

IEEE 802. 15. 4 实时通信调度算法研究

胡显俊 陈建新 周生强 程 义

(南京邮电大学无线宽带通信与传感网络技术教育部重点实验室 南京 210003)

摘 要 IEEE 802. 15. 4 是低功耗无线通信媒体接入控制协议,目前已广泛应用于医疗健康、工业控制和楼宇自动化等物联网领域。为满足不同应用需求,研究者提出了多种适用于 IEEE 802. 15. 4 协议的实时通信算法。根据带宽利用率、延时约束和能效性等特征,对这些实时通信调度算法进行分类、比较和性能分析,以助于在实际应用中合理部署。另外,对未来的研究工作进行了展望。

关键词 无线传感网络,IEEE 802. 15. 4,GTS 分配,实时通信,综述

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Study on IEEE 802. 15. 4 Scheduling Algorithms for Real-time Communication

HU Xian-jun CHEN Jian-xin ZHOU Sheng-qi CHENG Yi

(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication & Sensor Network Technology,
Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract IEEE 802. 15. 4 protocol is a media access control protocol for low power wireless communication, which has been widely used in the internet of things field, such as medical health, industrial control, and building automation etc. In order to satisfy the real time requirement of different application, researchers have proposed a lot of IEEE 802. 15. 4 scheduling algorithms for real time communication. According to the bandwidth utilization, delay constraints, energy efficiency and other ability index, these algorithms for real time communication were classified, compared and analyzed to help for their deployment. In addition, the future work was prospected.

Keywords Wireless sensor network, IEEE 802. 15. 4, GTS allocation, Realtime communication, Survey

1 引言

21 世纪以来,随着低功耗微处理器和无线电技术的发展,更多低功耗、低成本和多功能无线传感器已经应用于家庭、农业和工业自动化。伴随着物联网应用的推广,出现了更多低功耗高速实时通信技术需求:如人体生理参数实时监测,工业环境中水文、管道以及灾害实时监测,基础设施如桥梁、楼宇建筑等质量监测^[1,2]。这类应用普遍采用低功耗无线通信技术,以较高频率采集和发送数据,从而对低功耗实时通信技术提出新的挑战。

无线传感网络的这些特点,使得传统的无线通信标准已经不能满足用户的需求。IEEE 802. 15. 4 标准因其介质访问控制子层(Media Access Control, MAC)的灵活性,采用保障时隙(Guaranteed Time Slot, GTS)媒体接入控制机制来提供实时保障传输,使其适合于无线传感器网络中高速实时通信。深入研究该协议的 GTS 实时通信调度算法是当前研究的热点。本文对目前该领域的 GTS 分配和调度算法进行了综述,基于每个改进算法的带宽利用率、延时约束、能效性等性能指标进行了总结、分类和比较,同时列出了算法的优缺点,并提出了一些意见和建议,为 GTS 实时通信调度算法的相关研究提供了参考。

2 IEEE 802. 15. 4 协议及其应用

2.1 IEEE 802. 15. 4 协议简介

IEEE 802. 15. 4 标准主要定义了物理层(PHY)和介质访问控制子层(MAC)。MAC 层主要支持两种模式:信标模式和非信标模式,在信标模式中设备通过超帧结构传输数据,超帧结构如图 1 所示,主要分为活跃和不活跃两个部分。在不活跃期间,节点进入休眠状态以节省能量。活跃期间由 3 个部分组成:信标阶段、竞争访问时段(Contention Access Period, CAP)和非竞争访问时段(Contention Free Period, CFP)。其中,信标阶段主要用于协调器周期性与设备进行同步;CAP 时段用于非实时应用需求,采用 CSMA/CA 机制降低无线信道传输数据时发生冲突的可能性;CFP 时段主要用于有延时约束的实时业务需求^[3]。

IEEE 802. 15. 4 标准采用 GTS 机制来提供实时保障传输,但是在高速实时数据传输应用中仍存在一定不足和局限性。首先,IEEE 802. 15. 4 标准中^[3-9],超帧的活跃期间划分为 16 个时隙,每个 GTS 可以由若干个时隙组成,最多只能分配 7 个 GTS。但是,当网络中节点数目多于能够分配的 GTS 数目时,协调器就会拒绝请求,从而导致该节点的数据无法及时发送,限制了 GTS 的使用率。其次,某些传输速率较小的

