

# 无线传感器网络 MAC 协议研究进展

郑国强<sup>1,2</sup> 李建东<sup>1</sup> 周志立<sup>3</sup>

**摘要** 近年来,无线传感器网络 (WSNs) 作为国内外一个新兴的研究方向,吸引了许多研究者和机构的广泛关注. 无线传感器网络具有与传统无线网络不同的特点,且与应用高度相关. 无线传感器网络主要的一个设计目标是有效地使用网络节点的受限资源 (能量、内存和计算能力),以最大化网络的服务寿命. 传统网络的介质访问控制 (MAC) 协议,并不能直接应用于无线传感器网络. 针对无线传感器网络的特点和应用背景,研究人员提出了很多 MAC 协议. 本文通过分析无线传感器网络的特点,讨论了影响 MAC 协议设计的有关问题,着重研究和比较了当前一些重要的无线传感器网络 MAC 协议. 结果表明,不存在一种适用于无线传感器网络应用的标准 MAC 协议,好的 MAC 协议必须能在能量有效性和网络性能之间进行折中. 最后,展望了无线传感器网络 MAC 协议的进一步研究策略和发展趋势.

**关键词** 无线传感器网络 (WSNs), MAC 协议, 自组织网络, 能量有效性

**中图分类号** TP393

## Overview of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks

ZHENG Guo-Qiang<sup>1,2</sup> LI Jian-Dong<sup>1</sup> ZHOU Zhi-Li<sup>3</sup>

**Abstract** Wireless sensor networks (WSNs) are different from traditional networks and are highly dependent on applications. One of the main goals of WSNs is to maximize the lifetime of the whole network as well as to use the constrained node resources efficiently, such as energy, memory, and computing capacities. Traditional MAC protocols cannot be applied efficiently to WSNs. Therefore, many new MAC protocols have been designed specifically according to WSNs characteristics and different applications. After introducing the characteristics of WSNs, this paper first describes the sensor network properties that are crucial to the design of MAC protocols. Then, the key mechanisms, virtues, and shortcoming of the existing representative MAC protocols are analyzed, and their performances are compared. The results show that there is no MAC layer protocol that can be accepted as a standard. A good MAC protocol is that it has the ability to make tradeoffs between energy-efficiency and other performances of WSNs according to application conditions. Finally, the future research strategies and trends of MAC protocols in WSNs are summarized.

**Key words** Wireless sensor networks (WSNs), MAC protocols, ad hoc networks, energy-efficiency

随着无线通信、微电子机械制造技术和传感技

术的发展,无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSNs) 引起了人们的广泛关注. WSNs 由部署在监测区域内,大量集成有感知、数据处理和无线通信及能量供应模块的微型传感器节点所组成. 在目标入侵监测、目标跟踪、环境监测、战场侦察、生物医疗、抢险救灾以及工业加工过程的监控等领域, WSNs 都具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>.

WSNs 网络是一种特定的 Ad hoc 网络,网络中的节点自组织成网络,不需要任何基础设施. 与 WSNs 网络最为相似的是移动自组织网络 (Mobile Ad hoc networks, MANET), 尽管二者都是无线自组织多跳网络,具有相似之处,但差异很大. WSNs 网络节点不移动或很少移动,而 MANET 网络节点移动性较强; WSNs 网络的节点计算、存储和通信能力有限; WSNs 网络节点采用电池供电,节点因能量耗尽和环境影响而易失效; WSNs 网络通信能耗高,数据处理能耗低,而这些差异在 MANET 网络中并不重要; WSNs 一般独立组网,主要用于监测功能,是以数据为中心的网络,而 MANET 则能为分

收稿日期 2007-05-29 收修改稿日期 2007-09-15  
Received May 29, 2007; in revised form September 15, 2007  
国家杰出青年科学基金 (60725105), 国家自然科学基金重大项目 (60496316), 国家自然科学基金 (60572146), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20050701007), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划, 教育部科学技术研究重点项目 (107103) 资助  
Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (60725105), the Important Program of National Natural Science Foundation of China (60496316), National Natural Science Foundation of China (60572146), Doctoral Foundation of Educational Committee (20050701007), the Science Foundation for Excellent Youth Teachers of Universities by the Ministry of China, and the National Grand Fundamental Research Program of Education of China (107103)  
1. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 信息科学研究所, 宽带无线通信实验室 西安 100080 2. 河南科技大学电子信息工程学院 洛阳 471003 3. 河南科技大学车辆与动力工程学院 洛阳 471003  
1. Broadband Wireless Communications Laboratory, Information Science Institute, State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 100080 2. Electronic Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003 3. Vehicle and Power Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.00305

布式应用提供互联、计算能力; WSNs 网络节点数量可能达到成千上万, 分布更为密集, 远大于 MANET 的几十个节点; WSNs 网络流量具有 One-many 和 Many-one 的特点; WSNs 是与应用高度相关的网络, 节点协作共同完成监测任务, 数据相关性较大; WSNs 节点一般没有统一的编址。

WSNs 网络的上述特点, 使得针对传统无线网络和 MANET 网络研究的通信协议, 并不能有效地直接应用于 WSNs 网络。基于 WSNs 网络的能量限制, 为了延长网络的寿命, 能量有效性成为 WSNs 网络应用中首要的一个设计指标。能量高效的 WSNs 网络通信协议, 是目前的一个热点研究领域。介质访问控制协议 (Medium access control, MAC) 处于 WSNs 网络通信协议的底层部分, 以解决 WSNs 网络中节点以怎样的规则共享媒体才能取得满意的网络性能问题。WSNs 网络的吞吐量、延迟等性能, 与所采用的 MAC 协议直接相关。近年来, 研究人员已经提出了众多专用于 WSNs 网络的 MAC 协议。本文首先简单地分析了影响 WSNs 网络 MAC 协议设计的相关问题, 讨论了 MAC 协议的分类方法; 然后着重研究与论述了当前较为重要的一些 MAC 协议的核心实现机制和特点, 并比较了这些 MAC 协议在性能上的差异。最后, 指出了关于 WSNs 网络 MAC 协议的未来发展趋势和研究策略, 目的在于为进一步研究能量高效的 WSNs 网络 MAC 协议提供参考。

## 1 影响 WSNs 网络 MAC 协议的因素

为了研究和比较现有 WSNs 网络 MAC 协议的性能, 本节首先讨论影响 WSNs 网络 MAC 协议性能的有关基本问题, 并分析 WSNs 网络节点间通信时造成能量浪费的潜在因素; 然后, 针对 WSNs 网络应用的业务多样性, 定义了网络中可能的通信模式, 以分析不同 MAC 协议的适应性。

### 1.1 WSNs 网络 MAC 协议设计的主要问题

WSNs 网络的强大功能, 是通过众多资源受限的网络节点协作实现的。由于节点无线通信的广播特征, 节点间信息传递在局部范围, 需要 MAC 协议协调其间的无线信道分配; 在整个网络范围内, 需要路由协议选择通信路径。WSNs 网络的 MAC 协议设计, 需要根据应用的要求考虑以下的网络性能问题<sup>[2]</sup>。

1) 能量有效性。能量有效性是 WSNs 网络 MAC 协议最重要的一项性能指标。由于 WSNs 网络的节点一般采用电池提供能量, 并且电池能量难

以补充和更换。因此, 在设计 WSNs 网络时, 有效利用节点的能量, 尽量延长网络节点的生存时间, 是设计网络各层协议都要考虑的一个重要问题。在节点的能量消耗中, 无线收发装置的能量消耗占绝大部分, 而 MAC 层协议直接控制无线收发信装置的行为, 因此 MAC 协议的能量有效性直接影响网络节点的生存时间和网络寿命。

2) 可扩展性。可扩展性是指一个 MAC 协议适应网络大小、拓扑结构、节点密度不断变化的能力。由于节点数目、节点分布密度等在 WSNs 网络生存过程中不断变化, 节点位置也可能移动, 还有新节点加入网络的问题, 所以 WSNs 网络的拓扑结构具有动态性。一个好的 MAC 协议也应具有可扩展性, 以很好地适应这种动态变化的拓扑结构。

