

无线传感器网络分布式调度方法研究

牛建军^{1,2} 邓志东¹ 李超¹

摘要 无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 是一个资源受限的网络系统. 已提出了多种调度方法来提高网络性能. 本文归纳了 WSN 分布式调度方法的设计原则和分类方法, 并按调度对象对调度方法进行了分类讨论. 详细论述了一些典型调度方法的内在机理, 分析了每一类调度方法的特点. 对这些调度方法的设计目标和性能特点进行了对比. 最后总结了 WSN 分布式调度方法的研究现状, 提出了该领域今后发展需要关注的重要因素.

关键词 无线传感器网络, 分布式, 调度, 综述

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.00517

Distributed Scheduling Approaches in Wireless Sensor Network

NIU Jian-Jun^{1,2} DENG Zhi-Dong¹ LI Chao¹

Abstract Wireless sensor network (WSN) is a resource constrained network system. Many kinds of scheduling approaches have been proposed to improve the performances of WSN. In this paper, the design principles and classification methods for distributed scheduling approaches of WSN are summarized. And the scheduling approaches are discussed and classified with respect to scheduling object. The fundamental mechanisms of some typical approaches are discussed further and the characteristics of each class are analyzed in detail. Comparison between the designed objects and the performance features of these scheduling approaches are presented. Finally, the current research situations for distributed scheduling approaches of WSN are summarized and the key aspects for further research are also suggested.

Key words Wireless sensor network (WSN), distributed approach, scheduling, survey

无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 是由大量集成了无线传输能力、感知能力和计算能力的节点, 通过相互协作而形成的自组织网络. 这些节点将感知的数据经过多跳通信传输到汇聚节点, 达到对某一区域进行监控的目的^[1]. 自从 20 世纪末期出现以来, WSN 在环境监测、建筑物结构监控、目标定位等众多领域得到了大量的应用和研究^[2].

WSN 是一类资源受限的网络^[1,3]. 其应用受到以下因素约束: 节点能量、通信带宽、计算能力和存储能力. 因此, WSN 应用就需要在这些约束条件下采取有效方法提升网络性能. 近年来, WSN 调度方法受到了越来越多地关注, 成为 WSN 研究的一个热点. 在资源受约束条件下, 调度技术是优化 WSN 性能的一种重要方法. 然而, 即使在简单假设和限制条件下, WSN 调度问题也是一个 NP-hard 问题^[4-10]. WSN 调度方法主要是指: 为完成具体的任务, WSN 节点所进行的与资源分配相关的方法和

策略. 一般分为集中式和分布式两类方法. 我们对当前典型的 WSN 分布式调度方法进行总结和分类, 详细分析了它们的设计机理、特点, 并比较了它们的性能差异. 最后, 对 WSN 分布式调度方法的未来研究提出建议, 以期对 WSN 调度方法的进一步研究提供借鉴.

本文组织如下: 第 1 节提出了 WSN 调度方法的主要设计目标; 第 2 节讨论了调度方法的分类; 第 3 节详细分析并讨论了一些代表性的分布式调度方法; 第 4 节对这些方法进行了对比和讨论; 第 5 节总结并提出了今后的一些研究方向.

1 调度方法的设计目标

当前, WSN 分布式调度方法主要从以下几个方面优化网络性能, 并将之作为设计的主要目标.

1) 能量效率^[1-4]. 由于 WSN 节点能量有限, 因而, 提高节点能量效率, 延长节点和网络的生存期是主要目标.

2) 覆盖度^[11]. 覆盖度是指在网络监控范围内, 某一区域或某一位置能被多少个节点有效感知. 多个节点覆盖某一区域 (或点) 时, 可以提高监控可靠性和精度, 但是会消耗多个节点能量.

3) 网络延迟^[12-13]. 网络延迟是指数据包从源节点发出后被 Sink 节点接收所经历的时间. 实时监控和多媒体应用都对延迟有很严格的要求. 这就对

收稿日期 2010-07-28 录用日期 2010-12-27
Manuscript received July 28, 2010; accepted December 27, 2010
1. 清华大学计算机系, 清华国家信息科学与技术国家实验室 (筹), 智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084 2. 北京特种工程设计研究院 北京 100028
1. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084 2. Beijing Special Engineering Design and Research Institute, Beijing 100028

WSN 的应用提出了严峻挑战^[14].

4) 吞吐率^[12]. 吞吐率是指 Sink 节点的数据接收率, 反映网络带宽的利用状况. 信号冲突会引起数据包的重传, 从而降低吞吐率. 另外, 节点休眠会影响数据传输, 也会影响吞吐率的大小.

5) 连通性^[11, 15]. 当节点能通过多跳通信将数据发送到 Sink 节点时, 称该节点是连通的. 节点休眠或信号发送距离调整后, 会引起网络拓扑的改变, 需要连通性保证数据能被 Sink 节点接收.

WSN 节点多为静止的或移动较慢. 这些节点通常高密度、大范围布置, 并且需要长期、连续地获取数据. 由于节点一般采用电池供电的形式, 且难于对电量进行有效地补充, 因而如何提高网络生存期成为 WSN 应用中一个首要的设计目标^[16-17]. WSN 调度方法主要通过调度节点的工作/休眠状态达到增加节点处于低功耗状态的时间; 或者降低数据包冲突, 减少因冲突引起的能量消耗. 但是, 这些都不避免地对网络其他性能带来影响. 因而, WSN 调度方法一般需要对不同的设计目标进行折中.

2 调度方法分类

当前, 针对 WSN 的不同特点和应用, 大量的 WSN 调度方法相继提出. 但是, 调度方法的分类标准尚未统一. 文献 [6] 提出了两种分类方法. 1) 按调度内容分为工作调度和传输调度. 工作调度是在满足应用的前提下, 节点在工作时唤醒, 非工作时休眠的方法, 是一种应用层的方法. 传输调度对节点的传输时间分配, 使节点在不需要传输数据时进入休眠, 并减少数据冲突的发生, 是在传输层和 MAC (Media access control) 层实现的方法; 2) 按计算方式分为集中式调度和分布式调度. 而文献 [18] 则提出了三种分类方法: 1) 按对区域覆盖程度分为基于完全覆盖的调度和基于非完全覆盖的调度; 2) 按调度方法是否最优划分为最优调度和次优调度方法; 3) 划分为包调度和基于休眠的调度方法. 文献 [19] 对分布式调度方法的假设条件和设计目标进行了归纳和分类. 这些假设条件包括时间同步、网络结构、节点位置等; 设计目标包括 QoS、覆盖度、扩展性等. 随着 WSN 应用和研究的不断深入, 大量 WSN 调度方法陆续出现, 还可以采用以下分类方法:

1) 根据调度结果, 按节点进入的工作状态分为休眠调度、唤醒调度和发送调度等;

2) 根据信道类型分为基于竞争信道的调度、基于非竞争信道的调度和混合方式的调度;

3) 根据节点工作周期是否同步, 可以分为基于工作周期同步的调度和基于工作周期异步的调度;

4) 根据调度形成时节点间的合作方式, 可以分为基于协作的调度和自感知的调度.

本文采用类似文献 [6] 中的分类方法按调度对象对 WSN 分布式调度方法进行分类, 通过扩展, 将 WSN 分布式调度方法分为节点调度、包调度、传输调度、功率调度和 MAC 调度共 5 大类.

3 调度方法分类

本节将详细介绍一些具有代表性的调度方法.

3.1 节点调度 (Node scheduling)

节点调度是在完成监控任务的前提下, 通过减少处于工作状态的节点数量, 达到节省节点能量和延长网络生存期的一类调度方法. 该类方法一般将节点的状态划分为活动和休息两种. 节点在活动时, 完成感知、通信和处理等任务; 在休息时, 会处于某种程度的休眠状态. 节点调度的前提是在降低节点能量消耗的同时, 不能降低系统的覆盖度要求.