本文受国家自然科学基金(61201165),泛在无线通信和无线传感器网络教育部重点实验室开放课题项目(NYKL201306),江苏省高校自然科学基金(13KJB510026),同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室项目(ESSCKF201305)资助。

胡显俊(1990-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail: 1013010415@njupt.edu.cn;陈建新(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线可穿戴计算;周生强(1991-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;程 义(1990-),男,硕士生,主要研究方向为云计算。

3 GTS 实时通信调度算法的分类

目前基于 IEEE 802.15.4 的 GTS 实时通信调度算法的改进研究从不同角度可以分为静态算法和自适应算法,如图 4 所示,根据算法的不同性能指标等特点又可细分为带宽利用率和延时约束的相关研究、能效性的相关研究以及其他综合的相关研究。

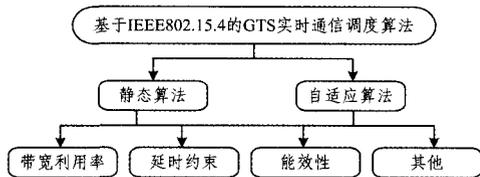


图 4 GTS 通信调度算法的分类

3.1 静态算法

静态算法是指在通信调度之前制定好调度策略,调度过程中按照预先分配的策略进行调度,不考虑当前网络、节点或链路的实际负载情况及其他因素,即调度不随着当前网络实时状态而变化,算法实现简单、调度快捷。

3.1.1 带宽利用率和延时约束

基于信标使能的 IEEE 802.15.4 无线传感网络中,GTS 最多只能同时分配给 7 个设备节点;其次,设备节点可能只需要传送很少的数据导致分配给该节点的 GTS 时隙得不到充分利用而造成浪费。为了解决这 2 个问题,Koubaa 等使用网络微积分的方法研究了 GTS 分配的带宽利用率和时延问题^[1,20,21],提出了一种隐式的 GTS 分配算法,即 i-GAME 算法。算法根据网络中各节点的数据传输量和时延要求等信息,实现网络中不同节点对同一信标周期中相同 GTS 的共享,即动态地把 GTS 时隙分配给不同节点,与标准分配算法相比,其带宽利用率提高了约 30%。但是,i-GAME 算法仍然存在一定的局限性,首先不能够保证一个 GTS 时隙的延时是否小于信标的长度;其次,如果发送 GTS 请求设备的数量显著增长,设备在 CAP 期间传输 GTS 请求的几率将会减少,而且该算法只适合数据到达速率较小的情况。

文献[22]提出一种称为 16-mts 的 GTS 时隙分配算法,将标准协议的保障时隙划分为 16 个等长的微小时隙,降低一个单位时隙的长度,让不同的设备在相同周期内共享带宽,将 CFP 中带宽资源浪费最小化,使得 GTS 时隙的带宽利用率提升了 30% 以上,同时能够保证帧格式的完整性。但是,该算法没有考虑当数据到达速率达到 GTS 带宽界限时所产生的异常情况,而且对于不同流模型的有效性还需要进一步的研究和验证。

许多关于 GTS 分配算法的研究考虑的时延约束通常须大于一个帧长,而对于时延约束要求比较严格的应用,如体域网应用中的高速运动、人体实时生理参数的监测等^[16],数据采集速率高达几十赫兹,上述的 GTS 分配算法已经无法适用。基于此,Chen 等提出了一种 EGSA 算法^[23],通过最大化 CFP 长度并将单位时隙进一步划分为更短的微小时隙,来支持多节点、周期性、有延时约束的应用。仿真结果显示,算法的带宽利用率和延迟约束性能较 i-GAME 和 16-mts 算法有显著提高,其中 EGSA 算法的带宽利用率可以达到 90% 左右。

通过对上述几种算法带宽利用率的分析和比较,结果如图 5 所示,EGSA 算法由于采用了微小时隙,带宽浪费较少,

利用率最高。与标准的分配算法相比,i-GAME 算法和 16-mts 算法也显著地提高了带宽利用率。此外,与 i-GAME 算法相比,16-mts 算法拥有相同的带宽利用率,但是延时约束却更小,而且因为其保持了 GTS 帧格式的完整性,也更容易实现^[24]。EGSA 算法也有其使用范围,即主要解决多节点、同周期的高速实时任务传输,但并不适合多节点、不同周期或非周期的高速实时任务传输。