3) 冲突避免。冲突避免是 MAC 协议的一项基本任务。它决定网络中的节点何时、以何种方式访问共享的传输媒体和发送数据。在 WSNs 网络中, 冲突避免的能力直接影响节点的能量消耗和网络性能。

4) 信道利用率。信道利用率反映了网络通信中信道带宽如何被使用。在蜂窝移动通信系统和无线局域网中, 信道利用率是一项非常重要的性能指标。因为在这样的系统中, 带宽是非常重要的资源, 系统需要尽可能地容纳更多的用户通信。相比之下, WSNs 网络中处于通信中的节点数量是由一定的应用任务所决定的, 信道利用率在 WSNs 网络中处于次要的位置。

5) 延迟。延迟是指从发送端开始向接收端发送一个数据包, 直到接收端成功接收这一数据包所经历的时间。在 WSNs 网络中, 延迟的重要性取决于网络的应用。

6) 吞吐量。吞吐量是指在给定的时间内发送端能够成功发送给接收端的数据量。网络的吞吐量受到许多因素的影响, 如冲突避免机制的有效性、信道利用率、延迟、控制开销等。和数据传输的延迟一样, 吞吐量的重要性也取决于 WSNs 网络的应用。在 WSNs 网络的许多应用中, 为了获得更长的节点生存时间, 允许适当牺牲数据传输的延迟和吞吐量等性能指标。

7) 公平性。公平性通常指网络中各节点、用户、应用, 平等地共享信道的能力。在传统的语音、数据通信网络中, 它是一项很重要的性能指标。因为网络中每一个用户, 都希望拥有平等发送、接收数据的能力。但是在 WSNs 网络中, 所有的节点为了一个共同的任务相互协作, 在某个特定的时刻, 存在一个节点相比于其他节点拥有大量的数据需要传送。因此, 公平性往往用网络中某一应用是否成功实现来评价,

而不是以每个节点平等发送、接收数据的能力来评价。

以上性能指标反映了一个 MAC 协议的特性。与传统网络的 MAC 协议重点考虑节点使用带宽的公平性、提高带宽利用率以及增加网络的实时性等注重的因素正好相反, 能量有效性是设计 WSNs 网络 MAC 协议首要考虑的性能指标; 其次是协议的可扩展性和适应网络拓扑变化的能力; 而其他的网络性能指标如延迟、信道利用率等, 需要根据应用进行折中。所以传统网络的 MAC 协议, 并不适用于 WSNs 网络。

### 1.2 能量浪费的主要原因

为了分析和评价 MAC 协议的能量有效性, 需要分析是哪些因素导致了能量损耗。WSNs 网络中造成能量浪费的主要因素有以下几个方面<sup>[2-3]</sup>:

1) 空闲侦听 (Idle listening)。网络中的节点, 由于不能预知它的邻节点什么时候会向其发送数据, 所以将其无线收发模块始终保持在接收模式, 这是节点能量浪费的主要来源。原因在于典型的无线收发模块处于接收模式时消耗的能量, 比其处于睡眠模式时要多几个数量级。

2) 消息碰撞 (Message collision)。当两个节点传送的数据包发生冲突时, 两个数据包被损坏。这时节点消耗在发送和接收数据上的能量被浪费掉了, 这就需要重传发送的数据, 从而消耗节点更多的能量。

3) 窃听 (Overhearing)。无线信道是一个共享媒体, 一个节点可能会接收到发送给其他节点的消息, 这时节点消耗在接收数据上的能量被浪费掉了。因此从节能考虑, 这时应将其无线传输模块关闭。

4) 控制报文开销 (Control-packet overhead)。在 MAC 协议的头字段和控制消息包 (ACK/RTS/CTS) 中没有包含有效的数据, 因此可认为是一种损耗。为了提高能效应该尽可能减少控制消息。

5) 发送失效 (Overemitting)。在目的节点没有准备好接收时, 发送节点发送了消息, 造成能量的浪费。

### 1.3 通信模式

传感器网络是与应用高度相关的。不同的网络结构、不同的应用场景和目的, 其业务特征呈现多样性, 需要采用不同的通信模式, 以更有效地交换业务。基于不同的业务特征, MAC 协议对不同通信模式的支持, 可以有效减少节点能耗。所以对不同通信模式的支持与否, 也是衡量 MAC 协议能量有效性的重要因素。Kulkarni 等定义了 WSNs 网络的三

种通信模式<sup>[2]</sup>: 广播 (Broadcast)、会聚 (Converge-cast) 和本地通信 (Local gossip); Demirkol 等定义了多播 (Multicast) 的通信模式<sup>[3]</sup>。上述各种通信模式的基本定义如下<sup>[2-3]</sup>:

1) 广播模式: 通常在由基站向整个网络节点发送消息时使用。广播的消息可能为查询信息、节点的程序更新信息和控制信息等。注意, 广播模式和广播分组不同, 广播分组的接收节点是仅在发送节点通信范围内的节点; 而广播模式要求所有的网络节点都能处于接收状态。

2) 会聚模式: 指的是 WSNs 网络中的节点在感知到感兴趣的事件时, 所有监测到事件的节点都把所感知的信息发送给信息中心, 即一组节点同一个特定的节点进行通信, 这个特定的目的节点可以是一个簇头节点、数据融合中心或基站。

3) 本地通信: 指的是监测到同一个事件的节点之间, 在本地的相互通信, 即节点把信息发送给通信范围内的邻居节点。这种模式主要用于本地的信息处理。

4) 多播模式: 指的是节点把信息发送给一组特定的节点, 例如在簇头节点发送信息时, 通信的接收者往往只是整个簇成员的一部分节点。

## 2 WSNs 网络的 MAC 协议分类

MAC 协议主要负责协调网络节点对信道的共享。研究人员从不同方面提出了多种 MAC 协议, 对 MAC 协议的严格分类是非常困难的, 采用不同的条件 MAC 协议有不同的分类方法。综合对目前提出的 MAC 协议的研究, WSNs 网络的 MAC 协议可以按以下几种不同的方式进行分类<sup>[2]</sup>。注意, 由于研究人员采用不同的策略或多种策略组合来设计 MAC 层协议, 故同一 MAC 协议可分属不同的类型。

1) 根据采用分布式控制还是集中控制, 可分为分布式执行的协议和集中控制的协议。这类协议与网络的规模直接有关, 在大规模网络中通常采用分布式的协议。

2) 根据使用的信道数, 即物理层所使用的信道数, 可分为单信道、双信道和多信道, 如 S-MAC, LEEM 分别为单信道和双信道的 MAC 协议。使用单信道的 MAC 协议, 虽然节点的结构简单, 但无法解决能量有效性和时延的矛盾; 而多信道的 MAC 协议可以解决这个问题, 但增加了节点结构的复杂性。

3) 根据信道的分配方式, 可分为基于 TDMA 的时分复用固定式、基于 CSMA 的随机竞争式和混

合式三种. 基于 TDMA 的固定分配类 MAC 层协议, 通过把时分复用 (TDMA) 和频分复用 (FDMA) 或者码分复用 (CDMA) 的方式相结合, 实现无冲突的强制信道分配, 如下面要讨论的 C-TDMA 协议; 以竞争为基础的 MAC 协议, 通过竞争机制, 保证节点随机使用信道, 并且不受其他节点的干扰, 如 S-MAC. 混合式是把基于 TDMA 的固定分配方式和基于 CSMA 的竞争方式相结合, 以适应网络拓扑、节点业务流量的变化等, 如 Z-MAC.

4) 根据接收节点的工作方式, 可分为侦听、唤醒和调度三种. 在发送节点有数据需要传递时, 接收节点的不同工作方式直接影响数据传递的能效性和接入信道的时延等性能. 接收节点的持续侦听, 在低业务的 WSNs 网络中, 造成节点能量的严重浪费. 通常采用周期性的侦听睡眠机制以减少能量消耗, 但引入了时延. 为了进一步减少空闲侦听的开销, 发送节点可以采用低能耗的辅助唤醒信道发送唤醒信号, 以唤醒一跳的邻居节点, 如 STEM 协议. 在基于调度的 MAC 协议中, 接收节点接入信道的时机是确定的, 知道何时应该打开其无线通信模块, 避免了能量的浪费.