Tian 等提出了一种满足感知区域覆盖度的分布式节点调度方法 (Coverage-preserving node scheduling, CPNS)^[20]. 该方法设定节点知道自己的感知范围, 并且节点间保持时钟同步. 节点的工作周期分为调度阶段和工作阶段两部分. 在调度阶段, 节点构建与邻居节点的位置关系. 当节点发现自己的感知区域可以被其邻居节点所覆盖时, 调度自己在工作阶段退出工作状态; 否则节点进入工作阶段. 为了避免多个节点同时进入休眠状态而出现盲点, 该方法引入了回退策略, 使节点在进入休眠状态之前随机延迟一段时间后再作判断. 节点剩余能量较少时, 回退时间也较短, 从而有更多的机会进入休眠状态, 达到了平衡节点能量消耗的目的. 在节点进行覆盖度计算时, 该方法需要知道自身的坐标、邻居节点的坐标, 以及自己的感知区域. 这需要节点具有较高的计算能力. 另外, 边界节点不能进入休眠也是该方法需要加以改进的地方.

节点休息时如果将通信电路也关闭, 会引起拓扑结构的改变. 此时, 为完成监控任务, WSN 还必须保持网络连通性. Xing 等提出的 (Coverage configuration protocol, CCP) 方法^[21] 将覆盖度与连通度有机地结合在一起. Xing 等首先证明了当节点的通信半径不小于两倍的感知半径时, 如果一个凸区域被一群节点 k -覆盖, 则这群节点还是 k -连通的. 从而将区域覆盖问题转化为求区域内节点间交点的覆盖问题. 当一个节点发现自身感知区域内的节点已被 k -覆盖时, 它就进入睡眠状态, 达到节能的目的; 否则进入工作状态. 该方法的时间复杂度为 $O(N^3)$, 其中, N 是处于节点感知范围内的节点个数. CCP 能够按指定的覆盖度和连通度来配置节点, 从而具有很好的适应性. 但是, 节点依然必须知道自己和邻居节点精确的坐标信息, 因而计算能力要求大. 而且

当节点通信半径小于两倍的感知半径时, 需要与其他方法相结合保证连通性。

节点交换坐标信息, 需要占用大量的带宽, 并且覆盖度的计算需要较高的计算能力。针对上述问题, 在不需要对区域 100% 完全覆盖的前提下, Tian 等提出了三种无需位置和计算的 (Location-free and calculation-free node-scheduling, LCFS)^[22] 节点调度方法: 基于邻居距离、基于邻居节点数量和基于概率的调度方法。该方法将节点休眠后自己可感知区域内未被其他节点感知的区域称为附属未观测区域 (Auxiliary unobservable area, AUA), 可被其他节点感知的区域为附属可观测区域 (Auxiliary observable area, AOA)。系统首先定义节点最大的 AUA 区域。在调度之前, 节点通过预先计算得到的 AOA 与距离、节点数量或概率的对应关系得到三种调度方法所需的门限值: 最近邻居节点距离 D 、最小邻居节点数量 K 或概率值 ρ 。然后, 节点根据相应门限值来调度自己是否休眠。LCFS 方法允许一定程度的覆盖度降低。这三种 LCFS 方法由于无需知道节点的位置信息, 因而, 节点间通信量和计算量都较小。但是, 它认为节点的感知半径和通信半径都是一个圆形, 这过于简单化。而且, 所得出的非感知区域的值是一个估计值, 当节点数量较高时, 与实际情况接近; 但是节点数量较少时, 精度会下降。

上述节点调度方法都需要通过信息交互知道节点的位置或距离信息, 而 (Randomized independent sleeping, RIS)^[23] 和 (Asynchronous random sleeping, ARS)^[24] 方法只是根据节点自身的工作状态进行调度, 节点间无需交换控制信息, 因而, 较其他方法更加简单。RIS 中节点间保持时钟同步, 并将时间分成固定的时间周期。在 k -覆盖和网络生存期满足一定长度的条件下, RIS 方法首先确定 WSN 中活动节点的数量。在每一个周期开始时, 节点独立地以概率 p 唤醒并工作, 以概率 $(1-p)$ 休眠。因而, 网络的生存期可以提高 $1/p$ 倍。当节点数量非常多, 并且节点数量、节点感知半径、概率 p 和 k 满足一定条件时, RIS 方法能以概率 1 保证 k -覆盖。ARS 方法也将时间分为具有固定长度的时槽。但是, 节点无需时钟同步。不同节点工作周期的起始时刻不相同。该方法无法保证完全的 k -覆盖, 只是用连续 k -覆盖时间的期望和非 k -覆盖时间的期望来反映该调度方法的性能。它更适合事件发生不频繁的监控应用, 可以获得与 RIS 相近的性能。该类调度方法以固定的概率调度节点的休眠概率, 适应性能较差。

节点调度一般需要节点高密度配置, 并有大量冗余; 对底层协议的要求低, 移植性好。根据覆盖度的不同可将 CPNS 和 CCP 方法划归为基于完全覆盖的调度, 将 LCFS、RIS 和 ARS 方法归为基于非

完全覆盖的调度。另外, 还可以根据调度机制中节点与其他节点的关系, 将 CPNS、CCP 和 LCFS 方法划归为基于邻居信息的节点调度; 将 RIS 和 ARS 方法划归为自主的节点调度方法。通常情况下, 基于完全覆盖的方法比基于非完全覆盖的方法需要较多的控制开销; 基于邻居信息的方法比自主调度方法的复杂度要高。节点调度会引起网络拓扑结构变化, 而节点调度缺乏对拓扑控制问题明确的定义和实用的算法^[25]。另外, 节点调度通常只将节点划分为工作和休息两种工作方式, 因而提升能效的空间还很大。

3.2 包调度 (Packet scheduling)

传统网络中的包调度一般指路由器对所存储数据包的发送顺序进行调整。常见的包调度方法有: 先入先出调度 (First in first out)、随机早期检测 (Random early detection) 和轮询调度方法 (Round robin) 等^[26]。在无线通信中, 包调度主要目的是为不同数据流分配信道带宽和最大化的信道带宽^[27]。

针对事件监测 WSN 应用中数据包的拥塞问题, 鞠海玲等在文献 [27] 中提出了一种基于包调度的拥塞控制机制 (EasiNet congestion control mechanism, EasiCC)。数据流源节点采用一种指数型标定方法将数据报文按比例划分到各优先级中; 各网络节点根据网络拥塞程度动态地、同步地调整报文的过滤标准, 达到保证无线信道带宽分配上的公平性; 将网络准入控制和队列丢包手段相结合来调整网络流量, 保证了网络综合性能指标。模拟和实验结果显示, 该方法在报文传输成功率、传输延迟等性能指标上表现良好。EasiCC 方法利用了网络流量的稳定性, 根据历史流量情况来预测未来网络流量和分配带宽; 控制报文是触发产生, 适用于数据流量和网络拓扑变化不频繁的应用场景。

Yin 等^[28] 针对事件检测应用中, 当多个节点检测到同一个事件并进行数据发送时, 会因信号冲突产生数据包丢失、而减少信号冲突却又增加延迟的情况, 提出了一种基于优先级的包调度方法 (Priority-based queue management and packet scheduling, PQMPS)。根据离事件发生地越近的节点, 通常其感知事件的时间越早这一原理, 基于时间片技术, 该方法将较早检测到的数据包赋予较高的优先级, 为数据包标注不同的重要性。节点优先发送优先级高的数据包; 当队列满了以后, 先丢弃优先级低的数据包。从而, 提高了网络的有效吞吐率, 减少了重要数据包的延迟。但是, 该方法适用于监视区域固定、事件发生频率小, 而且采样较高的应用场合。

包调度也是 WSN 节点级拥塞控制方法, 可以

解决不同数据流的带宽分配问题. 但对于重要事件的监测、如何避免出现拥塞、实时可靠地将数据传送到 Sink 节点还需要进一步研究^[29].