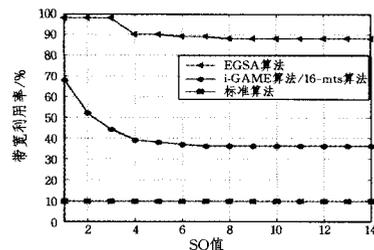


图 5 不同算法的带宽利用率对比

3.1.2 能效性和其他

无线传感网络中 GTS 实时通信调度算法的研究不仅局限于延时约束和带宽利用率的相关研究,无线传感器节点的能效性和算法的其他性能指标也是无线传感器网络中的研究热点。

文献[25]提出一种预分配的方法来进行 GTS 实时通信调度,即 CT 算法,其减少了 CSMA/CA 中控制数据包的数量。随着控制数据包数量的减少,能耗和传输的延时都会相应降低。实验结果显示,与标准的 GTS 分配算法相比,数据包的平均延时和平均能耗降低了约 40% 左右。但是,算法没有考虑流量的特性而是完全依赖于物理的设置,对于流量不均衡的情况势必会导致较高的带宽浪费。

为了进一步降低能耗,Han 等人提出 EE 算法^[26],假设有 N_i 个节点周期性地产生数据,最大允许的延时是 Φ ,数据的长度为 L ,数据的传输周期是 T ,并且每个节点数据传输的周期 T_i 必须小于延时 Φ_i 。EE 算法的主要思想就是最小化传输的数量从而优化能源消耗,所以每个数据传输的周期设置为最大值 T_{max} , T_{max} 又可以划分为 K_{max} 个时隙,每个时隙的长度为 T_{min} ,所以第 i 个节点每隔 K_i 个时隙传输数据,因此能够降低因活跃期间传输而导致的能量浪费。但是,EE 算法没有进行仿真测试,没有具体指出与标准的 GTS 分配算法相比降低了多少能耗。

考虑到紧急数据传输的特性, Lee 等人^[27] 基于 IEEE 802.15.4 簇状树的结构提出一种 GTS 分配算法,增加一个紧急数据传输区域 EDG。当设备节点处有紧急数据需要发送时,将紧急类型设为 1,然后通过专用的 EDG 发送数据。每个设备节点发送数据之前都将检查紧急类型为 1 还是 0,所以这种机制的最大好处是在 GTS 分配中考虑了紧急数据的处理情况。文献[28]使用了 Opnet 仿真,结果显示,紧急数据传输的延时和数据包的吞吐量较于标准算法有了一定的提高。但是,算法没有考虑当整个簇状树请求 EDG 传输数据时,紧急数据传输的可靠性如何保证。此外,算法将数据放在簇状群的开头,传输导致的性能开销和能耗也是需要进一步考虑的。

3.2 自适应算法

静态算法较容易设计,在简单网络中工作良好,但是由于不能动态地对网络做出反馈,通常被认为不适用于大型、易变

的网络。IEEE 802.15.4 标准协议使用 GTS 机制提供实时保障传输,这种特性非常适合实时连续的流量。但是,当节点到达速率和流量特性不断变化时,标准 GTS 机制由于其“FCFS”策略以及被动的释放机制等具有一定的局限性。采用自适应算法,能够根据节点和流量的实时特性,动态地分配 GTS,充分利用保障时隙,提高网络的性能。

3.2.1 带宽利用率和延时约束

为此,文献[29]提出了一种自适应的 GTS 实时分配算法,即 ART-GAS 算法,其根据设备发送数据的重要性、实时性以及过去传输的反馈来综合决定设备的优先级大小,为不同优先级的设备提供不同的服务,从而为高速实时数据传输提供了保障。并使用 OMNET++ 对算法进行了仿真分析,结果显示,ART-GAS 算法在传输的成功率、平均等待时间、平均时延以及带宽利用率等方面都有显著提高。而文献[30]提出的 VRA 算法,则是基于传输数据流的当前到达速率、延时需求以及网络的反馈情况等特性,动态地重新分配 GTS 的带宽。仿真结果显示,VRA 算法与“FCFS”分配策略相比,带宽利用率提升约 20%,而且算法对标准协议的改动较小,实现简单,十分容易在实际系统中实现。

