

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.020

引用格式:孙鹏,李光明,汪付强,等.无线传感网混合类 MAC 协议研究综述[J].电讯技术,2016,56(12):1417-1424. [SUN Peng, LI Guangming, WANG Fuqiang, et al. A survey of hybrid MAC protocols for wireless sensor networks[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12):1417-1424.]

无线传感网混合类 MAC 协议研究综述*

孙 鹏^{1,2,3}, 李光明^{**1}, 汪付强^{2,3}, 庞 泳^{2,3}

- (1. 山东大学(威海)机电与信息工程学院, 山东 威海 264209;
2. 山东省计算中心(国家超级计算机济南中心), 济南 250014;
3. 山东省计算机网络重点实验室, 济南 250014)

摘 要:在无线传感网(WSN)体系结构中,介质访问控制(MAC)协议负责调配网络中节点的信道接入,具有保障网络高效通信的重要作用。混合类 MAC 协议综合了竞争类 MAC 协议以及调度类 MAC 协议的特点,在融合两种机制的优点的同时克服其缺点,为无线信道资源的分配提供了更加灵活和全面的策略。首先概述了无线传感网 MAC 协议设计要点及分类,然后重点分析了无线传感网中经典的混合类 MAC 协议及国内外前沿的研究进展,并进一步归纳对比了各协议运行机制、性能及不足,得出混合类 MAC 协议的应用相关性及差异性的结论,最后总结了无线传感网混合类 MAC 协议研究现状并指出了未来的研究重点,以期对相关领域的研究人员提供参考。

关键词:无线传感网;MAC 协议;混合类 MAC 协议;研究进展
中图分类号:TN915.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)12-1417-08

A Survey of Hybrid MAC Protocols for Wireless Sensor Networks

SUN Peng^{1,2,3}, LI Guangming¹, WANG Fuqiang^{2,3}, PANG Yong^{2,3}

- (1. School of Mechanical, Electrical and Information Engineering, Shandong University(Weihai), Weihai 264209, China;
2. Shandong Computer Science Center, Jinan 250014, China;
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Networks, Jinan 250014, China)

Abstract: In wireless sensor network(WSN) architecture, media access control(MAC) protocol plays an important role in the deployment of wireless channel for network nodes and ensuring effective communication. Hybrid MAC protocol is a combination of contention based and schedule based MAC protocol and this hybrid mechanism can benefit from the merits of both schemes while mitigating their drawbacks. As a result, it provides with a more flexible and comprehensive strategy for wireless channel resource's allocation. Firstly, this paper introduces the design essentials and classifications of MAC protocols, and then analyzes some classical and cutting-edge research on hybrid MAC protocols in detail. Secondly, it compares the mechanism, performance and drawbacks of these different protocols, and the feature of application relativity and diversity. Finally, it summarizes the status of current research and open research issues on hybrid MAC protocol design. The information in this paper can provide reference for those engaged in related field.

Key words: wireless sensor network(WSN); MAC protocol; hybrid MAC protocol; research progress

1 引 言

近年来,随着微电子技术、微传感器技术、无线

通信技术的进步,集信息采集、处理、无线传输于一

体的无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)

* 收稿日期:2016-04-06;修回日期:2016-06-30 Received date:2016-04-06;Revised date:2016-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61501282);山东省科学院基础研究基金(2015[4]);山东省重点研发计划(2015GSF120003)

Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No.61501282);The Basic Research Fund of Shandong Academy of Sciences(2015[25]);The Key Research and Development Plan of Shandong Province(2015GSF120003)

** 通信作者:gml@sdu.edu.cn Corresponding author:gml@sdu.edu.cn

得到迅速发展。WSN 由区域内一组具有感知、计算和通信能力的传感节点构成,它通过节点上的传感器获取环境信息并通过多跳的方式将数据汇集到汇聚节点,从而实现全面、有效的环境监测。WSN 技术广泛地应用于国防军事、环境监测^[1]、空间探索、灾难预警、智能家居等领域,具有广阔的发展前景。

在无线传感网络体系结构中,介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议调配网络中节点的信道接入,在传感器节点之间分配有限的无线通信资源,对网络整体性能有直接影响。根据信道访问策略的不同,MAC 协议分为基于竞争的 MAC 协议、基于调度的 MAC 协议以及混合类 MAC 协议^[2]。混合类 MAC 协议结合了竞争和调度两种策略,能有效地提高网络整体性能,是无线传感网 MAC 协议研究的热点方向之一。

本文在第一节对无线传感网 MAC 协议设计的要点及分类进行简要介绍,第二节详细分析了经典的混合类 MAC 协议及近年来国内外最新研究进展,第三节对涉及的部分协议的性能和特点进行了归纳对比,最后总结混合类 MAC 协议的研究现状并指出未来的研究方向。