3.3 传输调度 (Transmission scheduling)

传输调度是一种传输控制机制, 通过对数据包发送时刻进行分配, 平滑网络数据流量, 降低数据包冲突概率, 达到减少传输时延或节省节点能量的目的^[30-31]. 传输调度可在网络协议的多个层中开展研究, 如链路调度也可以认为是一种传输调度机制.

Chen 等在文献 [32] 提出了一类随机最短路由策略 (Stochastic shortest path approach, SSPA), 并提出了两种延长 WSN 生存期的分布式传输调度方法: 利用信道统计信息的最优调度方法 (Optimal transmission scheduling using channel statistics) 和利用局部信道状态信息的渐近最优调度方法 (Asymptotically optimal transmission scheduling using local CSI). 该策略考虑在一个单跳的 WSN 中, 节点定期收集数据. 通过只要求一组节点发送数据来延长网络的生存期. 在利用信道统计信息的最优调度方法中, 将调度问题转化为随机最短路径多臂赌博机问题 (Stochastic shortest path multi-armed bandit problem). 用 Gittins 指数 (Gittins index) 表示节点可以获得的最小奖励值, 同时也表示节点剩余能量. 在每一个时间段起始时, Gittins 指数越大的节点发送数据时具有越少的回退时间. 在利用局部信道状态的渐近最优调度方法中, 节点根据剩余能量和发送所需能量确定节点的能效指数 (Energy-efficiency index). 在每一时间段中, 能效指数大的节点发送数据包时具有较短的回退时间. 该算法的复杂度为网络节点数量的多项式时间. 该算法在每个时间段中都需要中心节点发送信标帧来估计自己的局部信道状态或信道统计信息. 该算法假设每个信道的衰减服从独立同分布.

Visweswara 等^[33] 针对定期采集数据的 WSN 应用, 提出了一种分布式调度方法 (Adaptive ad hoc self-organizing scheduling, ASOS). 该方法的基本思想是让节点找到发送和接收数据的调度表, 然后在工作周期中按调度表工作. 该文献定义远离 Sink 节点的方向是上游方向, 靠近 Sink 节点的方向是下游方向. 节点首先记录上游邻居节点的数据包到达时间间隔, 用来构建上游节点交通流量的概率分布; 其次, 节点通过该分布来整形自己的数据包发送, 使节点的数据包发送不会与上游节点的数据包发送产生冲突; 然后节点接收完数据后, 根据上游节点发送数据的时间, 确定自己的休眠时间. 该方法不需要节点间交换控制信息, 对流量的缓慢变化具有一定的适应性. 但是, 该方法不适用于流量变化较

大的应用; 其数据包的丢失率还需要进一步研究. 另外, 该方法未考虑下游节点的工作特性, 而且收敛速度较慢.

文献 [34] 提出了一种基于马尔可夫链的分布式调度方法 (Markov chain-based scheduling approach, MBSA). 其主要原理是根据节点和相邻上、下游节点的统计信息调整节点的调度概率, 对发送操作和休眠进行调度. 该方法对节点的状态进行划分, 并建立各种状态之间的状态转移图. 通过与其他节点协作, 对上、下游相邻节点的工作进行预测, 建立自身的各种状态转移矩阵. 通过调度节点的发送和休眠的概率, 达到减少数据冲突的概率, 提高效率, 并达到提高吞吐率的目的. 经证明, 该方法可以保证节点和网络在每轮工作周期中的能耗将会收敛. 该方法将发送调度与休眠调度相结合, 主要适用于拓扑不变、负载较稳定的 WSN.

传输调度方法中数据包的产生一般具有规律性可循, 如采用等时间间隔产生数据包, 而且数据包长度固定. 传输调度方法通过减少冲突来降低数据包重传概率, 进而减少因重传数据包所消耗的能量. 当传输调度不与媒介访问结合时, 通常采用基于统计的方法对节点的传输时机进行控制.

3.4 功率调度 (Power scheduling)

功率调度方法通过为节点分配多级发射功率, 达到平衡网络内节点能量消耗、延长网络生存期的目的^[35].

Bhatia 等在保证网络连通度的前提下, 提出了一种分布式功率调度方法 (Localized construction of two power solution, LCTPS)^[36]. 节点具有两级发送功率设置. 节点使用局部最小生成树算法生成两个约简的网络强连通图. 图中节点含有剩余能量值, 边的权重表示节点间通信所需要的能量. 节点为这两个强连通子图分配不同的工作时长. 系统工作时, 节点同步切换发射功率, 使网络拓扑在这两个约简的强连通图之间轮换, 从而减少节点最大的平均能耗, 平衡了节点能量消耗. 该方法中节点需要知道邻居节点的位置信息, 因而对计算能力要求较高.

李方敏等在文献 [37] 中提出了一种基于 SMAC 协议的 WSN 功率控制 (Sensor-MAC cluster reactive power control, SMAC-CRPC) 协议. SMAC-CRPC 协议中的节点将利用功率控制选取邻居节点的策略应用到 SMAC 的邻居列表维护阶段, 根据最优邻居数量原则, 采用功率控制调度机制选择邻居节点, 维护调度信息, 优化网络拓扑. 每个节点与邻居节点形成“虚拟功率簇”, 使节点形成的网络拓扑结构能很好地适应环境. 另外, 为了避免不对称功率发射可能造成的隐蔽终端问题, 采用了双信道反作

用发射功率机制. 该机制将控制信息与数据信息在不同的信道上传送. 该协议在保证网络连通性的同时, 降低了通信的冲突率, 提高了网络的吞吐率. 由于采用双信道机制, 该方法对硬件设备的要求较高.

功率调度通过降低节点的发射功率, 减少数据包冲突的发生, 从而减少传输时延和因冲突引起的能量损耗. 该类方法还可以提高同时发送数据的节点数量, 提高网络带宽. 但是, 功率调度后, 可能会造成更多的隐藏终端. 因而还需要对数据冲突进行深入分析. 而且, 发射功率变化易引起网络拓扑变化. 因而, 如何保证网络的连通性是功率调度要考虑的问题^[35].

3.5 MAC 调度 (MAC scheduling)

为优化网络性能, MAC 调度将信道访问控制与调度相结合, 为上层协议提供数据链路的同时, 优化节点性能. 根据物理信道竞争方式的不同, MAC 调度可以分为基于无竞争 (Content-free based) 的 MAC 调度方法、基于竞争 (Content based) 的 MAC 调度方法和混合策略的 MAC 调度方法三类.

3.5.1 基于无竞争的 MAC 调度方法

无竞争信道的调度方法通过采用 TDMA、CDMA 或 FDMA 技术, 为节点分配不同的时槽、正交编码或者工作频率, 来减少信号冲突的产生.

Pantazis 等提出了一种具有休眠模式的 TDMA 调度方法 (Sleep mode TDMA, S-TDMA)^[38]. 通过调度节点的唤醒时间, 对能耗和时延进行了平衡. 该方法在初始化阶段, 给远端节点分配较早的时槽号; 根据节点的邻居信息, 对具有相同跳数的节点分配不同的时槽. 在数据传输阶段, 如节点需要发送数据时, 发送唤醒信息 (WakeUp, WU) 唤醒路径上所有节点, 然后发送数据包. 当节点接收并转发数据包后, 进入休眠. 路径上各节点只在唤醒阶段进行监听. 在下一个唤醒阶段, 如果节点没有数据包发送, 则不发送 WU 信息包. 节点在其余时间都进入休眠. 图 1 所示是一个三跳网络中, 唤醒节点和数据包传送过程的示意图. 该方法由于将休眠调度与 TDMA 相结合, 可以显著提高能效, 同时, 可以减少数据包端到端的平均时延. 但是, 当网络流量较大时, 由于节点的空闲侦听时间较长, 能量消耗增长较快.

