD}{D+n\lambda SD} \left(\frac{b}{T_{dae} \times C} + 1 \right), \lambda = 1/16 \quad (3)$$

式中, $DC=SO/BO$ 表示占空比, n 表示节点分配的GTS包含的时隙数, D 表示数据传输最大时延, T_{dae} 表示节点在GTS时隙内的数据传输时间, b 表示进行数据传输前的业务量, C 表示数据传输速率。

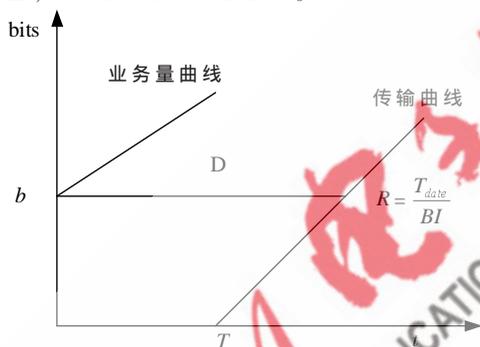


图2 GTS传输曲线

由式(3)可知,占空比越小, BO 越大,信标间隙越大,非激活区间越长,节点消耗能量越低。在其他参数一定的情况下, DC 与 D 成正比,即能耗与时延成反比。由(1)式可知, SD 与 SO 相关,所以能耗与时延受业务量和 SO 影响(T_{dae} 也受 SO 影响)。当业务量小时,在满足时延要求的情况下,能耗主要受 SD 影响, SO 较小,则能耗较低。当业务量较大时,则能耗受业务量影响较大。当占空比一定的情况下,时延受业务量和 SO 的影响,若 SO 和业务量较大,则时延也较大。 SO 和业务量较小时,则时延也较小。

在实时传输网络中,为了实现能耗与时延的均衡,在满足时延的情况下,为使设备能耗最小,必须根据设备业务量情况,调节 SO ,使 DC 最低。

2 GTS分配机制调度算法设计

为了实现GTS分配机制在实时网络应用时能耗与时延的相对均衡,由(3)式可知,必须根据设备节点的业务量和时延要求调节 SO 使占空比最小,从而使网络中

设备节点的能耗最低。但IEEE 802.15.4提供的先来先服务(FCFS)GTS分配机制不能满足这个要求。且由(2)式可知,设备进行数据传输实际需要的时隙可能比所分配的时隙要小,这就造成时隙的浪费,造成网络带宽的下降和影响其他设备对GTS的使用。参考文献[4]分析了设备以GTS方式进行数据传输时实际所需时隙及CFP中最多时隙与 SO 的关系,但当 $SO \geq 2$ 时,无论传输的数据帧有多大(IEEE 802.15.4中最大数据帧为133字节),只需要1个时隙。所以本文设计了一种新的GTS分配机制调度算法,称为时延优先TDP(Time Delay Priority)调度算法。该调度算法的基本思想是:在星状网络中,需要申请使用GTS的设备将自己的初始业务量 b 和时延期限 D 附在GTS请求命令帧中,发送给PAN协调器。PAN协调器最多给网络中设备分配1个时隙,同时被分配保护时隙的设备最大值与 SO 相关,且根据接收到的网络中设备的业务量和时延期限值,按照(3)式调节 SO 的值使占空比最低,其中 $n=1, T_{dae}=SD/16$ 。当有新设备节点加入星状网络或由设备已完成传输时,该调度算法由PAN协调器在发送下1个信标帧前调用。GTS分配机制TDP调度算法流程图如图3所示。

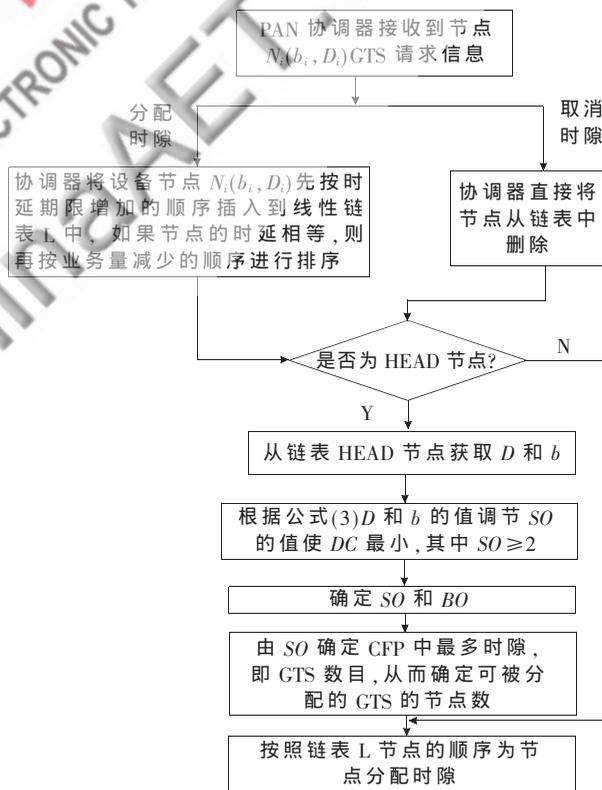


图3 GTS分配机制TDP调度算法基本流程图

3 仿真分析与小结

本文运用NS2^[5]仿真软件对TDP、GTS分配机制调度算法进行了仿真,仿真场景和仿真参数分别如图4和表1所示,各个节点的业务量和时延期限如表2所示。每次仿真,各节点分别以GTS方式向PAN协调器发送