2 无线传感网 MAC 协议概述

2.1 无线传感网 MAC 协议设计要点

同其他无线网络类型相比,WSN 中节点通常受能量、存储、计算和通信带宽等资源的限制,单个节点的处理能力相对较弱,WSN 强大功能的实现需依托于网内传感节点相互间的密切协作,因而对无线传感网 MAC 协议的设计提出更高的要求。在协议设计时,应着重考虑以下几个方面:

(1)能量有效性。在多数情况下,WSN 工作在无人值守的环境中,电池能量通常难以及时补充,因而能量高效的 MAC 协议对节省节点能量延长网络生存期有着重要意义。在网络通信过程中,MAC 协议应尽可能降低各方面能耗,如规避冲突和串音以降低额外能耗、降低占空比以减少空闲侦听阶段能耗,同时最小化协议自身开销以降低协议运行带来的能耗。

(2)自适应性。WSN 中节点的死亡和加入以及节点的移动都将引起网络规模、拓扑及节点密度的动态变化,良好的 MAC 协议应具备适应这种变化的能力以保障网络性能的稳定。

(3)整体性能优化。在 WSN 网络中,能量有效性一般具有最高的优先级,但基于网络的特点及需

求,需综合考虑其他性能要求,如延迟、吞吐量、丢包率、带宽利用率等^[3]。在设计 MAC 协议时,过于追求单一性能的优化往往达不到网络整体性能的最优化,各性能间的平衡比单一性能更重要。

(4)分布式算法。传感器节点能量、存储及计算能力有限,MAC 协议仅依托于若干节点往往会导致节点因能耗过大而过早死亡;另外,节点有限的资源难以支撑协议的实现。MAC 协议运行分布式算法可利用众多节点协调完成应用任务,网络性能不因个别节点的失效而显著降低。

在进行无线传感 MAC 协议设计时,在基于以上原则的前提下,应根据应用的具体要求及侧重点在各方面达到较好的平衡。例如:在某些条件下,MAC 协议在采取能量高效性策略的同时,需兼顾应用对实时性及传输可靠性的要求,单纯的节省能量可能带来其他性能的降低,对改善系统的整体性能而言得不偿失。

2.2 无线传感网 MAC 协议分类

无线传感网 MAC 协议按不同标准有多种分类方式,其中根据信道访问方式的不同,无线传感网中 MAC 协议划分为基于竞争的、基于调度的以及混合类的 MAC 协议^[2]。

基于竞争的 MAC 协议常采用载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)机制,基本思想是按需使用信道。当节点有数据发送时,通过竞争获得信道使用权。当数据发生冲突时,则遵照某种策略重新发送数据,直至发送成功或放弃发送。竞争类 MAC 协议对节点间时钟同步要求较低,可扩展性好,协议复杂度低。典型的竞争类 MAC 协议有 S-MAC^[4]、T-MAC^[5]等。

基于调度的 MAC 协议多采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)机制^[6]。基本思想是基于某些策略为不同节点分配不同时段,节点可在分配时段内独占信道从而无竞争地传输数据以避免冲突。典型的调度类 MAC 协议有 TRAMA 协议^[7]、DMAC 协议^[8]、DEANA 协议^[9]等。

基于竞争的 MAC 协议在低网络负载下有较好的性能,然而当网络负载增加时,传输冲突的可能性也随之增加,进而造成数据包频繁发生碰撞,网络吞吐量降低,同时协议中的退避机制也将增大网络时延。基于 TDMA 的调度类 MAC 协议提供了一种免碰撞接入的机制,但却面临低负载时吞吐量低以及时段浪费的问题,同时网络对节点的时钟同步有严格要求,对网络拓扑变化不敏感,可扩展性差。

混合类 MAC 协议综合竞争类和调度类协议的

要素,旨在保持各协议优点的同时克服其缺点。当网络状态改变时,混合类 MAC 协议表现为以某类协议为主,其他协议为辅的特性,能更好地适应网络状态的变化,更有利于网络的全局优化。然而,由于结合了竞争和调度两种机制,混合类 MAC 协议相对比较复杂,在设计时应当在保障协议性能的前提下尽可能降低协议复杂度和运行开销,以提升协议的高效性。

竞争类、调度类及混合类 MAC 协议的优缺点总结见表 1。

表 1 无线传感网 MAC 协议分类对比		
Tab. 1 Comparisons among different MAC protocols		
协议类型	优点	缺点
竞争类 MAC	复杂度低,可扩展性好,时钟同步要求低	高负载碰撞率高,重传次数多,延迟大
调度类 MAC	无竞争使用信道,避免冲突	时钟同步要求高,可扩展性差,低负载吞吐量低,时隙浪费
混合类 MAC	适应网络状态变化动态调整策略	协议复杂度较高开销较大