DMAC^[39] 也采用唤醒机制来减少时延. 但与 S-TDMA 方法不同, DMAC 协议将节点的工作周期划分为接收时间、发送时间和休眠时间, 并采用交错的唤醒调度方法. 如图 2 所示, 在各条路径, 从叶节点到 Sink 节点依次唤醒. 并且, 下层节点的发

送时间与上层节点的接收节点相对应. 节点采用多数据包标志位表示自己在一个发送时间段有多个数据包需要发送, 使节点动态调整占比. 当与其他路径上的节点产生冲突, 无法发送数据包时, 节点用 MTS (More to send) 分组机制, 通知其上层节点. 这样, 节点休眠一段时间后再周期唤醒发送或接收数据包. DMAC 是一种基于数据采集树的 MAC 协议. DMAC 对所有的节点采用相同的 u 值, 这样, 当网络节点密度较高时, 冲突的概率较大.

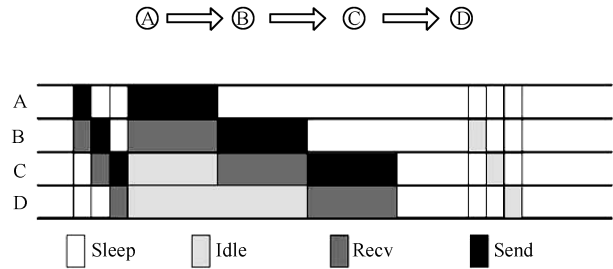


图 1 路径唤醒示意图
Fig. 1 The path wakeup

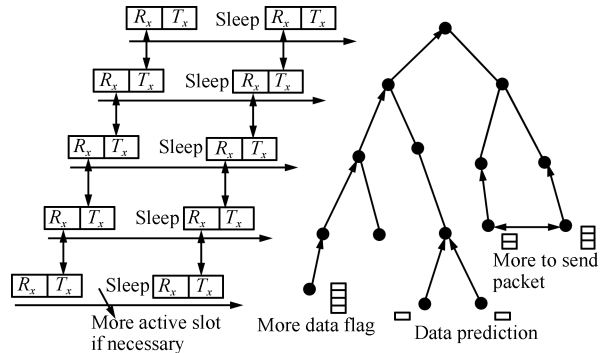


图 2 数据采集树上的 DMAC 协议
Fig. 2 DMAC in a data gathering tree

基于无竞争信道的 MAC 调度方法中还有许多是基于图论进行的^[10, 40], 通过明确的或隐含的着色机制来降低数据包的冲突, 减少数据帧长度, 达到提高数据吞吐率和减少能耗的目的. Gandham 等提出了一种基于 TDMA 协议的链路调度方法 (Distributed edge-coloring revisited Link Scheduling, DECRLS)^[40]. 该方法由两个阶段完成. 第一阶段时, 节点采用分布 Misa-Gries 算法, 为边着色, 使它任两条边的颜色都不相同. 该边着色算法需要的颜色数目不多于网络节点的最大度数加 1. 第二阶段时, 采用边着色方法进行链路调度. 将边的一种颜色对应于唯一的一个时槽. 为避免隐藏终端问题, 为每条边赋一个传输方向. 通过链路传输方向反转保证网络任何相邻节点都可以双向通信. DECRLS 方法的时间复杂度为 $O(n\Delta^2 + n^2m)$, 其中, n 是网络节

点数量, m 是网络的边数, Δ 是网络的最大度数. 该方法可以在网络中产生较多的并发传输和较短的帧长度. 但是, 当网络拓扑发生变化时, 如节点失效或新的节点加入时, 该方法需要进一步研究.

Chen 等针对传统的着色机制需要较多的颜色数目 (较长的帧长度), 提出了一种将冲突避免与工作周期相结合的分布式颜色调度方法 (Color scheduling scheme, CSS)^[10]. 该方法主要包括两个方面: 着色方法和颜色调度方法. 基于传统的 $L(d, k)$ -着色 ($L(d, k)$ -coloring) 方法, 该文献提出了新的 $L_S(d, k)$ -着色 ($L_S(d, k)$ -coloring) 方法. 这一方法可以保证在某子集中的节点虽然可能与该子集合外的其他节点具有相同的颜色, 但子集合内节点间颜色不会冲突. 该方法通过减少节点着色数量, 达到数据包并发的目的. 文献 [10] 给出了 $L_S(d, k)$ -着色方法所需颜色数目的最小值和 $L_S(d, 1)$ -着色方法颜色数目的最大值. 不仅如此, 该文献还证明了当采用有向的宽度优先树收集数据时, $L_S(1, 1)$ 方法颜色数目的最大值为 $\Delta_G + 1$, 其中, Δ_G 是图 G 的最大度数. 该上限值与 DECRLS 方法颜色数目的上限值相同, 都不超过 Vizing 定理简单图边着色所需最少颜色数目的上限^[41]. 在颜色调度机制中, 在每一个时槽时, 当节点的颜色及其一个邻居节点的颜色分别与发送和接收所对应的颜色相一致时, 节点唤醒进行发送或接收, 而其他节点保持休眠. 该方法需要节点知道其邻居节点的颜色值, 而且, 节点的色彩数目必须是奇数个.

基于无竞争的调度方法一般都假定信道是无冲突或者冲突较小, 且数据端到端的延迟较小. 但是, 当新节点加入时, 重新生成调度需要较多的信息交换和较长的重新调度确定时间, 整个过程比较复杂. 另外, 当节点布置密度高或者时槽划分较细时, 调度方法将很难实现. 而基于着色的调度方法, 每种颜色对应于一个时槽, 因而该类方法具有时延有界特性. 但是, 采用图结构抽象出 WSN 拓扑结构, 数据发送后就会被接收到的假设条件比较简单, 难以考虑实际物理层的各种干扰因素.

3.5.2 基于竞争的 MAC 调度方法

基于竞争的 MAC 协议广泛采用了各种调度机制来减少数据包的冲突, 通过减少占空比来减少能量消耗, 提高网络生存期. 根据节点的工作周期是否同步可进一步分为节点工作周期同步的调度和节点工作周期异步的调度两种方法.

1) 节点工作周期同步的调度

S-MAC (Sensor-MAC) 协议^[42] 通过对 802.11 协议进行改进, 从以下几个方面对节点进行调度: 1) 邻居节点通过协商机制形成虚拟簇, 使邻居节点能

够工作和休眠同时进行; 2) 调度节点周期性睡眠, 以节省能量; 3) 在它的邻居节点向其他节点发送数据时关闭无线模块, 以减少过度侦听. S-MAC 需要节点严格按照调度周期工作, 网络延迟较大. S-MAC 的改进版本^[43] 提出了一种自适应侦听机制, 使节点当侦听到其邻居节点间正在进行数据包发送后, 在该数据包发送完毕后再唤醒一小段时间. 从而, 节点可以快速接收数据包, 而不需要等到下一次调度以后. 该改进的版本减少了至少一半以上的延迟, 并减少了能耗, 提高了吞吐率. S-MAC 适合于需要长时间工作, 而且数据流量较少的 WSN 应用中. 但是, S-MAC 及其改进版本的占空比固定, 延迟比较大, 当网络负载较小时, 空闲侦听会消耗过多的能量.

T-MAC (Timeout-MAC)^[44] 协议采用与 S-MAC 协议相同的虚拟簇同步消息调度自己与相邻节点保持同时唤醒, 并进行数据交换. 根据节点与 Sink 节点距离不同, 数据率 (Message rate) 也不相同的特点, T-MAC 适应性减少占空比, 进一步减少了空闲侦听的时间. 如图 3 所示, 当节点在 TA 时间内未检测到激活事件时, 便进入休眠. 为了解决早睡问题, 采用了未来请求发送 (Future request-to-send, FRTS) 和满缓冲区优先 (Full buffer priority) 方法. T-MAC 比 S-MAC 进一步节省了能量. 但是, FRTS 和满缓冲区优先这两种方法会引起冲突的上升和通信协议开销的增加, 而且依然存在早睡问题.