### 3 WSNs 网络的 MAC 协议分析

通过对当前 WSNs 网络 MAC 协议的研究, 并基于以上 WSNs 网络的分类方法的考虑, 我们选取了以下较为重要的不同类型 MAC 协议, 对其核心实现机制、特点以及优缺点等进行了分析.

1) C-TDMA 协议<sup>[4]</sup>. Arisha 等人针对分簇结构的 WSNs 网络, 提出了基于 TDMA 机制的 MAC 协议 (C-TDMA). 支持 C-TDMA 协议的网络是一种基于分簇结构的网络. 在多个传感器节点形成的簇中, 有一个簇头节点 (Cluster head), 簇头节点收集和簇内节点发来的数据, 并把处理后的数据发送到汇聚节点, 同时负责为簇内成员节点分配时隙. C-TDMA 协议将 WSNs 网络的节点划分为四种状态: 感应、转发、感应并转发、非活动. 节点在感应状态时, 收集数据并向其相邻节点发送; 在转发状态时, 接收其他节点发送的数据, 再转发给下个节点; 而感应并转发状态的节点, 则要完成上述两项功能; 节点没有接收和发送数据时, 就自动进入非活动状态. 由于传输数据、接收数据、转发数据以及侦听信道, 节点消耗的能量各不相同, 各节点在簇内扮演的角色也不一样, 因此簇内节点的状态随时都在变化. 为了高效地使用网络 (如让能量相对高的节点转发数据、及时发现新的节点等), 该协议将时间帧分为四个阶段: a) 数据传输阶段: 各节点在各自被

分配的时隙内, 向网关发送数据; b) 刷新阶段: 节点周期性的向簇头报告其状态; c) 刷新引起的重组阶段: 紧跟在刷新阶段之后, 簇头节点根据簇内节点的情况, 重新分配时隙; d) 事件触发的重组阶段: 节点能量小于特定值、网络拓扑发生变化等都是需要重组的事件. 若有以上事件触发, 网关就重新分配时隙. C-TDMA 协议能够减少空闲侦听, 避免信道冲突, 也考虑了可扩展性; 但是区域内簇头节点和成员节点需要严格的时钟同步, 对簇头节点的处理能力、能量和放置方式都有较高的要求.

2) SMACS/EAR 协议<sup>[5]</sup>. Sohrabi 等提出的 SMACS/EAR (Self-organizing medium access control/Eavesdrop and register, 具有监听/注册功能的 WSNs 网络自组织 MAC 协议) 协议, 是结合 TDMA 和 FDMA 的基于固定信道分配的分布式 MAC 协议, 用来建立一个对等的网络结构. SMACS 协议主要用于静止的节点之间连接的建立, 而对于静止节点与运动节点之间的通信, 则需要通过 EAR 协议进行管理. 其基本思想是, 为每一对邻居节点分配一个特有频率进行数据传输, 不同节点对间的频率互不干扰, 从而避免同时传输的数据之间产生碰撞. SMACS 协议假设节点静止, 节点在启动时广播一个“邀请”消息, 通知附近节点与本节点建立连接, 接收到“邀请”消息的邻居节点, 与发出“邀请”消息的节点交换信息, 在二者之间分配一对时隙, 供二者以后通信. EAR 协议用于少量运动节点与静止节点之间进行通信, 运动节点侦听固定节点发出的“邀请”消息, 根据消息的信号强度、节点 ID 号等信息, 决定是否建立连接. 如果运动节点认为需要建立连接, 则与对方交换信息, 分配一对时隙和通信频率. SMACS/EAR 不需要所有节点的帧同步, 可以避免复杂的高能耗同步操作, 但不能完全避免碰撞, 多个节点在协商过程中, 可能同时发出“邀请”消息或应答消息, 从而出现冲突. 在可扩展性方面, SMACS/EAR 协议可以为变化慢的移动节点, 提供持续的服务, 但并不适用于拓扑结构变化较快的 WSNs 网络. 在网络效率方面, 由于协议要求两节点间使用不同的频率通信, 固定节点还需要为移动节点预留可以通信的频率, 因此网络需要有充足的带宽以保证每对节点间建立可能的连接. 但是由于无法事先预计并且很难动态调整每个节点需要建立的通信链路数, 因此整个网络的带宽利用率不高.

图 1 说明了 WSNs 网络执行 SMACS/EAR 协议时, 节点 A 和 D, B 和 C 之间的链路建立过程. 先启动的节点 D 向邻居节点广播“邀请”消息, 收到消息的节点 A 发送应答消息, 节点 A 和节点 D 之

间协商建立两者之间的一对专用通信时隙和专用通信频率  $f_1$ . 节点  $B$  和节点  $C$  之间也通过协商建立专用的通信时隙和通信频率  $f_2$ .  $A$  和  $D$  之间的通信时隙与  $B$  和  $C$  之间的虽然重叠, 但是由于双方使用频率不同, 因此不会相互干扰. 同样邻居节点  $A$  和  $B$ 、 $C$  和  $D$  之间也分别通过协商建立相应的链路.

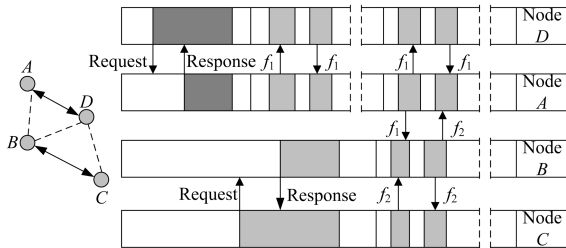


图1 SMACS/EAR 协议的节点链路建立过程

Fig. 1 The link setup of nodes in SMACS/EAR protocol

3) S-MAC 协议. S-MAC (Sensor medium access control) 协议<sup>[6]</sup> 是 Wei 等在 IEEE 802.11 协议的基础上, 针对 WSNs 网络的能量有效性而提出的专用于 WSNs 网络的节能 MAC 协议. S-MAC 协议设计的主要目标是减少能量消耗, 提供良好的可扩展性. 它针对 WSNs 网络消耗能量的主要环节, 采用了以下三方面的技术措施来减少能耗: a) 周期性侦听和休眠. 每个节点周期性地转入休眠状态, 周期长度是固定的, 节点的侦听活动时间也是固定的. 如图 2 所示, 图中向上的箭头表示发送消息, 向下的箭头表示接收消息. 上面部分的信息流, 表示节点一直处于侦听方式下的消息收发序列; 下面部分的信息流, 表示采用 S-MAC 协议时的消息收发序列. 节点苏醒后进行侦听, 判断是否需要通信. 为了便于通信, 相邻节点之间, 应该尽量维持调度周期同步, 从而形成虚拟的同步簇. 同时每个节点需要维护一个调度表, 保存所有相邻节点的调度情况. 在向相邻节点发送数据时唤醒自己. 每个节点定期广播自己的调度, 使新接入节点可以与已有的相邻节点保持同步. 如果一个节点处于两个不同调度区域的重合部分, 则会接收到两种不同的调度, 节点应该选择先收到的调度周期. b) 消息分割和突发传输. 考虑到 WSNs 网络的数据融合和无线信道的易出错等特点, 将一个长消息分割成几个短消息, 利用 RTS/CTS 机制一次预约发送整个长消息的时间, 然后突发地发送由长消息分割的多个短消息. 发送的每个短消息都需要一个应答 ACK, 如果发送方对某一个短消息的应答没有收到, 则立刻重传该短消息. c) 避免接收不必要消息. 采用类似于 802.11 的虚拟物理载波监听和 RTS/CTS 握手机制, 使不收发信息的节

点及时进入睡眠状态.