3 WSN 混合类 MAC 协议分析

近年来,不少学者和科研机构根据 WSN 的特点和需求设计并改进了混合类 MAC 协议。表 2 对已命名的混合类协议进行了归纳。从中可对混合类 MAC 协议的研究进程有直观的了解。本节对部分具有代表性的协议及近期提出的协议的核心机制、特点及优缺点分别进行重点分析研究,同时对于未命名的但具有重要研究意义的其他混合类 MAC 协议也有所涉及。

表 2 混合类 MAC 协议研究进展	
Tab. 2 Research progress of hybrid MAC protocols	
时间/年	协议名称
2005	Z-MAC, u-MAC
2006	Funneling-MAC, SCP-MAC
2007	A-MAC, A ² -MAC, CH-MAC, HY-MAC
2008	TH-MAC, CR-MAC, EQ-MAC, EZ-MAC, MA-MAC
2009	Eu-MAC, STC-MAC
2010	Au-MAC, ER-MAC,
2011	IH-MAC, EH-MAC
2012	I-ZMAC, EEH-MAC, Queue-MAC IEEE802. 15. 4e
2013	CH-MAC, iQueue-MAC
2014	AS-MAC, LH-MAC, TC ² -MAC, HTC-MAC, HMC-MAC
2015	TR-MAC, eQueue-MAC, pQueue-MAC

3.1 经典混合类 MAC 协议

本小结选取 Z-MAC、Funneling-MAC、IEEE802. 15. 43 3 种经典混合类 MAC 协议作为研究对象,对其运行机制、特点及优缺点进行了重点分析研究。

3.1.1 Z-MAC^[10]

Z-MAC 是一种基于 CSMA/TDMA 机制的混合类 MAC 协议,在低网络负载时协议采用 CSMA 机制访问信道,以降低延时提高信道利用率;在高负载时切换至 TDMA 模式,规避冲突和串扰。

Z-MAC 协议通过 DRAND^[11] 算法为两跳范围内邻居节点分配时隙,时隙拥有者具有时隙的优先使用权。在低数据流量、低竞争情况下,节点在自身时隙内优先发送数据,当无数据发送时,其他节点可通过竞争“窃取”该时隙来发送自身数据;在高流量、高竞争状态下,节点发送明确竞争通告(Explicit Contention Notification, ECN)消息,通知两跳内邻居节点禁止抢占其他时隙,转到 TDMA 机制。通过该机制协议实现了 TDMA 和 CDMA 机制的平滑切换。

Z-MAC 协议在高网络流量情况下有更高的吞吐量和更少的能耗。相对于纯 TDMA 机制,协议增强了网络对时间同步失效、时钟漂移、时隙分配失败、拓扑改变的鲁棒性。Z-MAC 的缺陷在于:在高竞争模式下,节点为规避冲突只能在有限时隙内发送数据,增大了传输延时,在低竞争模式下,仍无法避免隐终端问题;ECN 机制易产生内爆,为避免内爆需增加控制开销;分布式时隙分配算法只在初始阶段为节点分配时隙,无法周期性运行。

3.1.2 Funneling-MAC^[12]

采用多跳通信方式的 WSN 网络,汇聚节点附近区域往往面临漏斗效应,导致严重的数据包冲突、拥塞和丢包。

Ahn 等人据此提出 Funneling-MAC 协议。该协议在全网范围内采用 CSMA 机制,漏斗区域节点(f-节点)采用 TDMA/CSMA 混合机制。在网络流量足够大时汇聚节点周期性发送信标并控制发射功率。可收到信标广播的节点成为 f-节点, f-节点根据传输时间安排(schedule)分组获悉 TDMA 时隙分配信息;其他节点运行 CSMA 机制。f-节点交替使用 CSMA 和 TDMA 帧接入信道,一个 CSMA 帧和 TDMA 帧合并为一个超帧(superframe),超帧中 CSMA 帧及 TDMA 帧所占比例由汇聚节点根据之前超帧内输入流量统计信息动态调整。Funneling-MAC 时间帧划分如图 1 所示。

Funneling-MAC 以 CSMA 机制为主,对节点间时间同步要求不高,且网络生存期相对较长。Funneling-MAC 的缺点在于:协议所采用的 TDMA 时隙

分配算法相对松散,不能完全解决隐终端问题;由于采用集中式调度算法,当汇聚节点附近网络拓扑变化时网络需重新分配时隙资源,网络开销较大。因此, Funneling-MAC 仍无法应用于大规模 WSN。