Ho 等人提出的 MFDGAS 算法结合多种因素动态地分配 GTS 时隙^[31]。算法根据设备请求的 QoS 参数(包括传输数据的大小、最大允许延迟时间和 GTS 的使用率)来综合决定 GTS 请求的优先级,协调器根据每个设备的优先级动态地分配 GTS 时隙。MFDGAS 算法减少了带宽资源的浪费,并且网络的吞吐量提高了约 30%。但是,因为每次动态递归地计算每个 GTS 请求的优先级,引入了计算开销,降低了性能。而文献[32]提出一种 EDF(Earliest Deadline First)算法,将 GTS 分配给众多设备节点中期限或延迟最短的,很好地解决了时延问题,但是会增加有延迟约束的事件突发性传输的负载。

3.2.2 能效性和其他

IEEE 802.15.4 协议定义的超帧结构可用的 GTS 时隙数限制为 7 个,并且随着 SO 值的增大带宽浪费增多。文献[33]提出一种自适应 GTS 分配算法,延长超帧的结构,增加 GTS 的数量。通过修改超帧的结构,降低 CFP 中时隙的长度可以使许多设备的带宽分配更加精确,减少了设备的信道资源浪费并且支持 QoS 保证。

文献[34]为了解决设备部分使用 GTS 时隙导致带宽浪费的问题,提出了 PEGAS 算法,对设备发送的 GTS 请求根据 SO 值、数据包的长度和数据到达速率,精确计算出 GTS 的起始时间、结束时间和长度,降低了超帧中的 CFP 长度。通过 Castalia 对算法仿真,结果表明,PEGAS 算法在吞吐量、能效性、延时等性能上,较 IEEE 802.15.4 标准都有了显著的提高。而 Huang 等提出的 AGA 算法^[35],虽然提高了 GTS 调度算法的延迟性能和公平性,但是却没有考虑任何机制来提高 GTS 时隙的带宽利用率。

在车辆通信网络中,文献[15]基于不同服务的延迟需求、数据包的到达速率,以及车辆的移动性提出了实时轮询调度 TS-WRR 算法,并使用 Matlab 和 Opnet 对算法进行了仿真和数据分析,结果显示,TS-WRR 算法能够保证理想的信息丢失率,适合于车辆传感网络中的车辆接入访问调度。但是,如

何寻找一个最佳模型让调度算法快速收敛以及如何考虑车辆进入或离开路边单元无线电射程临界区域的 GTS 分配是进一步需要解决的问题。

4 性能分析

根据不同的性能指标,对上述算法进行了对比分析,主要包括算法分配类型是显示或隐式、算法是否能够降低延时约束、带宽利用率是否得到提高、算法是否对不同的数据流进行验证、网络的拓扑结构是星形拓扑或簇状拓扑、算法是否能够降低能耗等^[36-40],结果如表 1 所列。

表 1 不同 GTS 算法的参数性能比较

算法	类型	延迟	带宽	流量	能耗	开销	拓扑结构
FCFS ^[36]	显示	否	否	-	-	-	星形
iGAME ^[20]	隐式	是	是	是	否	高	星形、簇状
PEGAS ^[34]	显示	是	是	否	是	高	星形
16-mts ^[22]	显示	否	是	否	否	中	星形
EGSA ^[23]	显示	是	是	是	否	中	星形
EDF ^[32]	显示	是	否	否	否	中	簇状
CT ^[25]	显示	是	是	否	是	高	簇状
EE ^[26]	显示	是	是	否	是	高	星形
AGA ^[35]	显示	是	否	是	否	高	星形
MFDGAS ^[31]	显示	是	是	是	否	高	星形
EDG ^[27]	显示	否	否	否	否	低	星形
TS-WRR ^[15]	显示	是	是	是	否	高	星形