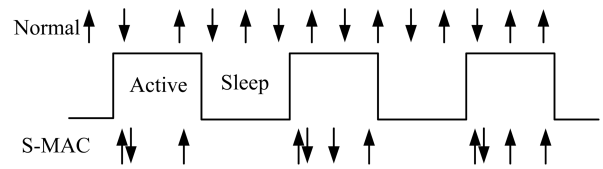


图2 S-MAC 协议

Fig. 2 S-MAC protocol

S-MAC 协议同 IEEE 802.11 相比, 具有明显的节能效果, 但是由于睡眠方式的引入, 节点不一定能及时传递数据, 使网络的时延增加、吞吐量下降; 而且 S-MAC 采用固定周期的侦听/睡眠方式, 不能很好地适应网络业务负载的变化. 针对 S-MAC 协议的不足, 其研究者又进一步提出了自适应睡眠的 S-MAC 协议<sup>[7]</sup>. 在保留消息传递、虚拟同步簇等方式的基础上, 引入了如下的自适应睡眠机制: 如果节点在进入睡眠之前, 侦听到了邻居节点的传输, 则根据侦听到的 RTS 或 CTS 消息, 判断此次传输所需要的时间; 然后在相应的时间后醒来一小段时间 (称为自适应侦听间隔), 如果这时发现自己恰好是此次传输的下一跳节点, 则邻居节点的此次传输就可以立即进行, 而不必等待; 如果节点在自适应侦听间隔时间内, 没有侦听到任何消息, 即不是当前传输的下一跳节点, 则该节点立即返回睡眠状态, 直到调度表中的侦听时间到来. 自适应睡眠的 S-MAC 在性能上通常优于 S-MAC, 特别是在多跳网络中, 可以大大减小数据传递的时延. S-MAC 和自适应睡眠的 S-MAC 协议的可扩展性都较好, 能适应网络拓扑结构的动态变化. 缺点是协议的实现较复杂, 需要占用节点大量的存储空间, 这对资源受限的传感器节点, 显得尤为突出.

4) T-MAC 协议<sup>[8]</sup>. T-MAC (Timeout MAC) 协议, 实际上是 S-MAC 协议的一种改进. S-MAC 协议的周期长度受限于延迟要求和缓存大小, 而侦听时间主要依赖于消息速率. 因此, 为了保证消息的可靠传输, 节点的周期活动时间必须适应最高的通信负载, 从而造成网络负载较小时, 节点空闲侦听时间的相对增加. 针对这一不足, 文献 [8] 提出了 T-MAC 协议. 该协议在保持周期侦听长度不变的情况下, 根据通信流量动态调整节点活动时间, 用突发方式发送消息, 减少空闲侦听时间. 其主要特点是引入了一个 TA 时隙. 如图 3 所示, 图中箭头表示的意义与图 2 相同. 若 TA 期间没有任何事件发生,

则节点进入睡眠状态以实现节能. 与 S-MAC 相比, 主要的不同点是: T-MAC 同样引入串音避免机制, 但在 T-MAC 协议中, 作为一个选择项, 可以设置也可以不设置. T-MAC 与传统无占空比的 CSMA 和占空比固定的 S-MAC 比较, 在负载不变的情况下, T-MAC 和 S-MAC 节能相仿, 而在可变负载的场景中, T-MAC 要优于 S-MAC. 但 T-MAC 协议的执行, 会出现早睡问题, 引起网络的吞吐量降低. 为此, 它采用了两种方法来提高早睡引起的数据吞吐量下降: a) 未来请求发送机制, b) 满缓冲区优先机制, 但效果并不是很理想. 总之, T-MAC 协议在节能方面优于 S-MAC, 但要牺牲网络的时延和吞吐量. T-MAC 的其他性能与 S-MAC 相似.

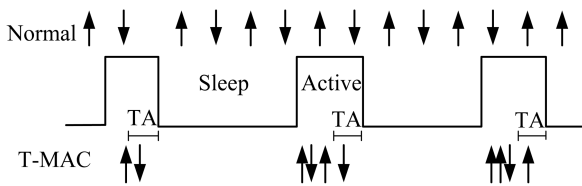


图 3 T-MAC 协议  
Fig. 3 T-MAC protocol

5) PMAC 协议<sup>[9]</sup>. PMAC (Pattern-MAC) 协议是 Zheng 在文献 [9] 中提出的 WSNs 网络 MAC 协议, 目的是在 S-MAC 和 T-MAC 协议的基础上, 进一步减少空闲侦听的能量消耗. PMAC 协议的主要思想是: 用一串二进制字符来代表某一节点所处的模式 (即负载的轻重状况), 节点把各自的模式信息通告给其相邻节点, 根据收到的邻居节点模式信息 (Pattern information) 节点调整其睡眠与工作时间. 假设用  $P_N^j$  表示节点的模式, 这里  $j$  为某一节点,  $N$  为一个周期帧的时隙数. 若  $P_N^j = 01010$ , 则表示在一个周期帧的五个时隙内, 节点  $j$  在 1、3、5 时隙转入睡眠状态, 而在 2、4 时隙转入工作状态. 再定义一种模式, 即  $0^m1$ ,  $m$  大表示负载轻,  $m$  小表示负载重. 节点  $j$  能够根据周围节点发出的模式信息和自身的信息, 在每一个时隙更新  $P_N^j$ , 以达到自适应调节节点睡眠时间与工作时间的目的. 图 4 给出了 S-MAC、T-MAC 和 PMAC 协议的周期侦听/睡眠执行过程, 比较发现: PMAC 进一步减少了空闲侦听的时间, 若忽略传输状态信息所消耗的能量, 理论上节点在没有任何数据传输时, 执行 PMAC 协议的能耗可以降低为零. 研究表明, 同 S-MAC、T-MAC 协议相比, PMAC 协议具有很好的能效性和可扩展性, 但协议的执行非常复杂, 并进一步增加了控制开销和对节点存储能力的要求.

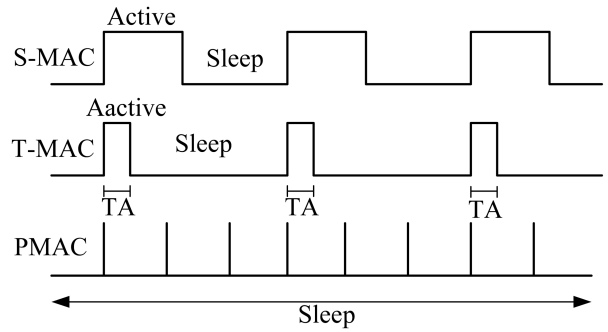


图 4 网络无负载时三种 MAC 协议空闲侦听时间比较  
Fig. 4 Comparisons of the lengths of idle listening periods among S-MAC, T-MAC and PMAC with no traffic

6) 低功耗前导载波周期侦听协议 LPL. CSMA/CA 协议的主要缺点在于节点在空闲侦听时浪费了大量的能源, 文献 [10] 和 [11] 各自独立提出了一种载波检测机制, 通过使节点的无线收发装置有规律地处于“工作”、“待命”状态, 而不丢失发送给该节点的数据, 以减少空闲侦听的能量消耗. 这种机制工作在物理层, 它在每个无线数据包的前面附加了一个前导载波 Preamble, 这个前导载波 Preamble 的主要作用是: 通知接收节点将有数据发送过来, 使其调整电路准备接收数据. 这种机制的主要思想是将接收节点消耗在空闲侦听上的能量, 转移到发送数据节点消耗在发送前导载波 Preamble 的能量消耗上去, 从而使接收节点能周期性地开启无线收发装置、侦听是否有发送过来的数据和检测是否有前导载波 Preamble. 如果接收节点在工作状态检测到前导载波 Preamble, 它就会一直侦听信道, 直到数据被正确地接收; 如果节点没有检测到前导载波, 节点的无线装置将被置于“待命”状态, 直到下一个前导载波检测周期到来, 如图 5 所示.