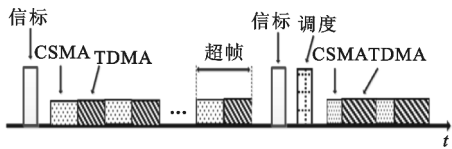


图1 Funneling-MAC 时间帧划分
Fig. 1 Division of time frames in funneling-MAC

3.1.3 IEEE802.15.4MAC^[13]

IEEE802.15.4 中 MAC 层协议支持信标使能和非信标使能两种模式。非信标使能模式下网络中设备基于无时隙的 CSMA 机制进行数据传输;信标使能模式下,协调器周期性产生网络信标用于设备同步,设备通过基于竞争的时隙 CSMA 机制和基于调度的保障时隙(Guaranteed Time Slot,GTS)机制接入信道^[14]。

在信标使能模式下,网络通过超帧实现设备的信道接入控制。超帧分为活跃周期和非活跃周期,信道接入控制集中在活跃期,非活跃期内节点进入休眠以节省能量。活跃期划分为信标发送、竞争访问(Contention Access Period,CAP) 和非竞争访问(Contention Free Period,CFP)3 个阶段。。在第 0 时隙,协调器发送网络信标,用于全网节点的时间同步;在 CAP 阶段,所有节点基于时隙 CSMA/CA 机制竞争接入信道;在 CFP 阶段,节点在分配的 GTS 内进行数据的实时传输。超帧结构如图 2 所示。

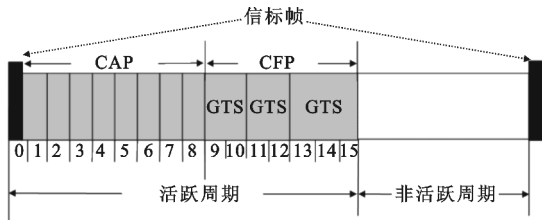


图2 IEEE802.15.4 MAC 的超帧结构
Fig. 2 IEEE802.15.4 MAC super-frame structure

协议在保证节点通过竞争以提高信道利用率的前提下通过 GTS 机制兼顾了网络对实时性的要求,然而,GTS 最多可用 7 个时隙,在高负载情况下,显然难以满足需求,因而会造成较大的网络延时。同时,超帧中活跃期和非活跃期时间由预先设定的参数决定,对网络负载的动态变化不敏感,有进一步改进空间。

3.2 混合类 MAC 协议研究前沿进展

近年来国内外学者对混合类 MAC 协议进行了更深入的研究分析,提出了许多新型的混合类 MAC

协议。

Mohammad Arifuzzaman 等人^[15]提出 IH-MAC 协议。节点的时隙分配基于本地时钟算法,时隙内包括活跃期和休眠期,活跃期用于同步帧和 RTS/CTS 帧的传输,休眠期用于数据帧和 ACK 帧的传输。节点通过本地时钟算法获得时隙成为其拥有者,运算后节点可拥有多个时隙,且同一时隙可被多个节点共用。分配若干时隙的节点可进一步运算选出预约时隙,预约时隙内源节点和目标节点建立排他性的传输,邻居节点进入休眠状态以节省能量。同时协议为满足不同类型数据包对延时的要求,对数据包优先级进行了划分,时隙拥有者及数据包优先级高的节点优先占用,优先级相同的节点通过竞争的方式接入信道。此外,为进一步降低节点能耗,节点可基于接收信号强度动态调整发射功率以节省能量。然而,由于涉及退避、时隙分配、取模运算、数据包优先级设置等操作,协议对网络节点运算能力提出较高要求。

在 Z-MAC 协议基础上,文献[16]加入能量控制和流量自适应机制,在低网络负载下部分节点进入睡眠来节省能量;在高网络负载下,节点工作在 TDMA 模式规避冲突。协议根据节点剩余能量和流量情况改变竞争窗口和退避时间,当节点流量大时增大竞争窗口;节点剩余能量越多,退避时间越短。然而,当节点剩余能量减少及网络负载增大时,退避时间延长,相应时延增大,协议在时延特性上需进一步改进。基于 Z-MAC 协议并未考虑到的接收节点能量消耗的问题,文献[17]综合考虑发送节点和接收节点的能耗优化,引入广播机制方案,提前通知节点接收数据的时隙,保证只有发送节点和接收节点处于活动状态而其他节点进入睡眠状态,从而有效地避免数据串音、减少空闲侦听并延长网络寿命。但当网络处于高负载时,网络中多个发送节点在数据发送前进行广播,易发生广播帧的碰撞冲突,同时由于发送节点接收节点传输数据时其他邻居节点强制进入睡眠状态,虽避免串音但造成网络吞吐量的下降。