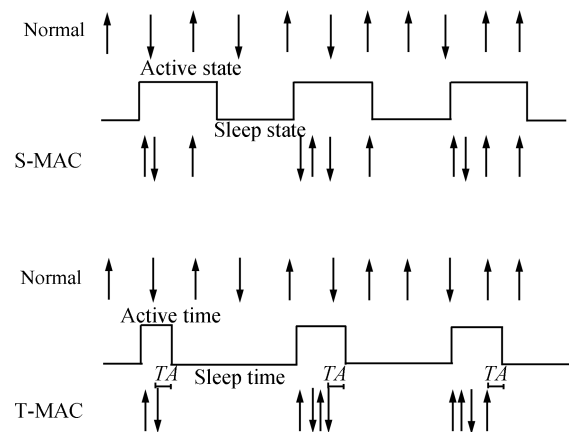


图 3 S-MAC 与 T-MAC 的基本机制

Fig. 3 Basic scheme of S-MAC and T-MAC

针对节点在循环工作时空闲侦听状态消耗能量过多的特点, DW-MAC (Demand wakeup MAC)^[45] 将媒介访问与调度方法相结合, 使节点在休眠时根据需要唤醒, 并确保向下一跳节点进行数据传输时不会产生冲突. 图 4 是 DW-MAC 基本的调度机制. 节点通过 SCH (Scheduling frame) 帧和 SCH 确认帧进行调度请求和确认. 节点在休眠时

间段对唤醒时刻和活动时间长度进行调度, 使它们与节点在数据时间段 SCH 帧的发送/接收时刻和帧长相对应. 活动时间结束后, 节点再次进入休眠. 为了提高多跳网络的传输性能, 中间节点在收到 SCH 帧后, 发送一个新的 SCH 帧. 该 SCH 帧一方面对原有的 SCH 帧进行确认, 另一方面, 也与下一跳节点建立映射关系. DW-MAC 比 S-MAC 显著提高了能效和减少了时延. 节点是在数据时间段发送 SCH, 建立发送节点与接收节点的调度关系. 由于数据时间段长度固定, 因而, 当节点密度较高或网络流量较大时, 会因竞争过于激烈, 导致数据包延迟上升.

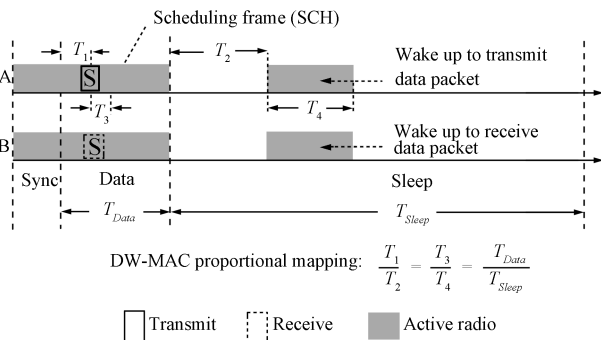


图 4 DW-MAC 调度概图

Fig. 4 Overview of scheduling in DW-MAC

SSA (Self-learning scheduling approach)^[46] 方法是一种节点通过自身与 WSN 交互学习进行调度的方法. 节点可以适应性调整发送参数和休眠参数, 并将传输调度与休眠相结合, 达到节省能量和减少时延的目的. 它扩展了基本的 Q 学习方法, 将发送参数的值空间划分为一些子区间. 子区间的端点都对应于一个离散的动作值和一个 Q 值. 发送参数的连续值是子区间离散动作相应 Q 值的加权平均. 休眠参数可以从发送参数的值中推导出来. 这样发送参数和休眠参数都是连续空间的值. 节点具有相同的唤醒时刻, 并且具有相同的调度更新时间. 在调度更新时间段, 进行发送参数和休眠参数的学习. 在数据传输时间段, 发送参数和休眠参数可以用来控制节点发送数据包和进入休眠的概率. 该方法具有较好的网络 QoS 特性. 在高负载情况下, SSA 比 S-MAC 和 DW-MAC 具有更高的能量效率和较少的时延. 该方法适用于静态网络并且节点的负载变化不大的应用. 该方法唤醒时间间隔固定, 当流量较小时, 会有一定的能量浪费, 可以进行更深入的研究.

2) 节点工作周期异步的调度

节点工作周期异步的调度方法不需要节点共享调度信息^[47].

B-MAC (Berkeley media access control for low power wireless sensor networks)^[48] 是一个将

休眠调度与媒介访问控制相结合的低功率 MAC 协议. 节点间工作周期不同步. 节点在活动与休眠之间循环工作, 定期从休眠中唤醒进入活动状态. 节点唤醒后, 周期性地低功率侦听 (Low power listening, LPL) 信道, 判断是否有数据包需要接收. 当节点要发送数据包时, 会首先发送一个前导序列. 为使接收节点可以可靠地接收到数据, 前导序列的长度大于周期性 LPL 的时间间隔. 当节点侦听信道没有数据要接收时, 节点进入休眠状态以节省能量. B-MAC 无须共享调度信息, 适合延时要求较低的应用. 但是, 其较长的前导序列会消耗过多的能量.

针对低功率监听 LPL 协议中过长的前导序列引起的数据包延迟较大, 以及节点过度侦听造成能量消耗较大的现象, 文献 [49] 提出了 X-MAC 协议. 节点各自独立对活动/休眠进行调度. 如图 5 所示, X-MAC 采用短的包含目标节点地址信息的前导. 这样, 非目标节点接收这个短的前导后可以快速地进入休眠, 从而减少了过度侦听现象. 其次, 发送节点采用频闪方式发送前导, 并在每次前导之间暂停一会儿. 当目标节点唤醒并收到这个前导后, 立即发送早期确认帧. 发送节点收到早期确认后中断前导的发送, 延迟一个随机的时间, 然后, 直接向目标节点发送数据. 频闪前导和随机延迟、省略前导的方式减少了在发送节点和接收节点间, 由于过度侦听造成的能量消耗和延迟过大的现象, 提高了吞吐率. X-MAC 可以适应更多的发送芯片和节点, 并且扩展性也很好. 但是, X-MAC 针对不同负载适应性调整占空比的方法还需要进一步研究. 其固定时长的侦听时间可以进一步优化.

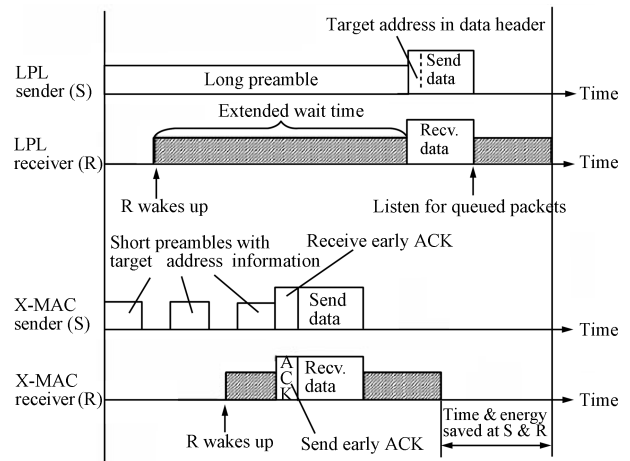


图 5 LPL 和 X-MAC 对比图

Fig. 5 Comparison of LPL and X-MAC

B-MAC、X-MAC 适用于负载较轻的 WSN 应用. 当负载加重时, 能效和平均时延等都有所变差. RI-MAC (Receiver-initiated MAC)^[47] 协议是一个

由接收节点启动发送过程的协议. 每个节点各自调度自己的工作周期, 周期性地唤醒. RI-MAC 的基本过程如图 6 所示. 节点唤醒后如果侦听到信道是空闲的, 则立即广播一个信标帧, 表明自己已处于活动状态并可以接受数据帧. 与 B-MAC 不同, 需要发送数据的节点唤醒后不发送前导序列, 而是在活动状态安静地等待接收信标帧. 当收到信标帧后, 需要发送数据包的节点立即发送数据帧. 当接收节点侦听到发生冲突后, 会在信标帧中增大后退窗口的值. 发送节点在该后退窗口内随机选择发送时间. 对于接收节点先于发送节点唤醒的情景, 发送节点发送初始信标帧, 请求接收节点发送信标帧, 而完成数据帧的发送. 当节点成功接收数据帧, 并在一段时间内没有接收数据帧时, 或成功发送了数据帧后, 节点可以进入休眠. 与 X-MAC 相比, RI-MAC 减少了节点数据交换占用信道的时间, 减少了前导序列的能量消耗, 提高了数据吞吐率. 但是, RI-MAC 的信标帧因冲突可能无法被发送者正确接收; 发送者在发送数据包之前, 需要等待一段时间; 而且, 当发送者发送广播数据包时, 为了使邻居节点都能正确收到数据包, 发送者通常会等待一个工作周期. 这些, 都会引起能耗和延迟的增加.