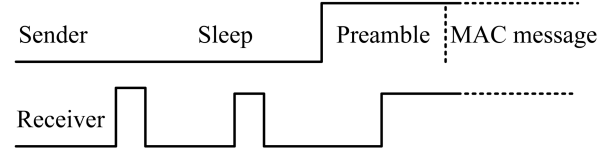


图 5 低功耗前导载波周期侦听机制  
Fig. 5 The cycle listening with lower power preamble

这种有效的载波侦听方法可以和任何一种基于竞争的 MAC 协议相结合, 文献 [10] 将其与 ALOHA 协议结合, 提出了前导字段侦听 (Preamble sampling) 协议; 文献 [11] 将其与 CSMA 协议结合, 提出了低功耗侦听 (Low power listening) 协议. 这两种协议统称为 LPL 协议. LPL 协议通过周期性关闭无线装置节省节点的能耗, 对节点的存储能力要

求很低, 并且不需要周期性的信息交换和维护邻居节点的状态信息, 节省了协议的控制开销, 具有良好的可扩展性, 但减小了数据成功发送的概率. 前导 Preamble 的长度与节点的无线模块关断时间有关. 节点周期睡眠的时间越长, 发送节点发送数据时前导 Preamble 的长度就需要越长, 所以前导长度的增加, 又增加了发送节点的能量消耗.

LPL 协议的 Preamble 长度和周期侦听间隔需要根据应用合理设置, 其本身无法根据网络的变化对这两个参数进行自动调整. 为此在 LPL 协议的基础上, 文献 [12] 提出了改进的 LPL 协议, 称为 WiseMAC. 其基本思想是: 使每个发送节点知道邻居接收节点的具体抽样调度, 从而缩短 Preamble 的长度. WiseMAC 协议在保持网络节点的抽样调度不变的情况下, 发送节点可提前知道接收节点的抽样调度, 直到接收节点将要侦听时, 发送节点才发送适当长度的 Preamble, 这样就减少了 Preamble 的长度, 从而节省能量消耗. WiseMAC 协议通过增加控制开销, 企图减少因发送较长 Preamble 所造成的能量消耗, 其节能效果依赖于网络应用和有关参数的合理设置.

7) LMAC 协议<sup>[13]</sup>. LMAC 协议是一种基于分布式 TDMA 的信道接入协议. 它通过在时间上把信道分成许多时隙, 形成一个固定长度的帧结构. 一个时隙包含一个业务控制时段和固定长度的数据时段. 帧结构的管理机制非常简单, 每个节点控制一个时隙. 当一个节点需要发送数据包时, 它会一直等待, 直到属于自己的时隙到来. 在每个时隙的控制时段内, 节点首先广播消息头(消息头中详细描述了发送消息的接收节点地址和消息长度), 然后马上发送数据; 监听到消息头的节点, 如果发现自己不是此消息的接收者, 它会将自己的无线装置关闭. 与其他的 MAC 协议相比, 接收端正确接收一个消息后, LMAC 协议不需要向发送端回送确认消息, LMAC 协议将可靠性问题留给高层协议来处理, 通过让节点选择一个在两跳范围内的无重用时隙来调度“帧结构”. 其控制部分包含了详细的描述时隙占用信息的比特组, 欲加入网络的新节点先侦听整个帧结构, 通过或操作所有节点的时隙占用比特组, 新加入的节点能够计算出哪些时隙是空闲的, 并在其中随机选择一个时隙, 与其他新加入的节点竞争占用该时隙. 图 6 说明了 LMAC 协议的网络节点时隙调度情况.

图 6 中代表节点的每个圆圈内的数字, 既表示节点的编号, 又表示节点在周期帧中所占用的时隙号; 每个节点旁边的比特序列是帧时隙占用的比特

组表示, 其中 1 表示该位对应的时隙已经占用, 0 表示该位对应的时隙空闲. 新加入网络的节点 New node 通过侦听整个帧的时间, 获取所有邻居节点(图中的节点 2、3、5、6、7)关于帧时隙占用的比特组信息; 节点 New node 将获取的这些信息, 执行或运算得到表示邻居节点时隙占用的比特序列: 1110111, 其中只有第 4 位为零, 即该位对应的时隙为空闲. 这样节点 New node 就可以选取该时隙作为其控制时隙, 并在该时隙到来时, 在控制时段发布其表示帧时隙占用的比特组信息: 1111111; 接收到节点 New node 比特组信息的邻居节点, 对自己的比特组信息进行修改, 将第 4 位修改为 1, 以避免其他的新节点加入时把该时隙误认为空闲. 这样就完成了节点 New node 加入网络的时隙分配过程.

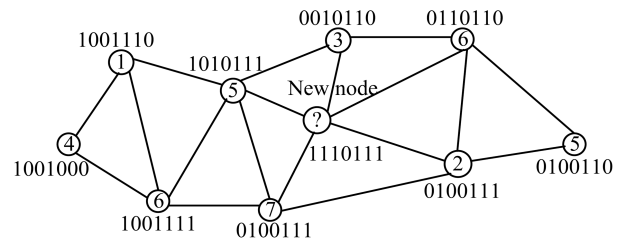


图 6 LMAC 协议的节点时隙调度

Fig. 6 The slot schedule of nodes in LMAC protocol

LMAC 协议的不足之处在于, 欲加入网络的节点必须监听整个帧结构中的所有控制时段, 甚至包括没有被使用的时隙. 因为新的节点随时会加入进来, 可采用对节点未占用时隙的控制部分进行抽样判断的方法来减少空闲监听能量消耗. 当检测到未占用时隙上有消息传递时, 将该时隙标记为占用, 并在下一个帧中相应时隙进行监听. 另外, LMAC 协议要求节点维护的帧结构时隙大小与网络的规模有关. 随着网络规模的增加, 节点的帧长度不断增大, 从而增加节点的数据传递时延, 所以 LMAC 协议的可扩展性差, 不适合大规模 WSNs 网络应用.

8) Z-MAC 协议<sup>[14]</sup>. Rhee 等在文献 [14] 中提出了一种结合 CSMA 和 TDMA 优点的混合 MAC 协议 Z-MAC. Z-MAC 协议的主要特点是: 节点根据网络的信道竞争程度, 自适应地调整信道的接入方式, 以 CSMA 作为基本的接入方式, 而利用 TDMA 解决高业务下节点间对信道的竞争. 在竞争等级较低的情况下, Z-MAC 协议的执行更像 CSMA; 在竞争等级高的情况下, Z-MAC 协议按类似 TDMA 的方式分配信道. Z-MAC 协议的执行, 在网络布置初期, 首先需要建立一个建立阶段, 包括邻居发现、时隙分配、本地帧的信息交换和网络节点的时间同步. 在这个阶段, 通过执行一个有效的分布可扩展时隙调度

DRANA 算法, 并按照如下的帧形成规则, 确定节点维护的帧时隙大小和每个时隙的状态, 为每个节点预先分配一个特定的时隙, 而且这个时隙还可以由两跳之外的其他节点重新使用. 节点的本地帧构成规则如下: 若节点  $i$  执行 DRANA 算法后, 根据节点本地的两跳邻居节点信息, 节点  $i$  的最小帧长为  $N_j$  个时隙, 并且节点  $i$  分配的数据传输时隙在最小帧长中的编号为  $s_j$  ( $s_j = 0, 1, \dots, N_j$ ), 则节点  $i$  的周期帧的帧长为  $2^m$  个时隙 ( $m$  为下式所决定的正整数:  $2^{m-1} < N_j < 2^m - 1$ ). 也即: 把每  $2^m$  个时隙组成的本地帧中的第  $s_j$  个时隙, 分配给节点  $i$ . 图 7 说明了一个简单拓扑的网络节点在执行上述帧构成规则后的节点时隙分配结果. 图 7 的上图是一个简单的网络拓扑, 每个节点旁的数字, 表示节点在每一帧中所分配的时隙  $s_j$ , 而括号内的数字, 表示参数  $N_j$ . 下图是每个节点在一个周期帧中的时隙分配结果, 其中灰色时隙表示分配给对应节点的传输时隙, 节点为该时隙的拥有者; 黑色时隙表示每一帧中的空闲时隙, 即该时隙没有分配给节点两跳范围内的任意邻居节点和节点本身. 如果整个网络采用相同的帧调度机制, 图中的节点  $A$  和  $B$ , 就需要每六个时隙占用一个传输时隙, 即周期帧的帧长为 6 个时隙. 而按照上述的本地帧形成规则, 节点  $A$  和  $B$  的周期帧的帧长为 4. 所以增加了信道的利用率, 减少了信息传输的时延. 图中的 6 和 7 两个时隙, 对整个网络节点来讲, 均为空闲时隙. 注意, 在网络节点分布均匀的情况下, 如果整个网络节点的帧时隙大小一致, 则空闲时隙的数量很小; 但在网络非均匀分布的情况下, 如果采用全局一致的帧大小, 则局部稀疏的网络节点维护的帧中, 将存在大量的空闲时隙. 这时, 利用 Z-MAC 协议的本地帧形成规则, 就可以大大减少空闲时隙的存在.