为改善分簇结构的 WSN 性能,文献[18]提出一种基于分簇的混合 MAC 协议。Sink 节点决定簇头选择和簇内时隙分配,簇内节点在相应时隙内向簇头节点发送数据,当时隙所有者无数据发送时其他节点通过竞争的方式抢占时隙。这样在低网络负载时提高了信道利用率,在高网络负载时大部分时隙被所有者使用,性能接近于 TDMA。由于协议采用集中式时隙分配原则,在新节点加入时需重新进行全网时隙分配,可扩展性较差。同时网络建立阶段所有节点都需向 sink 节点发送入网请求,较远节点能耗较高。文献[19]采用了基于二叉树结构的

时隙块分配策略和基于时隙约束的 CSMA 竞争接入机制,并通过休眠调度机制降低网络能量消耗、延长网络生命周期,提高 WSN 应用中周期性感知数据和突发/超限数据的传输实时性。然而,在突发业务流量增加时,退避机制仍不能较好地解决数据冲突率过高的问题。文献[20]基于时隙系数和剩余节点能量系数动态调整簇内节点时隙大小,簇头之间通过 CSMA 机制进行通信,有效地降低了网络时延并延长了网络的生命周期。

节点缓存区中队列的长度可作为网络性能改善的一个重要参数,文献[21]基于节点队列长度对时隙分配策略进行了改进,在 CSMA 阶段节点向协调器发送包含队列长度信息的请求包,协调器根据请求包中队列信息计算概率集中函数并以此为参数最优化 TDMA 阶段的时隙分配,进而减少空闲时隙,改善信道利用率。文献[22]基于队列长度信息提出 Queue-MAC 协议,在 MAC 层数据包结构中加入队列长度指示字节,队列非空的节点在竞争阶段向协调器发送数据包的同时向协调器请求下一超帧中的时隙,协调器根据指示字节计算并为之分配时隙。文献[23]在 Queue-MAC 的基础上引进了路由节点和跳频机制,增强了协议对多跳和多信道的支持。文献[24]在 Queue-MAC 协议的 CSMA 阶段引入自适应信道侦听和可变同步前导采样机制,减少了网络在 CSMA 阶段空闲侦听时间,进一步改善了协议的能耗。文献[25]结合了 IEEE802.15.4e 的跳频机制改善了网络的信道利用率、吞吐量并减少了数据的碰撞冲突,同时针对 Queue-MAC 协议中节点队列中的数据包需等待下一超帧时隙到来才能发送进而造成较大延时的缺点,该协议通过在 CSMA 和 TDMA 阶段之间插入次信标帧,实现了在当前超帧内完成时隙的分配和利用,同时采用延时优先分配策略对于队列较长的节点优先分配时隙,降低了数据包的时延。对于 Queue-MAC 及其改进的协议,由于节点中数据包数量的动态变化,队列指示总会滞后,难以准确反映真实的队列情况;在高网络负载情况下碰撞增加易造成数据包丢失,进而造成时隙分配失效。

在某些混合类 MAC 协议中,控制包及数据包的传输分别采用不同机制。文献[26]提出一种健壮混合 MAC 协议。协议超帧包括通告、竞争、公告、传输四个阶段。Sink 节点在通告和公告阶段分别广播竞争期和传输期的开始时间;其他节点在竞争期基于 CSMA 机制发送时隙分配请求包,在传输阶段基于 TDMA 发送数据包。为提高鲁棒性,TDMA 阶段每个时隙内采用 IEEE802.11 中物理载波侦听、虚拟载波侦听机制,避免时隙分配失败和同步失效后

碰撞增大的问题。但是,由于虚拟载波侦听中握手机制的加入增大了协议的控制开销,也造成了比传统 TDMA 更大的延时。文献[27]在竞争阶段基于时隙 CSMA/CA 机制发送改进的 RTS/CTS 控制帧以预约 TDMA 时隙,同时在 RTS 帧和数据包中加入数据包传输跳数信息,提高多跳节点的传输优先级,均衡了网络整体时延。然而,由于数据发送请求和数据包传输是基于不同机制分别进行的,这在一定程度上也增大了传输时延。

不少学者对信标使能模式下 IEEE802.15.4 协议进行了改进。在簇型网络中,IEEE802.15.4MAC 协议存在信标帧碰撞导致同步失败的问题,对此,文献[28]提出一种信标帧调度算法,在不影响时钟同步的前提下将不同簇头发送的信标分配到不同时隙以避免信标帧的冲突。文献[29]基于节点数据包长、数据到达率和超帧长度将 GTS 时隙分割为更小的时隙段,提高 GTS 阶段信道利用率、同时相应增大 CAP 阶段时长,改善了协议吞吐量,但协议时隙分割算法仅支持星型网络,对其他网络拓扑结构的支持有待进一步研究。文献[30]针对协议中二进制指数算法在网络高负载时性能不佳的问题,提出了基于网络负载概率判断和指数加权平均的退避策略,根据网络负载统计信息判断信道竞争程度并以此调整退避指数,缓解竞争并改善网络吞吐量。