类型:i-GAME 算法是唯一的隐式算法,而表 1 中其他的算法都是显示的,即当一个 GTS 时隙分配给设备时,GTS 时隙一直保留直到其发送释放请求。

延时:i-GAME 算法、GAS 算法重点考虑了时延问题,延时比较理想;CT 算法则通过降低控制数据包的交换降低了延时。AGA 算法没有考虑延时约束,但是仿真结果显示其延时较低。EGSA 算法的延时是根据微小时隙决定的,而 MFDGAS 算法根据 3 个因素决定优先级大小,其中延时时间比率就是考虑每个设备的延迟因素,因此延时也比较理想。其他的算法如 16-mts 算法、EDG 算法等都没有考虑算法的延时约束。

带宽:与标准算法相比,i-GAME 算法由于隐式特点带宽利用率较高。EGSA 算法由于采用了微小时隙,带宽浪费较少,利用率较高。EDG 算法没有说明无紧急情况时,紧急时隙是否能够给其他数据传输使用,如果不能,则浪费较多。CT 算法通过降低 CAP 中控制数据包加入到 CFP 中的数量,使带宽利用率增高,但是其采用的预分配策略可能会导致部分带宽的浪费。AGA 算法、GAS 算法没有考虑 GTS 分配中的带宽因素,浪费较多,而 EE 算法、PEGAS 等其他算法都显著地提高了带宽利用率。

流量:i-GAME 算法与 EGSA 算法在调度时考虑了流量特性,但是并没有对不同的数据流进行验证和性能分析,如周期性、非周期性、突发性等。MFDGAS 算法仅仅对泊松分布的流量特性进行了评估,但是其由于根据不同因素综合决定其优先级,因此能够在不同流量特性中工作良好,而表 1 中其他算法都没有对不同的流特性进行验证和分析。

能耗:表 1 中只有 CT 算法和 EE 算法考虑了算法的能效性,其他的算法都没有真正考虑如何降低能耗或者资源的浪费。CT 算法通过降低网络中不同设备交换的控制包的数量

降低了能耗,而EE算法主要是通过分发数据的传输从而达到最佳的能源效率。

性能开销:i-GAME算法因为要在调度之前计算数据到达速率和保障的带宽,需要大的计算处理能力,开销较大,但是没有多余的内存开销。GAS算法需要检查每个传输的可行性、分配和再分配的过程,也需要较大计算处理能力。16-mts算法和EGSA算法的性能开销是中等的,而AGA算法也是中等的,只需要根据前一个GTS的使用情况计算其优先级,但是需要消耗更多的内存去存储每个设备的GTS使用情况。EDG算法计算处理能力小,但是需要改变GTS数据包格式。EE算法需要大的计算处理能力,因为其需要对协调器、路由器和设备运行不同的算法。而MFDGAS算法需要动态地计算不同GTS请求的各种因素综合决定其优先级,计算处理开销较大。

拓扑带宽结构:i-GAME算法定义了星形和簇状树的拓扑结构,EDG算法和CT算法是簇状的树形拓扑,其他的算法都是星形的拓扑结构。

结束语 本文对无线传感网络中基于IEEE 802.15.4中GTS实时通信调度算法的众多研究方案进行了综述,讨论了不同算法的改进研究,并根据不同的性能指标,如带宽利用率、延时约束、能效性等进行了分类总结和比较,并同时分析了一些算法的优缺点,这些改进算法对整个网络的性能都有了较大的提高。通过对每个改进算法优点以及不足之处的分析,发现许多算法在某些方面表现良好,但是在其他方面性能较低,这为进一步研究提供了空间。此外,目前大部分研究是基于星形拓扑的,对基于簇状的树形结构以及对等的网络结构的研究还需要进一步探索。

参考文献

[1] Koubaa A, Alves M, Tovar E. Gts allocation analysis in IEEE 802.15.4 for real-time wireless sensor networks[C]//Proc of 14th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems. Island of Rhodes, Greece; IEEE, 2006; 25-29

[2] Bharat S, Ekram H, Sergio C. IEEE 802.15.4 MAC With GTS Transmission for Heterogeneous Devices With Application to Wheelchair Body-Area Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2011, 15(5): 767-777

[3] IEEE 802.15.4 standard: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)[R]. October 2003; 1-133

[4] Lu Y, Shen Z. A New GTS Allocation Schemes For IEEE 802.15.4[C]//2012 5th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI). IEEE, 2012; 1398-1401

[5] Na C, Yang Y, Mishra A. An optimal gts scheduling algorithm for time-sensitive transactions in IEEE 802.15.4 networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(13): 2543-2557