在执行上述节点时隙调度分配和本地帧构成规则之后, Z-MAC 协议要求每个节点将本地帧的大小、占用的时隙等信息转发给两跳范围内的邻居节点, 这样每个节点具有两跳范围内邻居节点的帧结构信息和时隙占用信息, Z-MAC 协议根据这些信息, 执行传输控制. 在 Z-MAC 协议中, 基于节点接收和发送数据业务的统计, 节点在传输控制中可能处于下列两种模式之一: 低竞争等级和高竞争等级. 在低竞争等级模式中, 节点在任意时隙都可以通过竞争去传输数据; 但在高竞争等级模式中, 仅允许当前时隙的拥有者和其一跳的邻居节点竞争占用该时隙. 在两种模式下, 当前时隙的拥有者具有较高的优先级. 如果当前时隙是一个空时隙, 或该时隙的拥有者没有数据发送, 则其他的非拥有者就可以通过竞

争使用该时隙. Z-MAC 协议通过使用空闲信道感知和低功率侦听的回退算法, 解决了在两种模式下节点竞争信道的优先级问题. Z-MAC 协议的具体数据传输控制规则如下: 当节点  $i$  有数据要传输时, 首先检测节点  $i$  是否是当前时隙的拥有者; 然后根据不同的检测结果, 分别采用以下三种执行方式: a) 如果节点  $i$  是当前时隙的拥有者, 节点  $i$  在固定窗口大小为  $T_0$  的时间间隔内, 执行随机回退. 当随机回退时间结束时, 节点  $i$  开始侦听信道. 如果信道空闲, 就开始传输数据; 如果信道忙, 节点  $i$  等待直到信道空闲, 并重复这个过程. b) 如果节点  $i$  是当前时隙的非拥有者, 而且处于低竞争等级模式, 或者虽然处于高竞争等级模式, 但当前时隙为空闲时隙, 那么节点  $i$  首先等待  $T_0$ , 然后在竞争时间窗口  $[T_0, T_n]$  内随机回退. 当随机回退时间结束时, 节点  $i$  执行空闲信道侦听. 如果侦听信道空闲, 节点就开始传输数据; 如果侦听信道忙, 节点就等待, 直到信道空闲, 并重复同样的过程. c) 如果节点  $i$  是当前时隙的非拥有者, 并且处于高竞争模式, 那么节点  $i$  就延后传输, 直到出现一个空闲时隙或节点  $i$  为时隙的拥有者, 然后重复以上过程.

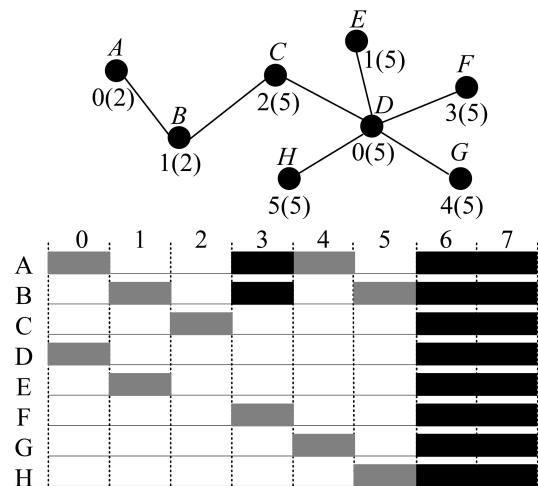


图 7 Z-MAC 协议的节点时隙调度

Fig. 7 The slot schedule of nodes in Z-MAC protocol

Z-MAC 协议在网络布置初期引入大量的网络开销, 而通过网络长期高效运行, 对开销所消耗的能量可以进行弥补. 在网络执行过程中, 只要网络的拓扑不发生大的变化, Z-MAC 协议具有很强的鲁棒性. 除了初始需要全网同步外, Z-MAC 协议仅需要两跳邻居发送节点间的本地同步, 并且本地同步的执行频率与节点的数据业务率成正比. 所以 Z-MAC 协议是一个分布式的协议, 具有良好的可扩展性, 对节点的存储能力要求也较低; 但 Z-MAC 协议的执



行很复杂, 每周控制时隙的引入, 随着网络的密度增加会引入较多的控制开销, 在低业务情况下又造成了延时增加和能量的严重浪费。

9) LEEM 协议<sup>[15]</sup>. 文献 [15] 提出了一种用于多跳 WSNs 网络, 且基于预约机制的最小延时能量有效 MAC 协议 (LEEM). LEEM 协议是对 STEM 协议<sup>[16]</sup> 的改进. LEEM 协议要求网络节点采用双频的无线收发器结构, 其中控制信道执行信道的一跳或  $N$  跳预约, 数据信道传递数据报文. LEEM 协议网络节点的控制信道采用周期侦听/睡眠的方式工作, 在控制信道的周期侦听活动时间内, 执行数据信道的预约; 数据信道只有在传递和接收数据时才唤醒. 若用  $T_{total}$ 、 $T_{sleep}$  和  $T_{active}$  分别表示节点控制信道的侦听周期、周期睡眠时间和侦听时间, 用  $T_{data}$  表示数据报文的传输时间, 则当  $T_{data}$  大于  $T_{total}$  时, LEEM 协议执行一跳预约; 而当  $T_{data}$  小于  $T_{total}$  时, 执行  $N$  跳预约 (这里,  $N = T_{total}/T_{data}$ ). LEEM 协议执行一跳预约的过程如下: a) 当网络节点感知到事件发生时, 等待直到其控制信道的侦听活动时间到来, 然后在控制信道发送 REQ 请求报文 (该报文中除了包括接收节点地址外, 还包括一个附加字段, 用于指定数据传输的持续时间). b) 接收到 REQ 报文的一跳中继节点, 如果数据信道空闲, 就在控制信道用 P-ACK 进行确认应答; 如果数据信道忙, 就用 N-ACK 进行拒绝请求应答. c) 感知事件发生源节点, 根据接收到的应答 ACK 是确认还是拒绝, 决定执行数据传输还是转入睡眠状态. 如果接收到确认的 P-ACK, 立即唤醒其数据信道; 同时, 执行 P-ACK 响应的一跳中继节点, 根据接收到的 REQ 报文包含的时间信息, 也唤醒其数据信道; 然后就开始在数据信道进行数据传输. 如果接收到拒绝的 N-ACK 应答, 说明当前预约接收节点的数据信道忙, 该节点的控制信道立即转入睡眠状态, 等到下一个控制信道的侦听活动时间到来时, 再继续执行上述同样的过程, 直至接收到正确的 P-ACK 应答才可以在数据信道进行数据的传输. d) 正在接收数据报文的节点, 当其控制信道的周期侦听活动时间到来时, 根据正在接收的数据报文包含的控制信息, 在控制信道发送 RES 请求报文, 按照同源节点发送 REQ 报文执行的类似过程, 预约其接收节点并执行数据传输. 持续执行这个过程, 直至将数据传递到最终目的节点. 如果在每一跳的预约过程中, 接收到 REQ 或 RES 的一跳接收节点的数据信道都是空闲的, 那么由于预约是在数据传输过程中由节点的控制信道进行的, 每一跳的数据传输在前一跳传输完成后都可以立即进行, 从而消除了数据在传递过

程中等待建立链路的时延. 关于 LEEM 协议的多跳预约执行过程, 同其一跳的预约类似, 不再详述, 具体可参见文献 [15]. 图 8 说明了 LEEM 协议执行一跳预约的数据传递过程.