4 WSN 混合类 MAC 协议归纳对比

WSN 应用范围广阔,基于不同应用场景混合类 MAC 协议的设计也呈现出多样性的特点,以上介绍的各类混合 MAC 协议分别基于不同目标改善了网络性能,表 3 选取了已命名的若干协议并对其各项性能进行对比,其中包括协议的能效性、可扩展性以及网络的延时、吞吐量和信道利用率等指标。表 4 对各协议的改进目标和主要机制以及主要缺点和评估方式进行了归纳总结。

表 3 混合类 MAC 协议性能比较
Tab. 3 Performance comparison among hybrid MAC protocols

协议	能效性	扩展性	延时	吞吐量	信道利用率
Z-MAC	中	差	低	高	高
Funneling-MAC	中	中	中	高	高
802.15.4MAC	好	好	低	中	高
IH-MAC	好	好	低	中	中
RA-ZMAC	好	差	高	高	中
I-ZMAC	好	差	高	中	中
TC ² -MAC	中	差	好	中	中
Queue-MAC	中	中	低	高	高
iQueue-MAC	中	中	低	高	高
pQueue-MAC	好	中	低	高	高
eQueue-MAC	中	中	低	高	高
LH-MAC	好	中	中	中	中

表 4 混合类 MAC 协议特点比较
Tab. 4 Characteristics comparison among hybrid MAC protocols

协议	主要目标	主要机制	缺点	评估方式
Z-MAC	低延时 高吞吐量	DRAND 算法时隙分配;竞争级别自 适应;时隙“窃取”	ECN 内爆隐终端问题	试验床, 仿真
Funneling-MAC	解决漏斗效 应高吞吐量	强度区设定 f-节点时隙分配	时隙分配松散隐终端问题	仿真
IEEE802. 15. 4 MAC	低能耗 低延时	时隙 CSMA/CA;GTS 时隙保障机制	GTS 数目受限高负载时性能 下降	试验床, 仿真
IH-MAC	低能耗 低延时	虚拟簇;数据包优先级划分;传输功 率调整	协议复杂度高	仿真
RA-ZMAC	低能耗 低冲突	时隙内占空比动态调整;基于剩余 能量调整退避时间	低能量节点及高网络负载延 时较大	仿真
I-ZMAC	低能耗 避免串音	广播通告接收时隙;邻居节点进入 休眠避免串音	广播帧碰撞吞吐量低	仿真
TC ² -MAC	满足差异性 Qos 要求	二叉树结构时隙分配;休眠调度机 制	高突发业务量网络延迟高	仿真
Queue-MAC	低能耗 流量自适应	队列长度指示;可变长 TDMA;自适 应占空比	队列指示滞后高负载时隙分 配失效	试验床, 仿真
iQueue-MAC	低能耗 多跳支持	跳频机制路由节点突发传输	队列指示滞后高负载时隙分 配失效	试验床, 仿真
pQueue-MAC	低能耗	自适应信道侦听可变同步前导采样 机制	队列指示滞后高负载时隙分 配失效	试验床, 仿真
eQueue-MAC	低能耗 低延时	次信标机制延时优先分配策略	队列指示滞后高负载时隙分 配失效	试验床, 仿真
LH-MAC	低能耗 低延时	信道预约基于跳数的优先级设置	发送请求与包传输分离,延 时增大	仿真

通过对比我们发现,不同的 MAC 协议通过采用不同的改进机制取得相应的性能的改善,然而并没有哪一种协议能在各方面取得最优并成为通用的标准,究其原因在于:首先,WSN 是基于应用的网络,应用需求的差异性使得协议需要在多个性能指标中进行选择和折中;其次,协议依托的物理层协议及物理层硬件平台无一致性标准,MAC 层协议的设计需适应底层物理平台。

5 总结和展望

近年来,WSN 研究热度不减,混合类 MAC 协议由于采用多种机制,能多方面地提升 WSN 的整体性能,吸引了众多学者对其进行研究和改进,取得了卓有成效的研究成果。

通过对当前混合类 MAC 协议的分析比较我们认为,WSN 混合类 MAC 协议在可扩展性、鲁棒性、安全性、复杂性等方面还存在着诸多问题,具有较大的改进空间,混合类 MAC 协议在逐步走向应用的过

程中,还有许多关键问题需要考虑和解决:

(1)协议的能量有效性依然占有重要地位,然而在某些应用场景如智能穿戴、无线多媒体传感网中,数据传输可靠性和实时性也是需要重点考虑的问题,在未来的研究中应着重考量应用的特异性需求并有针对性地对协议进行改进。

(2)随着硬件存储及电池技术的发展,节点运算和电源供给能量得到增强,在此基础上混合类 MAC 协议引入频分多址、码分多址等相对复杂的机制成为可行的研究方向,如何有效地将这些机制同无线传感网的特点相结合具有较好的研究前景。