[6] Ko L, Chou Z. A novel multi-beacon superframe structure with greedy GTS allocation for IEEE 802.15.4 wireless pns[C]//Proc. of IEEE Wireless Communication & Networking Conference (WCNC). 2007; 2328-2333

[7] Xu Ying, Ye Zheng, Gao Xu, et al. Study on Medium Access

Control Protocol in Wireless Sensor Networks[C]//2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM). March 2012; 663-666

[8] Lee D-H, Roh H-T, et al. Performance Analysis of the IEEE 802.15.4 MAC Protocol[C]//2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC). 2013; 398-401

[9] 卜翔, 章韵, 陈建新. IEEE 802.15.4 支持高速实时数据传送算法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 3(4): 14-18

[10] Tuomas P, Juha-Pekka M, Jari I. Enhancing the IEEE 802.15.4 MAC with Dynamic GTS Allocation for Medical Applications [C]//2011 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). Oct 2011; 1-5

[11] Lei X, Choi Y-H. GTS Allocation for Emergency Data in Low-Rate WPAN[C]//2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE, 2012; 792-793

[12] 谢琦, 王磊, 胡俊. 基于 IEEE 802.15.4 的 GTS 调度算法优化[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(11): 3642-3645

[13] 洪涛. 体域网结构及信道特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012

[14] 张瑞. 基于 ZigBee 的人体健康监测系统设计[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2014

[15] Chen Chen, Wei X, et al. A Delay Sensitive Time Slots Scheduling in Vehicular Sensor Networks[C]//2013 5th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS). IEEE, 2013; 448-455

[16] 卜翔. 基于 IEEE 802.15.4 的实时通信系统调度研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013

[17] 徐晓丽. 工业现场传感数据无线传输技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013

[18] 姚忠孝. 基于无线传感器网络的楼宇能耗监测系统研究与实现[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010

[19] 常君锐. 基于 ZigBee 的楼宇自动监测系统网络设计[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014

[20] Koubaa A, Alves M, Tovar E. i-GAME: an implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for time-sensitive wireless sensor networks[C]//Proc of the 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems. Dresden, Germany; IEEE, 2006; 183-192

[21] Koubaa A, Alves M, Tovar E. Energy and delay trade-off of the gts allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for wireless sensor networks; Research articles[J]. Communication Systems, 2007, 20(7): 791-808

[22] Liang C, Bourgeois A G, Xin Z. A new GTS allocation scheme for IEEE 802.15.4 networks with improved bandwidth utilization[C]//International Symposium on Communications and Information Technologies, 2007 (ISCIT 07). IEEE, 2007; 1143-1148

[23] Chen Jian-xin, Ferreira L, Tovar E. An Explicit GTS allocation algorithm for IEEE 802.15.4[C]//2011 IEEE 16th Conference Proc of Emerging Technologies & Factory Automation (ET-FA). Toulouse; IEEE, 2011; 1-8

[24] Liang C H, Bourgeois A G, Xin Z. A performance comparison study of GTS allocation schemes in IEEE 802.15.4[C]//Future Generation Communication and Networking (FGCN 2007). 2007; 356-361

(下转第 241 页)

- [2] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proc of the 33 rd Annual International Conference System Sciences. 2000(2):1-10
- [3] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [4] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing[C]//Proc of 7th Annual Int. Conf on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy: ACM Press, 2001: 70-84
- [5] Neamatollahi P, Taheri H, Naghibzadeh M. DESC: distributed energy efficient scheme to cluster wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 9th IFIP TC 6 International Conference. Vilanova Geltru on Wired/Wireless Internet Communications. , Spain, 2011: 234-246
- [6] Xuefei T, Xinzheng N, Shahzad A. Research on energy aware-topology strategy based on wireless sensor in internet of things [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2014, 7(6): 1137-1147
- [7] Dabirmoghaddam A, Ghaderi M, Williamson G. On the optimal randomized clustering in distributed sensor networks[J]. Computer Networks, 2014, 59: 17-32
- [8] Zeghlache D, Jouaber B, Slama I. Topology control and routing in large scale wireless sensor networks[J]. Wireless Sensor Network, 2010, 2(8): 584-598
- [9] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid energy efficient, distributed clustering approach for adhoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [10] Javad Akbari T. An energy-efficient topology construction algorithm for wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2013, 57(7): 1714-1725