表 1 部分仿真参数

| 参数 | 描述 | 值 |
|----------------|---------------|---------|
| aMinLIFSPeriod | 长帧间空隙时间的最小符号数 | 40 |
| aMinLIFSPeriod | 短帧间空隙时间的最小符号数 | 12 |
| aMaxFrameSize | MAC 帧的最大值 | 118 |
| initialEnngy | 初始能量 | 15 |
| rxpower | 发送功率 | 0.074 4 |
| txpower | 接收功率 | 0.033 |
| Idlepower | 休闲功率 | 0.001 |
| sleeppower | 睡眠功率 | 0.000 |
| C | 传输速率 | 250 |

表 2 节点的业务量和时延期限

| 节点 | b/KB | D/KB |
|----|------|-------|
| 1 | 12 | 1 800 |
| 2 | 3 | 1 200 |
| 3 | 2 | 1 000 |
| 4 | 10 | 1 600 |
| 5 | 7 | 1 400 |
| 6 | 1 | 900 |
| 7 | 4 | 1 200 |



图 4 仿真场景图

数据,重复传输 2 次,仿真运行 20 次。

本文采用 3 个参数对该 GTS 调度算法的性能进行评价:

(1)时延期限满足率 $TDR = \frac{\text{满足时延要求的节点数}}{\text{总的节点数}}$

(2)最大时延差 $L_{MAX} = (\text{实际时延} - \text{时延期限})$

(3)设备节点的剩余能量 $E_{剩}$,并与 IEEE 802.15.4 的先来先服务 (FCFS)GTS 分配机制的性能进行比较,其结果分别如图 5、图 6、图 7 所示。

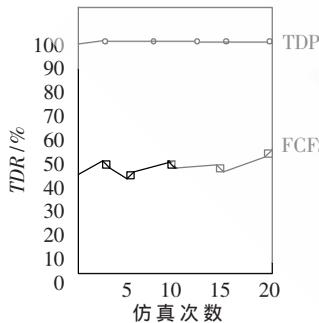


图 5 时延期限满足率(TDR)

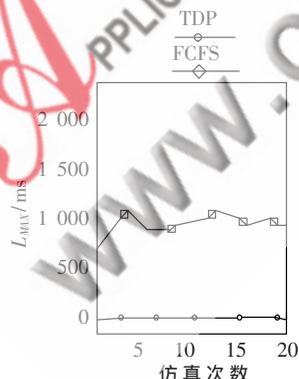


图 6 最大时延差(L_MAX)

由图 5 可知,TDP 调度算法的 TDR 为 100%,而 FCFS 的 TDR 比较低,TDP、GTS 分配机制调度算法的 TDR 比 FCFS 分配机制调度算法的 TDR 要高。这是因为 TDP 调度算法优先考虑了时延要求,在满足时延要求的情况下再进行 GTS 分配,而 FCFS 没有考虑这一点。由图 6 可知,采用 TDP 调度算法,节点能在规定时延范围内完成传输,而在 FCFS 则不能。这是因为 TDP 优先为

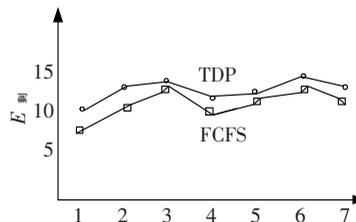


图 7 设备节点剩余能量

时延期限小的节点分配 GTS,且以节点最小时延期限为系统最大延迟,且每到 1 个节点传输完成时,重新进行调度,而 FCFS 没有进行调度。由图 7 可知,在 TDP 下,节点的剩余能量比 FCFS 偏多一些,是因为 TDP 调度算法在满足时隙要求情况下,调节占空比,使占空比最低,适当增加了节点的休眠时间,而 FCFS 调度没有考虑能耗问题。

本文在分析 IEEE 802.15.4 协议 GTS 分配机制基础上,提出了一种新的 TDP 调度算法。该调度算法对时延期限小的节点优先进行 GTS 分配且在满足其时延要求的情况下,根据业务量调节超帧结构中的 SO 和 BO,使设备节点能耗降到最低,实现设备能耗与时延的相对均衡,为促进无线传感网络在实时系统的应用具有参考意义。但目前该调度算法只适合于星状网络结构,使其适合其他网络拓扑结构仍需要进一步研究。

参考文献

- [1] IEEE 802.15.4 Standard-2003. Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs). IEEE-SA Standards Board, 2003.
- [2] 蒋挺,成林.紫蜂技术及其应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [3] KOU BAA A, ALVES M. Energy and delay trade-off of the GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for wireless sensor networks [J].International Journal of Communication Systems,2007(20):791-808.
- [4] PARDEEP K, MESUT G. Enhancing IEEE 802.15.4 for low-latency, bandwidth, and energy critical WSN applications[C]. ICET 2008. 4th International Conference on Emerging Technologies, 2008:146-151.
- [5] 徐雷鸣,庞博.NS 与网络模拟[M].北京:人民邮电出版社,2003.

(收稿日期:2009-07-15)

作者简介:

李明,男,1984 年生,硕士研究生,主要研究方向: ZigBee 无线通信与嵌入式系统。

周四清,男,1964 年生,博士(后),副教授,主要研究方向:智能信息处理、能源金融。