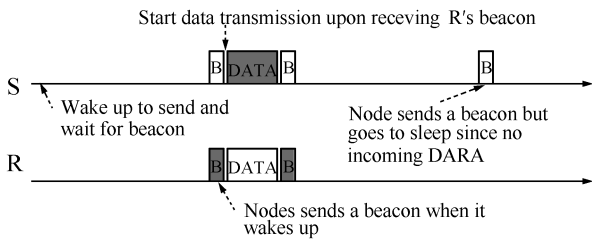


图 6 RI-MAC 过程

Fig. 6 Overview of RI-MAC

基于竞争的 MAC 调度方法考虑物理信道的各种影响, 算法扩展性好, 实用性强. 但是, 其网络时延不确定, 对实时性应用有影响. 基于工作周期同步的 MAC 调度方法可以减少大量的空闲侦听时间, 节省能量. 但是, 节点间需要保持调度信息同步. 因而, 对于通过协作形成调度的方法, 会产生较多的调度控制信息. 基于工作周期异步的 MAC 调度方法无需共享调度信息, 一般具有较长的空闲侦听时间, 并且时延较长, 较适合于负载较轻的网络.

3.5.3 混合策略的 MAC 调度方法

Z-MAC (Zebra MAC)^[50] 是一种 TDMA/CSMA 混合的 MAC 协议, 在低冲突情况下, 可以获得与 CSMA 方式类似的高信道利用率和低延迟; 在高冲突情况下, 类似 TDMA 方式可以提高信道利用率, 并减少两跳邻居节点的冲突. 在初始化阶段, 节点获得两跳节点的信息, 采用 DRAND 分布

着色方法调度节点占用的时槽. 与传统的 TDMA 方式不同, 节点可以在任何时槽内发送数据. 时槽拥有者的初始冲突窗口较小, 因而具有较高的优先级. 当该时槽拥有者在该时槽内不发送数据包时, 其他节点可以“盗用”该时槽. 这种优先级策略调度可以减少冲突. 节点具有两种工作方式: 低竞争级方式和高竞争级方法. 在低竞争级方式工作时, 任何节点可以竞争时槽进行数据传输; 在高竞争级方式工作时, 只有时槽的拥有者和它的直接邻居节点可以竞争该时槽. 最坏情况下, Z-MAC 可以获得与 CSMA 相同的性能. Z-MAC 对拓扑改变具有一定的扩展性. 但是, Z-MAC 需要在初始化阶段进行全局时钟同步, 而且, 由于初始化操作只运行一次, 因而, 当网络拓扑变化较大时, 无法重新分配时槽.

Yi 等提出的动态随机调度 (Dynamic randomized scheduling, DRS) 方法^[51] 采用与 Z-MAC 类似的多优先级调度方法. Z-MAC 无法确保吞吐率. 而 DRS 方法采用两级优先级方法, 证明可以确保网络吞吐率 (Lattice-throughput) 收敛到最优. 该方法假设节点知道自身每一条扇出链路的局部负载情况. 节点通过每帧操作 (Per-frame operation) 和每时槽操作 (Per-slot operation) 完成调度, 如图 7 所示. 数据帧由若干时槽组成, 每个时槽由竞争时间、数据发送时间和确认时间组成. 其中, RTS-H/CTS-H 和 RTS-L/CTS-L 分别表示高优先级和低优先级的请求帧/清除帧. 在每帧操作时, 节点根据上次数据包发送的结果, 对本次发送赋予一定的优先级. 如上次发送成功, 则为本次发送分配较低的优先级; 如上次发送不成功, 则分配较高的优先级. 在每时槽操作中, 上次发送成功的节点按较低优先级选择相同的时槽; 而上次发送失败的节点按较高的优先级在未发送成功时槽以外的所有时槽内随机选择. 节点通过三阶段的类 RTS/CTS 竞争过程来竞争信道和学习邻居节点的竞争模式. 通过不断地运行, 吞吐率可以达到最优. 但是, 该方法采用的类 RTS/CTS 机制需要包含优先级、阶段等控制信息, 因而, 较传统 RTS/CTS 机制的控制负载要大. 该方法适用于网络拓扑和负载保持不变的应用.

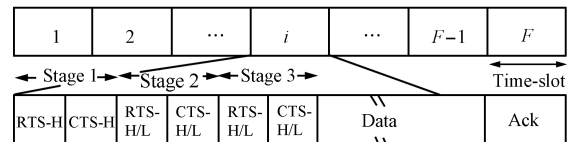


图 7 帧和时槽示意图

Fig. 7 Frame and slot structure of DRS

混合策略的 MAC 调度方法吸取竞争模型和无竞争模型调度方法的优点, 虽然也是一种 TDMA 方法, 但是考虑了物理层冲突, 可以根据节点的工作负

荷动态调整发送占用的时槽. 但是, 当节点冲突严重时, 混合调度方法的性能会下降.

4 讨论

由于面向的应用不同, WSN 调度方法表现出多种多样的特点. 为从总体上对这些调度方法进行把握, 我们将各种指标采用列表表示. 其中, 表 1 对本文所述 25 种调度方法的主要设计指标进行了分类

表 1 WSN 分布式调度方法设计目标

Table 1 The design principles of the representative scheduling approaches for WSN

类别	调度方法	能量	覆盖	连通	延迟	吞吐率
节点调度	CPNS	▲	●		●	
	CCP	▲	●	●		
	LCFS	▲	●			
	RIS	▲	●			
	ARS	▲	●			
包调度	EasiCC				●	▲
	PQMPS				●	▲
传输调度	SSPA	▲			●	
	ASOS	▲			●	
	MBSA	▲				●
功率调度	LCTPS	▲		●		
	SMAC-CRPC	▲		●	●	●
	S-TDMA	▲		●	●	
	D-MAC	●			▲	●
MAC 调度	DECRLS	●			●	▲
	CSS	▲		●	●	●
	S-MAC	▲				
	T-MAC	▲			●	●
	DW-MAC	▲			●	
	SSA	▲			●	●
	B-MAC	▲			●	●
	X-MAC	▲			●	●
	RI-MAC	▲			●	●
	Z-MAC	●			●	▲
DRS	●				▲	

(其中, ▲ 表示调度方法优化的主要目标, ● 表示次要目标.)

对比. 从中可以看出, 不同类别的调度方法关注的优化目标不尽相同, 但大部分调度方法都以能量效率作为重要的优化性能目标. 表 2 列出了本文所述调度方法的性能特征对比. 对于不同类的调度方法, 难以进行调度性能的比较. 即使同一类的调度方法, 由于其优化目标不尽相同, 底层协议支持不尽相同, 使得对其开展具体的性能对比也比较困难. 在实际应用时, 应根据具体应用的特点, 结合调度方法的目标、应用场合和性能等指标进行选择 and 折中.