(3)多协议的融合以及跨层设计思想的加入丰富了传感网 MAC 层协议改进的参考因素,使 MAC 层协议的设计更加立体和多维化,将成为未来 WSN 研究的重点方向。

(4)目前混合类 MAC 协议地研究大多针对静止节点,协议对节点入网、退网、移动性及其传输可靠性的支持有待改进。随着无人机等技术的普及和推广,基于移动平台的传感技术得到迅速发展,对

MAC 层协议的移动性支持提出了更高的要求,在此应用场景下,数据的可靠性传输应作为重点的研究方向。

(5) 目前为止,混合类 MAC 协议安全性十分薄弱,安全机制少有涉及,协议在防止窃听和恶意攻击上仍有较大改进空间。引入加密算法,提高协议的防窃听、防攻击的能力是未来无线传感网协议设计的重点之一。

(6) 在当前研究中,对无线传感网 MAC 层协议设计和验证时往往过于简单和理想化,通信模型同真实环境相差较大,难以由理论应用到实际场景中,在进一步的研究中应尽可能地将协议理论设计与实际应用系统相结合,推动科技成果向生产力转化。

参考文献:

- [1] 薛宸. 一种用于水声传感网的 MAC 层协议[J]. 电讯技术,2015,55(7):802-806.
XUE Chen. A MAC protocol for clustered underwater acoustic sensor networks [J]. Telecommunication Engineering,2015,55(7):802-806. (in Chinese)
- [2] 卓琨,张衡阳,郑博,等. 机载 MAC 协议研究综述[J]. 电讯技术,2015,55(9):1058-1066.
ZHUO Kun, ZHANG Hengyang, ZHENG Bo, et al. Researches on MAC protocols for airborne network: a survey [J]. Telecommunication Engineering,2015,55(9):1058-1066. (in Chinese)
- [3] 张伟龙,吕娜,杜思深. 应用于航空 Ad Hoc 网络的高负载优先级均衡 MAC 协议[J]. 电讯技术,2014,54(4):656-661.
ZHANG Weilong, LYU Na, DU Sishen. A balancing priority MAC protocol under high load for aviation ad hoc network [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5):656-661. (in Chinese)
- [4] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceedings of 2008 Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). New York: IEEE, 2002:1567-1576.
- [5] DAM T, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, California: IEEE, 2003:171-180.
- [6] AHLAM S A, MANAL A. Medium access control protocols for wireless sensor networks classifications and cross-layering [C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT). Prague, Czech Republic: IEEE, 2015:4-16.
- [7] RAJENDRAN V, OBRACAZKA K, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks [C]//Proceedings of 2003 ACM SenSys. Los Angeles, California, USA: ACM, 2003:181-192.
- [8] LU G, KRISHNAMACHARI B, RAGHAVENDRA C. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks [C]//Proceedings of 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS). Santa Fe, New Mexico, USA: IEEE, 2004:224-230.
- [9] BAO L, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. A new approach to channel access scheduling for ad hoc networks [C]//Proceedings of 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome: IEEE, 2001:210-221.
- [10] RHEE I, WARRIER A, AIA M, et al. ZMAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(3):511-524.
- [11] RHEE I, WARRIER A, MIN J, et al. DRAND: distributed randomized TDMA scheduling for wireless ad hoc networks [C]//Proceedings of 2006 ACM MobiHoc. New York: IEEE, 2006:190-201.
- [12] AHN G S, MILUZZO E, CAMPBELL S G, et al. Funneling-MAC: a localized, sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder, Colorado, USA: IEEE, 2006:293-306.
- [13] IEEE. Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs): IEEE Std 802.15.4TM-2006[S]. [S. l.]: IEEE, 2006.
- [14] 姜智文,周熙,余阳,等. IEEE802.15.4MAC 协议研究现状[J]. 无线电通信技术,2013(5):11-14.
JIANG Zhiwen, ZHOU Xi, SHE Yang, et al. Research status of MAC protocols in IEEE802.15.4 [J]. Radio Communications Technology, 2013(5):11-14. (in Chinese)
- [15] ARIFUZZAMAN M, MATSUMOTO M, SATO T. An intelligent hybrid MAC with traffic-differentiation-based QoS for wireless sensor networks [J]. IEEE Sensor Journal, 2013, 13(6):2391-2399.
- [16] 穆一夫,刘瑞祥,王潜平,等. 基于节点剩余能量及流量自适应的混合 MAC 协议[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(11):123-129.
MU Yifu, LIU Ruixiang, WANG Qianping, et al. A hybrid MAC protocol based on residual energy and network traffic [J]. Microelectronics & Computer, 2012, 29(11):123-129. (in Chinese)
- [17] 张烈平,廖照亮. 基于广播机制的流量自适应混合 MAC 协议研究[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(4):843-846.