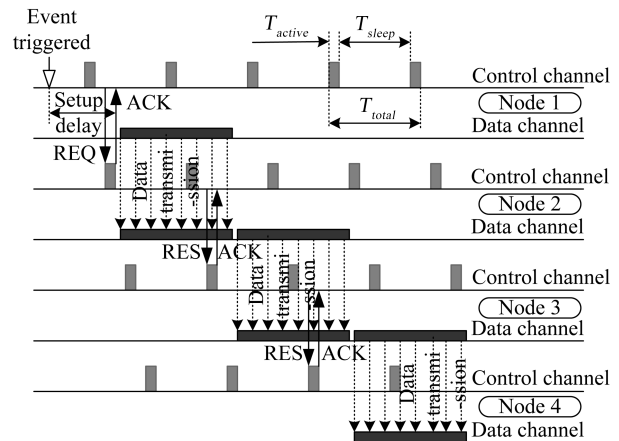


图 8 LEEM 协议的多跳数据传递过程

Fig. 8 The multihop data transmission of LEEM protocol

图 8 中, 感知事件发生的源节点 1, 通过执行上述过程, 在每一跳相继成功预约了节点 2, 3, 4 分别作为前一跳的接收节点, 除了最初的等待时延 (图中的 Setup delay) 外, 消除了数据传输 (图中的 Data transmission) 过程中的每一跳等待时延。

LEEM 协议是针对基于事件驱动的 WSNs 网络特点而设计的 MAC 协议, 通过增加节点硬件的复杂性, 控制信道采用周期侦听/睡眠的工作方式, 减少了节点的能量消耗, 并且使时延最小. 但 LEEM 协议要求网络节点间保持同步, 并且在执行预约的过程中, 要求节点必须存储下列信息: a) 发起预约节点的地址; b) 预约成功后数据信道的唤醒时间; c) 当前数据的传输时间. 这又增加了节点能量的消耗和对节点存储能力的要求。

10) GeRaF 协议<sup>[17-18]</sup>. 文献 [17-18] 提出了一种基于节点的地理位置信息, 并通过接收节点间竞争来选择中继节点的数据转发方法. 在上述这些思想和碰撞避免机制的基础上, 设计了一种称为 GeRaF 的 MAC 协议. GeRaF 协议假设网络节点的位置是固定的, 或具有很低的位置移动性; 每个节点的位置已知, 并且所有节点都知道最终目的节点 SINK 的位置; 每个节点具有两个无线收发模块: 数据信道和忙音信道. 网络节点的数据信道工作于周期性的侦听/睡眠模式, 且各节点的活动是随机的, 不要求同步, 用于发送数据和控制报文; 节点的忙音信道用于发送忙音, 在业务交换过程中通过控制发送忙音以避免碰撞. 基于类

似 IEEE 802.11 的信道接入机制, GeRaF 协议采用 RTS/CTS/DATA/ACK 的握手机制, 建立节点间的数据链路并执行数据传输. 但这里的 RTS 消息中, 并不指定特定的下一跳邻居节点. 在 RTS 消息中, 通过附加数据发送的源节点位置信息和最终目的节点 SINK 的位置信息, 由能侦听到 RTS 消息的所有一跳邻居节点, 根据其位置分布, 评估自己作为中继接收节点转发信息的优先级, 并根据优先级确定参与应答 CTS 消息的时机, 采用一定的评价指标尽力去选取最好位置的节点作为中继. 由于可能存在多个相同优先级的候选接收节点, 同时用 CTS 消息进行应答, 所以需要采用碰撞分解的方法解决 CTS 消息的碰撞, 以选取唯一的候选节点作为接收中继节点. 数据传输的碰撞避免是通过控制信息的握手过程而解决的. 而在这个过程中, 为了进一步避免可能的隐藏和暴露终端问题, 利用忙音信道在数据信道侦听消息期间发送忙音, 从而确保建立的数据链路不会受到邻居节点的干扰. 这样, 执行 GeRaF 协议的网络节点, 既不需要维护网络拓扑信息, 也不需要维护路由表, 仅位置信息就足够了, 把路由、MAC 和拓扑管理整合为单一的层, 使协议大大简化.

GeRaF 协议实现容易, 并且协议的执行是分布式的, 具有良好的可扩展性, 对节点的内存资源要求也很低. 但 GeRaF 协议需要网络具有足够高的节点密度, 而且协议的能效性直接与优化的性能参数有关. 在非优化的参数, 如节点的占空比等一定的情况下, 执行该协议的能效性较差. 另外从该协议的执行来看, 选取的中继节点也并不一定是最佳的. 如何改进该协议使其适应网络节点密度的变化, 以降低对节点密度的要求是该协议需要进一步研究的问题.

#### 4 协议的比较

表 1 (见下页上方) 对所研究的 MAC 协议进行了综合比较. 表 1 中的适应性指的是适应网络拓扑变化的能力; 信道利用率和吞吐量表示在低业务 WSNs 网络应用的情况下网络的性能. 由于 WSNs 网络依赖于应用, 而且物理层的结构也不统一, 节点的硬件结构呈现多样性的特征, 所以并没有形成一个公认的标准 MAC 协议. 从对能量有效性和其他性能指标如延迟、吞吐量等的比较发现, 所有的 MAC 协议在节能和延迟性能之间, 都存在不同程度的矛盾性, 而且并没有某一种 MAC 协议在各方面同时比其他协议表现得更优. 每种协议都有自己的优点和缺点, 需要根据应用在能效性和其他性

能、要求之间取得平衡. 基于竞争类的 MAC 协议通常具有良好的可扩展性和能量有效性, 在低业务的 WSNs 网络应用中具有较好的吞吐量性能, 但无法避免碰撞问题, 从而带来了延时. 基于调度的 TDMA 类 MAC 协议没有竞争机制的碰撞重传问题, 节点在空闲时隙能及时进入睡眠状态, 从而节省节点的能量消耗. 但 TDMA 类的 MAC 协议需要节点间的时间同步. 由于节点的接入时隙是固定的, 在低业务情况下, 空闲时隙增多, 网络的吞吐量很低, 而且网络的可扩展性和对网络拓扑动态变化的适应性差. 为了弥补这些不足, 需要增加控制开销, 这又降低了能效. 混合类和基于双信道的 MAC 协议, 分别通过增加控制开销和节点的结构复杂性, 进一步改进了能量有效性和其他性能, 同时也具有较好的适应性和可扩展性, 但仍然存在能量有效性和其他性能的矛盾性, 协议的执行过程也更复杂. 所以好的 MAC 协议应根据能量有效性和网络的其他性能, 综合进行评估, 其中能量有效性, 在满足应用要求前提下, 是衡量一个好的 MAC 协议的关键因素.