(上接第 226 页)

- [25] Huang D, Chung H U, et al. A Cluster-Tree-Based GTS Allocation Scheme for IEEE 802. 15. 4 MAC Layer[C]//2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing(IMIS). IEEE, 2012: 524-528
- [26] Han S, Lee Y, et al. GTS Allocation Scheme of IEEE 802. 15. 4 for Energy-efficiency[C]//International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology, 2009 (CNMT 2009). IEEE, 2009: 1-4
- [27] Lee H, Lee K, Shin Y. A GTS allocation scheme for emergency data transmission in cluster-tree WSNs[C]//14th International Conference on Advanced Communication Technology(ICACTION). 2012: 675-678
- [28] Jurcik P, Koubaa A. IEEE 802. 15. 4 OPNET simulation model [OL]. <http://www.open-zb.net>
- [29] Xia Feng, Hao Ruo-nan, Cao Yang, et al. ART-GAS: An Adaptive and Real-Time GTS Allocation Scheme for IEEE 802. 15. 4 [C]//AINTEC'11. New York: ACM, November 2011: 96-103
- [30] Zhang H, Xin S, et al. An Adaptive GTS Allocation Mechanism in IEEE 802. 15. 4 for Various Rate Applications[C]//Fourth International Conference on Communications and Networking in China, 2009(ChinaCOM 2009). IEEE, 2009: 1-5
- [31] Ho C, Lin C, et al. Dynamic GTS Allocation Scheme in IEEE 802. 15. 4 by Multi-Factor[C]//2012 Eighth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing(IIH-MSP). IEEE, 2012: 457-460
- [32] Buttazzo G C. RateMonotonicvs. EDF: JudgmentDay [J]. Real-Time Systems, 2005, 29: 5-26
- [33] Hong Y, Center S R, et al. Adaptive GTS Allocation scheme to support QoS and multiple devices in 802. 15. 4[C]//11th International Conference on Advanced Communication Technology, 2009(ICACTION). 2009, 3: 1697-1702
- [34] Rasyid M U H A, Lee B-H, Sudarsono A. PEGAS: Partitioned GTS Allocation Scheme for IEEE 802. 15. 4 Networks[C]//2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications(IC3INA). Nov. 2013: 29-32
- [35] Huang Y, Pang A, Hung H. An Adaptive GTS Allocation Scheme for IEEE 802. 15. 4[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(5): 641-651
- [36] Cho H W, Bae S J, et al. Utilization-Aware Dynamic GTS Allocation Scheme in IEEE 802. 15. 4[C]//2010 16th Asia-Pacific Conference on Communications(APCC). Oct 2010: 210-214
- [37] Huang Y, Pang A, Kuo T. AGA: Adaptive GTS allocation with low latency and fairness considerations for IEEE 802. 15. 4[C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC). volume 9, Istanbul, Turkey, Jun. 2006: 3929-3934
- [38] Semprebom T, Montez C, Zomer G, et al. Guaranteed Time Slot Allocation for Periodic Messages with(m, k)-firm Constraints in IEEE 802. 15. 4 Networks[C]//2012 IEEE 17th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Sept 2012: 1-8
- [39] Koubaa A, Alves M, Tovar E. IEEE 802. 15. 4 for wireless sensor networks; Technical overview: TR-050702[R]. IPP Hurray, July, 2005
- [40] Sharath R, Saksham K, et al. A Survey and Comparison of GTS Allocation and Scheduling Algorithms in IEEE 802. 15. 4 Wireless Sensor Networks[C]//2013 IEEE Conference on Information & Communication Technologies(ICT). IEEE, 2013: 98-103
- [41] 蔡惠娟, 蒋文贤. IEEE 802. 15. 4 多时隙下 GTS 性能分析及配置优化[J]. 计算机应用, 2012, 32(12): 3499-3504
- [42] 张文强. IEEE 802. 15. 4 协议中 GTS 分配机制的研究和改进[D]. 广州: 暨南大学, 2013
- [43] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [44] 乔冠华, 毛剑琳, 郭宁, 等. 基于业务区分的 IEEE 802. 15. 4 协议分析及改进[J]. 计算机科学, 2014, 41(10): 149-153