5 结论

本文基于调度对象对 WSN 分布式调度方法进行了分类, 分析了具有代表性的一些 WSN 分布式调度方法, 对这些方法的优化目标和性能特点进行了讨论, 对调度方法的进一步研究与应用具有一定的指导意义. 由于 WSN 应用的差异性, 使得各种 WSN 调度方法的性能优化目标、采取的具体方法也不同, 因而实现难度与效果也千差万别. 通过分析认为, 好的分布式调度方法应当针对 WSN 的特点, 在优化网络一个性能指标的同时, 也要兼顾其他性能指标的影响, 防止引起这些指标的恶化, 否则, 不利于算法的推广. 另外, 调度方法的适应性要强, 应根据节点的数据流量、能量、延迟等情况进行调整.

WSN 分布式调度方法研究虽然取得了长足的进步, 但是还可以在以下方面进行改进: 1) 调度算法改变了节点自身的行为, 同时也改变了全网的运行. 如何保证调度方法的收敛很重要, 需要进一步加强研究. 2) WSN 分布式调度方法虽具有较好的扩展性, 但是节点根据局部信息完成调度工作. 由于受各种约束的影响, 使得节点的调度结果通常不是最优的. 而最优的调度方法如 DRS^[51] 和 SSPA^[32] 方法也存在假设过多、收敛速度较慢的特点. 因而, 需要开展 WSN 分布式最优化调度方法研究. 3) 网络中节点的负载是不相同的. T-MAC 虽然对此有一定的考虑, 但是还需要进一步研究如何提高 WSN 分布调度方法对不同负载节点的适应性. 4) 混合策略的 MAC 调度方法结合了两种 MAC 调度方法的特点, 性能有很大的提高. 但是, 将其他多种调度方法相结合的研究较少. 因而, 结合多种调度方法的分布式调度机制值得期待和研究. 5) WSN 的性能和 QoS 保障需要网络多个协议层次的支持^[52]. 在一个协议层开展调度方法研究难以最优化解决问题. 只有通过多层协议共同协作, 才能最大限度地提升网络性能. 目前, 虽有一些跨层调度方法^[53-54], 但是以集中式调度方法为主^[55-57], 只有很少的方法采用了分布调度机制^[58]. 应当结合多个协议层次或者采用跨层方法开展调度方法的研究.

表 2 WSN 分布式调度方法性能比较

Table 2 Comparison of the performances of the representative scheduling approaches for WSN

类别	调度方法	信道访问类型	同步	节能方法	计算开销	控制开销	存储开销
节点调度	CPNS		GS	Off-duty	High	High	Medium
	CCP	CSMA	GS	Sleep	High	High	Medium
	LCFS		GS	Off-duty	Low	Low	Medium
	RIS		GS	Sleep	Low		Low
	ARS			Sleep	Low		Low
包调度	EasiCC	CSMA	GS		Medium	Low	Low
	PQMPS	CSMA	GS		Medium		Low
传输调度	SSPA	CDMA/FDMA	GS	Collision avoidance, energy balance	Medium	Low	Low
	ASOS	CSMA	GS	Sleep, collision avoidance	Medium		Medium
	MBSA	CSMA	GS	Sleep, collision avoidance	Low	Low	Low
功率调度	LCTPS	CSMA	GS	Collision avoidance, power control	High	Medium	High
	SMAC-CRPC	CSMA	LS	Sleep, power control, collision avoidance	Low	Medium	Low
MAC 调 度	S-TDMA	TDMA	GS	Sleep, collision avoidance		Medium	Low
	D-MAC	TDMA	LS	Sleep, collision avoidance	Low	High	Low
	DECRLS	TDMA	GS	Collision avoidance	High	High	Medium
	CSS	TDMA/CDMA	GS	Sleep, collision avoidance	Medium	Medium	High
	S-MAC	CSMA	LS	Sleep		High	Low
	T-MAC	CSMA	LS	Reduction in idle listening		High	Low
	DW-MAC	CSMA	GS	Sleep, collision avoidance	Low	Low	Low
	SSA	CSMA	GS	Sleep, collision avoidance	Low		Low
	B-MAC	CSMA		Sleep			Low
	X-MAC	CSMA		Sleep	Low	Medium	
	RI-MAC	CSMA		Sleep, collision avoidance			Low
	Z-MAC	CSMA/TDMA	GS/LS	Sleep, collision avoidance	Low	Medium	Low
DRS	CSMA+TDMA	GS	Collision avoidance	Low	Medium	Low	

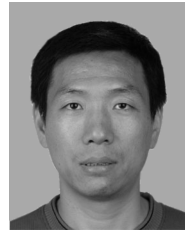
(其中, GS 表示全网范围内的时钟同步, LS 表示相邻节点间的局部时钟同步.)

References

- Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, **38**(4): 393–422
- Ren Feng-Yuan, Huang Hai-Ning, Lin Chuang. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003, **14**(7): 1282–1291 (任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. 软件学报, 2003, **14**(7): 1282–1291)
- Sun Li-Min, Li Jian-Zhong, Chen Yu, Zhu Hong-Song. *Wireless Sensor Network*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005)
- Mahfoudh S, Minet P. Survey of energy efficient strategies in wireless ad hoc and sensor networks. In: Proceedings of the 7th International Conference on Networking. Cancun, Mexico: IEEE, 2008. 1–7
- Agnihotri S, Nugehalli P, Jamadagni H S. Correlation, coding, and cooperation in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007. 83–98
- Kang Bo, Ke Xin, Sun Li-Min, Ren Yong. Research on scheduling algorithms for wireless sensor network. *Computer Science*, 2008, **35**(2): 47–51 (康波, 柯欣, 孙利民, 任雍. 无线传感器网络中的调度算法研究. 计算机科学, 2008, **35**(2): 47–51)
- Keshavarzian A, Lee H, Venkatraman L. Wakeup scheduling in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York, USA: ACM, 2006. 322–333
- Sharma G, Mazumdar R R, Shroff N B. On the complexity of scheduling in wireless networks. In: Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 2006. 227–238
- Choi H, Wang J, Hughes E A. Scheduling for information gathering on sensor network. *Wireless Networks*, 2009, **15**(1): 127–140
- Chen Y, Fleury E. A distributed policy scheduling for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, USA: IEEE, 2007. 1559–1567
- Wang B. *Coverage Control in Sensor Networks*. London: Springer, 2010