- ZHANG Lieping, LIAO Zhaoliang. Research on traffic-adaptive hybrid MAC protocol based on broadcast mechanism [J]. Journal of Chinese Mini-Micro Computer Systems, 2012, 33(4): 843-846. (in Chinese)
- [18] ZHANG M, BABAEI A, AGRAWAL P. A cluster based hybrid access protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of 35th IEEE Sarnoff Symposium (SARNOFF). Newark, New Jersey, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [19] CHEN C X, HE Z W, JIA J G. TC²-MAC: an adaptive MAC protocol for wireless sensor network [J]. Journal on Communications, 2014, 35(4): 91-102.
- [20] 卢艳宏, 掌明, 冯源. 无线传感器网络能量高效混合 MAC 算法[J]. 电讯技术, 2012, 52(8): 1349-1353. LU Yanhong, ZHANG Ming, FENG Yuan. An energy-efficient hybrid MAC algorithm in wireless sensor network [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(8): 1349-1353. (in Chinese)
- [21] SHRESTHA B, CHOI K W, HOSSAIN E. A dynamic time slot allocation scheme for hybrid CSMA/TDMA MAC Protocol [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2013, 2(5): 535-538.
- [22] ZHUO S, SONG Y Q, WANG Z, et al. Queue-MAC: a queue-length aware hybrid CSMA/TDMA MAC protocol for providing dynamic adaptation to traffic and duty-cycle variation in wireless sensor networks [C]// Proceedings of 9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Lemgo, NRW, Germany: IEEE, 2012: 105-114.
- [23] ZHUO S, WANG Z, SONG Y Q, et al. A traffic adaptive multi-channel MAC protocol with dynamic slot allocation for WSNs [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 15(7): 1600-1613.
- [24] WU L, ZHUO S, WANG Z, et al. pQueue-MAC: an energy efficient hybrid MAC protocol for event-driven sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015(5): 1-11.
- [25] CAO D Y, ZHUO S G, WU L T, et al. eQueue-MAC: enhanced traffic adaptive hybrid MAC protocol with IEEE 802. 15. 4e features for industrial applications [C]// Proceedings of International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Nanjing: IEEE, 2015: 1-6.
- [26] VERMA P K, TRIPATHI R, NAIK K. A robust hybrid-mac protocol for M2M communications [C]// Proceedings of 5th International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCT). Hyderabad, India: IEEE, 2014: 267-271.
- [27] 杜敏, 黄剑, 石为人, 等. 基于竞争与 TDMA 的低时延无线传感器网络 MAC 协议[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(10): 111-114. DU Min, HUANG Jian, SHI Weiren, et al. Low time delay WSNs MAC protocol based on competition and TDMA [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(10): 111-114. (In Chinese)
- [28] WONG C M. A novel beacon frame scheduling algorithm based on cluster-tree IEEE 802. 15. 4 wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communication Systems. Singapore: IEEE, 2012: 285-289.
- [29] RASYID M, LEE B H, SUDARSONO A. PEGAS: partitioned GTS allocation scheme for IEEE 802. 15. 4 [C]// Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Networks, Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA). Bandung, Indonesia: IEEE, 2013: 29-32.
- [30] 乔冠华, 毛剑琳, 郭宁, 等. IEEE 802. 15. 4 MAC 协议退避机制的改进[J]. 计算机应用, 2013, 33(10): 2723-2725. QIAO Guanhua, MAO Jianlin, GUO Ning, et al. Improved backoff mechanism for IEEE 802. 15. 4 MAC protocol [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(10): 2723-2725. (in Chinese)

作者简介:



孙 鹏(1989—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感网;

SUN Peng was born in Jining, Shandong Province, in 1989. He is now a graduate student. His research concerns wireless sensor network.

李光明(1973—),男,山东青岛人,2006年于香港大学获博士学位,现为山东大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为光网络和无线传感网;

LI Guangming was born in Qingdao, Shandong Province, in 1973. He received the Ph. D. degree from the University of Hong Kong in 2006. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns optical network and wireless sensor network.

Email: gml@ sdu. edu. cn

汪付强(1980—),男,山东临沂人,2011年于中国科学院获博士学位,现为工程师,主要研究方向为无线传感网络时间同步、调频技术;

WANG Fuqiang was born in Linyi, Shandong Province, in 1980. He received the Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2011. He is now an engineer. His research concerns wireless sensor network synchronization and hopping.

庞 泳(1989—),女,山东临沂人,2015年于山东大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为无线传感网。

PANG Yong was born in Linyi, Shandong Province, in 1989. She received the M. S. degree from Shandong University in 2015. She is now an engineer. Her research concerns wireless sensor network.