#### 5 总结和展望

由于 WSNs 网络的资源有限且与应用高度相关, 研究人员采用了多种策略来设计 MAC 协议<sup>[19-26]</sup>. 通过对当前提出的各种应用于 WSNs 网络的 MAC 协议进行研究与分析, 我们得到的结论是: 由于不同应用场合对网络的要求不同, 对 MAC 协议来说, 不存在一个适用于所有 WSNs 网络应用的 MAC 协议, 也没有一种协议在各方面明显强于其他协议, 各种 MAC 协议在能量有效性和网络延迟等性能之间, 都存在不同程度的矛盾性, 且受到多方面因素的制约. 但能量有效性是设计一个好的 MAC 协议的关键因素, 能量高效的 MAC 协议仍然是今后的一个开放性研究课题. 在现有研究的基础上, 我们认为, 将来 WSNs 网络 MAC 协议的进一步研究策略和发展趋势如下:

1) 利用多信道和动态的信道分配技术进行节能研究. 随着微电子机械技术的发展, 低能、低成本、集成具有多信道或两个不同频率无线模块的收发器已经成为可能. 合理地使用多个信道的资源, 基于局部节点协作的方法, 进行信道的动态分配, 可以实现节能和改进网络性能. 信道分配技术利用调度算法, 在发送时隙和节点之间建立起特定的映射关系, 为我们进行节能协议的设计提供了良好的条件, 如: 在

表1 MAC 协议的特征比较

Table 1 Comparison of characteristics on MAC protocols

比较参数	C-TDMA	SMACS/EAR	S-MAC	T-MAC	PMAC	LPL	LMAC	Z-MAC	LEEM	GeRaF
能量有效性	较好	较好	较好	较好	好	较好	较好	较好	较好	较好
可扩展性	差	较好	好	好	好	好	差	较好	较好	好
信道利用率	差	差	较好	较好	较好	较好	差	较好	较好	好
延迟	差	差	一般	一般	一般	一般	差	一般	好	较好
吞吐量	差	一般	较好	好	好	较好	一般	好	较好	较好
同步要求	需要	不需要	不需要	不需要	不需要	需要	不需要	低	需要	不需要
类型	TDMA	TDMA/FDMA	CSMA	CSMA	CSMA	CSMA	TDMA	CSMA/TDMA	CSMA	CSMA
适应性	差	差	较好	较好	好	较好	差	较好	好	好
通信模式	会聚/广播	闲聊	所有	所有	所有	闲聊	所有	所有	所有	所有
信道数	单信道	单信道	单信道	单信道	单信道	单信道	单信道	单信道	双信道	双信道

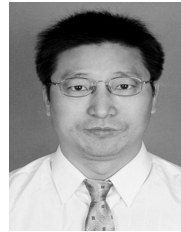
本文研究的 ZMAC 协议基础上, 把 TDMA 和 CSMA 相结合, 采用合适的分布式算法, 根据节点的流量, 基于概率的方法动态调整节点的分配时隙, 维护网络的局部连通性, 避免和减少碰撞, 使无关和低业务的节点, 尽可能睡眠以节省能量. 由于 WSNs 网络分布的环境恶劣, 链路的易故障性和节点的易失效性, 也可以进一步探讨利用认知无线电技术、基于分布式的方法, 动态自适应地分配节点的多个信道, 以适应不同业务、网络拓扑变化的要求, 提高能效性和网络性能.

2) 采用跨层优化设计. WSNs 网络由于受到节点的资源限制, 分层的协议栈已不适应能量、内存等节点资源的有效利用. 将 MAC 层、物理层以及网络层的设计相结合, 根据局部网络的拓扑信息, 采用综合各层的设计方法, 实现对节点工作模式的有效控制, 减少控制开销, 从而取得更好的网络性能<sup>[24,26]</sup>. 本文介绍的 GeRaF 协议, 就是通过把 MAC、路由和拓扑管理结合为一体考虑, 采用双射频模块的协作, 解决数据传输的碰撞问题, 并简化了采用分层协议可能带来的额外控制开销, 使协议的执行简单, 从而提高能效性和网络性能. 但如何根据网络拓扑的变化, 动态调整节点的工作参数和优化握手信号, 利用最小的控制开销以节省节点的能量消耗、减少数据传输接入信道的时延, GeRaF 协议并没有给出相应的解决方法. 而基于竞争的自适应 S-MAC、PMAC 协议, 基于局部信息的维护, 具有适应业务、拓扑动态变化的能力; LPL 协议通过利用物理层的前导载波, 减少了节点的空闲侦听. 所以利用这些协议的优点, 就可以进行跨层设计, 从而增强协议的适应性, 同时提高能效和网络性能. 基于联合多层的参数优化, 进行跨层和集成多层协议栈的综合设计, 是 WSNs 网络今后的一个研究热点.

## References

- 1 Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, **40**(8): 102–114
- 2 Kulkarni S S, Arumugam M. Tdma service for sensor networks. In: *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2004. 604–609
- 3 Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 2006, **44**(4): 115–121
- 4 Arisha K A, Youssef M A, Younis M F. Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks. In: *Proceedings of IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking*. New York, USA: IEEE, 2002. 189–201
- 5 Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie G J. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 2000, **7**(5): 16–27
- 6 Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. New York, USA: IEEE, 2002. 1567–1576
- 7 Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, **12**(3): 493–506
- 8 Dam T V, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. California, USA: ACM, 2003. 171–180
- 9 Zheng T, Radhakrishnan S, Sarangan V. PMAC: an adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*. New York, USA: IEEE, 2005. 66–72

- 10 El-Hoiydi A. Aloha with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications. New York, USA: IEEE, 2002. 3418–3423
- 11 Hill J L, Culler D E. Mica: a wireless platform for deeply embedded networks. *IEEE Micro*, 2002, **22**(6): 12–24
- 12 El-Hoiydi A, Decotignie J D. WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks. In: Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Computers and Communications. New York, USA: IEEE, 2004. 244–251
- 13 Chatterjea S, Van Hoesel L F W, Havinga P J M. AILMAC: an adaptive, information-centric and lightweight MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2004 Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference. New Jersey, USA: IEEE, 2004. 381–388
- 14 Rhee I, Warrier A, Aia M, Min J. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. California, USA: ACM, 2005. 90–101
- 15 Dhanaraj M, Manoj B S, Siva R M C. A new energy efficient protocol for minimizing multi-hop latency in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. New Jersey, USA: IEEE, 2005. 117–126
- 16 Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, Srivastava M. Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2002, **1**(1): 70–80
- 17 Zorzi M, Rao R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: multihop performance. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, **2**(4): 337–348
- 18 Zorzi M, Rao R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2003, **2**(4): 349–365
- 19 Jamieson K, Balakrishnan H, Tay Y C. Sift: an MAC protocol for event-driven wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks. Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 2006. 260–275
- 20 Miller M J, Vaidya N H. An MAC protocol to reduce sensor network energy consumption using a wakeup radio. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2005, **4**(3): 228–242
- 21 Rajendran V, Obraczka K, Garcia-Luna-Aceves J J. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2006, **12**(1): 63–78
- 22 Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C S. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks. In: Proceedings of the 18th International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium. Palmerston, USA: IEEE, 2004. 224–231
- 23 Lin P, Qiao C M, Wang X. Medium access control with a dynamic duty cycle for sensor networks. In: Proceedings of the 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New York, USA: IEEE, 2004. 1534–1539
- 24 Tay Y C, Jamieson K, Balakrishnan H. Collision-minimizing csma and its applications to wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, **22**(6): 1048–1057
- 25 Rugin R, Mazzini G. A simple and efficient MAC-routing integrated algorithm for sensor networks. In: Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Communication. New Jersey, USA: IEEE, 2004. 3499–3503
- 26 Cui S G, Madan R, Goldsmith A J, Lall S. Joint routing, MAC, and link layer optimization in sensor networks with energy constraints. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Communications. New Jersey, USA: IEEE, 2005. 725–729



**郑国强** 西安电子科技大学博士研究生, 河南科技大学副教授. 主要研究方向为移动通信、无线网络. 本文通信作者.  
E-mail: lyzhengguoqiang@sina.com.cn  
(ZHENG Guo-Qiang Ph. D. candidate at Xidian University. He is also an

associate professor at Henan University of Science and Technology. His research interest covers mobile communication and wireless networks. Corresponding author of this paper.)



**李建东** 博士, 西安电子科技大学通信工程学院教授. 主要研究方向为个人通信、移动通信网、分组无线网、自组织网络、软件无线电和宽带无线 IP 技术.  
(LI Jian-Dong Ph. D., professor in Communication Engineering College at Xidian University. His research interest

covers personal communications, mobile communication networks, packet radio networks, wireless ad hoc networks, software radio, and broadband wireless IP systems.)



(周志立 博士, 河南科技大学教授. 主要研究方向为网络化车辆监测与控制技术.  
(ZHOU Zhi-Li Ph. D., professor at Henan University of Science and Technology. His research interest covers

networking vehicle surveillance systems and control techniques.)