- 12 Wen Hao, Lin Chuang, Ren Feng-Yuan, Zhou Jia, Zeng Rong-Fei. QoS architecture in wireless sensor network. *Chinese Journal of Computers*, 2009, **32**(3): 432–440
(文浩, 林闯, 任丰原, 周嘉, 曾荣飞. 无线传感器网络的 QoS 体系结构. 计算机学报, 2009, **32**(3): 432–440)
- 13 Xia F. QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks. *Sensors*, 2008, **8**(2): 1099–1110
- 14 Sun Yan, Ma Hua-Dong. The QoS guarantee problem for wireless multimedia sensor networks. *Acta Electronica Sinica*, 2008, **36**(7): 1412–1420
(孙岩, 马华东. 无线多媒体传感器网络 QoS 保障问题. 电子学报, 2008, **36**(7): 1412–1420)
- 15 Liu Li-Ping, Wang Zhi, Sun You-Xian. Survey on coverage in wireless sensor networks deployment. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, **28**(9): 1752–1757
(刘丽萍, 王智, 孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究. 电子与信息学报, 2006, **28**(9): 1752–1757)
- 16 Zheng Guo-Qiang, Li Jian-Dong, Zhou Zhi-Li. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 305–316
(郑国强, 李建东, 周志立. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展. 自动化学报, 2008, **34**(3): 305–316)
- 17 Jian Qiang, Gong Zheng-Hu, Zhu Pei-Dong, Gui Chun-Mei. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2008, **19**(2): 389–403
(蹇强, 龚正虎, 朱培栋, 桂春梅. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展. 软件学报, 2008, **19**(2): 389–403)
- 18 Jain S, Srivastava S. A survey and classification of distributed scheduling algorithms for sensor networks. In: Proceedings of the International Conference on Sensor Technologies and Applications. Valencia, Spain: IEEE, 2007. 88–93
- 19 Wang L, Xiao Y. A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 2006, **11**(5): 723–740
- 20 Tian D, Georganas N D. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2003, **3**(2): 271–290
- 21 Xing G L, Wang X R, Zhang Y F, Lu C Y, Pless R, Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2005, **1**(1): 36–72
- 22 Tian D, Georganas N D. Location and calculation-free node-scheduling schemes in large wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2004, **2**(1): 65–85
- 23 Kumar S, Lai T H, Balogh J. On k -coverage in a mostly sleeping sensor network. In: Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 2004. 144–158
- 24 Hua C Q, Yum T S P. Asynchronous random sleeping for sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2007, **3**(3): 1–25
- 25 Zhang Xue, Lu Sang-Lu, Chen Gui-Hai, Chen Dao-Xu, Xie Li. Topology control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007, **18**(4): 943–954
(张学, 陆桑璐, 陈贵海, 陈道蓄, 谢立. 无线传感器网络的拓扑控制. 软件学报, 2007, **18**(4): 943–954)
- 26 Hasegawa G, Matsuo T, Murata M, Miyahara H. Comparisons of packet scheduling algorithms for fair service among connections on the internet. *Journal of High Speed Networks*, 2003, **12**(1–2): 1–27
- 27 Ju Hai-Ling, Cui Li, Huang Chang-Cheng. EasiCC: a congestion control mechanism for WSN. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, **45**(1): 16–25
(鞠海玲, 崔莉, 黄长城. EasiCC: 一种保证带宽公平性的传感器网络拥塞控制机制. 计算机研究与发展, 2008, **45**(1): 16–25)
- 28 Yin X L, Chen H, Shen Y, Qi W D. A priority-based packet scheduling method in wireless sensor networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Information Acquisition. Shandong, China: IEEE, 2006. 627–631
- 29 Sun Li-Min, Li Bo, Zhou Xin-Yun. A survey of congestion control technology for wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, **45**(1): 63–72
(孙利民, 李波, 周新运. 无线传感器网络的拥塞控制技术. 计算机研究与发展, 2008, **45**(1): 63–72)
- 30 Reggiani L, Spagnolini U. Minimum interference distributed scheduling for packet transmission. In: Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Bologna, Italy: IEEE, 2008. 411–415
- 31 Yao Y, Giannakis G B. Energy-efficient scheduling for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, **53**(8): 1333–1342
- 32 Chen Y X, Zhao Q, Krishnamurthy V, Djonin D. Transmission scheduling for optimizing sensor network lifetime: a stochastic shortest path approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, **55**(5): 2294–2309
- 33 Visweswara S C, Dutta R, Sicitu M L. Adaptive ad hoc self-organizing scheduling for quasi-periodic sensor network lifetime. *Computer Communications*, 2006, **29**(17): 3366–3384
- 34 Niu Jian-Jun, Deng Zhi-Dong. Markov chain-based distributed scheduling approach for wireless sensor network. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(5): 685–695
(牛建军, 邓志东. 基于马尔可夫链的无线传感器网络分布式调度方法. 自动化学报, 2010, **36**(5): 685–695)
- 35 Li Fang-Min, Xu Wen-Jun, Liu Xin-Hua. Power control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2008, **19**(3): 716–732
(李方敏, 徐文君, 刘新华. 无线传感器网络功率控制技术. 软件学报, 2008, **19**(3): 716–732)
- 36 Bhatia R, Kashyap A, Li L. The power balancing problem in energy constrained multi-hop wireless networks. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, USA: IEEE, 2007. 553–561
- 37 Li Fang-Min, Xu Wen-Jun, Gao Chao. A power control MAC protocol for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007, **18**(5): 1080–1091
(李方敏, 徐文君, 高超. 一种适用于无线传感器网络的功率控制 MAC 协议. 软件学报, 2007, **18**(5): 1080–1091)
- 38 Pantazis N A, Vergados D J, Vergados D D, Douligeris C. Energy efficiency in wireless sensor networks using sleep mode TDMA scheduling. *Ad Hoc Networks*, 2009, **7**(2): 322–343
- 39 Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C S. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium. Santa Fe, USA: IEEE, 2004. 3091–3098
- 40 Gandham S, Dawande M, Prakash R. Link scheduling in wireless sensor networks: distributed edge-coloring revisited. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2008, **68**(8): 1122–1134
- 41 Berge C. *Graphs and Hypergraphs*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1973

- 42 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. Washington D.C., USA: IEEE, 2002. 1567–1576
- 43 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
- 44 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. New York, USA: ACM, 2003. 171–180
- 45 Sun Y J, Du S, Gurewitz O, Johnson D B. DW-MAC: a low latency, energy efficient demand-wakeup MAC protocol for wireless sensor network. In: Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York, USA: ACM, 2008. 53–62
- 46 Niu J J. Self-learning scheduling approach for wireless sensor network. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Future Computer and Communication. Wuhan, China: IEEE, 2010. V3253–V3257
- 47 Sun Y J, Gurewitz O, Johnson D B. RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2008. 1–14
- 48 Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2004. 95–107
- 49 Buettner M, Yee G V, Anderson E, Han R. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In: Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2006. 307–320
- 50 Rhee I, Warrier A, Aia M, Min J, Sichitiu M L. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, **16**(3): 511–524
- 51 Yi Y, Veciana G D, Shakkottai S. On optimal MAC scheduling with physical interference. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, USA: IEEE, 2007. 294–302
- 52 Li Jian-Zhong, Gao Hong. Survey on sensor network research. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, **45**(1): 1–15
(李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展. *计算机研究与发展*, 2008, **45**(1): 1–15)
- 53 Chatterjea S, Nierger T, Meratnia N, Havinga P. A distributed and self-organizing scheduling algorithm for energy-efficient data aggregation in wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2008, **4**(4): 1–41
- 54 Lin C, He Y X, Peng C, Yang L T. A distributed efficient architecture for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Washington D.C., USA: IEEE, 2007. 429–434
- 55 Badia L, Botta A, Lenzini L. A genetic approach to joint routing and link scheduling for wireless mesh networks. *Ad Hoc Networks*, 2009, **7**(4): 654–664
- 56 Fu L Q, Liew C, Huang J W. Joint power control and link scheduling in wireless networks for throughput optimization. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Beijing, China: IEEE, 2008. 3066–3072
- 57 Hengstler S. Joint routing, scheduling, and power control in energy-constrained wireless sensor networks. In: Proceedings of the IASTED International Conference on Wireless Networks and Emerging Technologies. Banff, Canada: Acta Press Anaheim, 2005. 190–195
- 58 Sharma G, Shroff N B, Mazumdar R R. Joint congestion control and distributed scheduling for throughput guarantees in wireless networks. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, USA: IEEE, 2007. 2072–2080



牛建军 清华大学计算机系博士研究生。主要研究方向为无线传感器网络和智能计算。

E-mail: njj05@mails.tsinghua.edu.cn
(**NIU Jian-Jun** Ph.D. candidate in the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University. His research interest covers wireless sensor networks and computational intelligence.)



邓志东 博士, 清华大学计算机系教授。主要研究方向为无线传感器网络、智能机器人、计算生物学、智能计算、复杂网络理论和虚拟现实技术。本文通信作者。

E-mail: michael@tsinghua.edu.cn
(**DENG Zhi-Dong** Ph.D., professor in the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University. His research interest covers wireless sensor network, intelligent robot, computational biology, computational intelligence, complex network theory, and virtual reality technology. Corresponding author of this paper.)



李超 清华大学计算机系硕士研究生。主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail: lichao.1231@163.com
(**LI Chao** Master student in the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University. Her research interest covers wireless sensor networks.)