基于马尔可夫链的无线传感器网络分布式调度方法

牛建军 [1] 邓志东 [1]

摘 要 能量效率是无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 研究中的核心问题之一. 当节点采用电池供电时, 有限的能量限制了网络的生存周期, 从而对无线传感器网络的大规模应用提出了挑战. 本文基于马尔可夫链, 提出了一种实用的、协作分布式的调度方法, 并从理论上证明了该方法的收敛性. 该方法不仅可对节点的休眠/唤醒进行调度, 还可以对节点数据发送进行调度以减少数据冲突的发生. 仿真实验结果表明, 该方法能够有效地减少节点能量的消耗, 且对其他网络性能的影响较小.

关键词 无线传感器网络, 能效, 调度, 马尔可夫链, 分布式

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00685

Markov Chain-based Distributed Scheduling Approach for Wireless Sensor Network

NIU Jian-Jun[1] DENG Zhi-Dong[1]

Abstract Energy efficiency is one of the core issues of wireless sensor network (WSN). For battery powered WSN, the energy constraint restricts the lifetime of WSN, which poses great challenges to its large scale application. In this paper, we propose a collaborative distributed scheduling approach based on Markov chain, which is applicable to real WSN. We prove that this approach is convergent. This approach can not only schedule wake-up and sleep states of nodes, but also schedule the data transmission of nodes to reduce the collision of data packets. The simulation results show that the proposed approach can save energy effectively and has less effect on other performances of the network.

Key words Wireless sensor network (WSN), energy efficiency, scheduling, Markov chain, distributed

无线传感器网络 (Wireless sensor network, WSN) 是由大量的集成了无线传输能力、感知能力、计算能力的节点, 通过相互协作形成的自组织网络. 这些节点将感知的数据经过多跳通信传输到 Sink 节点, 达到对某一区域进行监控的目的[1]. 无线传感器网络自从 20 世纪末期出现以来, 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[2−5]. 无线传感器网络节点一般采用电池供电的形式. 由于电池能量有限, 而节点的每一项操作都需要消耗能量, 因而, 如何有效地节省能量, 延长节点工作时间和网络生存期, 是开展无线传感器网络研究的一个重要内容, 是推广应用的一个非常关键的因素[6−7].

为了节省能量, WSN 节点往往采用低功耗设计技术, 如采用低功耗的芯片和采用动态电压调度机制节省能量[8]; 有的研究集中在通信信号的调制/解调和编解码, 通过提高通信效率, 达到节省能耗的目的[9]. 另一些研究, 如文献 [10], 通过选择剩余能量多的节点作为路由节点, 达到平衡网络能量, 延长网络生存期的目的. 文献 [11] 基于色彩理论提出了一种具备能量感知的高能效路由算法, 延长了节点的生存周期, 并解决了拓扑空洞问题. 还有一些研究在应用层上对数据进行一定的融合处理, 达到减少网络流量、节省能耗的目的. 如文献 [12] 通过选择特定的节点来融合数据, 减少数据包发送的数量来提高网络的生存期. 文献 [13] 通过调整数据融合窗口来增加簇头节点的休眠时间, 达到节能的目的.

此外, 还有许多研究通过各种调度机制, 达到节省节点能量和延长网络生存周期的目的. 文献 [14] 中对 15 个分布式调度机制进行了总结. 其中, 随机无关调度 (Random independent scheduling, RIS) 方法只根据自身的工作状态进行调度, 但是鲁棒性较差. 还有一些方法, 例如, 最大化传感器网络生存时间 (Maximization of sensor network life, MSNL) 方法和基于直线距离的调度 (Linear distance-based scheduling, LDS) 方法, 需要节点的位置信息或根据与 Sink 节点的远近来进行调度. 另有一些方法, 如轻量级部署感知调度 (Lightweight deployment-aware scheduling, LDAS) 方法, 根据节点周围活动

收稿日期 2009-03-13 录用日期 2009-10-23
Manuscript received March 13, 2009; accepted October 23, 2009
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA04Z208, 2006AA040102) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2006AA04Z208, 2006AA040102)
1. 清华大学计算机系 清华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
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

节点的数量, 在保证一定覆盖度的前提下进行调度. 这需要节点大量冗余配置. 由于层次型网络簇头节点的能量消耗较大, 因此, 一些层次型网络的调度算法, 如低功耗自适应分簇层次体系 (Low-energy adaptive clustering hierarchy, LEACH) 方法, 研究如何有效、公平地选择簇头节点, 从而达到能量消耗的均衡, 提高网络的生存期.

一些调度算法主要适用于时分多址 (Time division multiple access, TDMA) 网络. 文献 [15] 中提出了一个分布的调度策略, 它采用上色机制, 将冲突避免和工作周期结合在一起调度节点的工作状态. 文献 [16] 提出了能量有效的 TDMA 协议, 给不同的节点分配不同的传输时间. 文献 [17] 提出了基于加权的时隙调度方法, 节点可以按负载量确定工作时隙长度, 动态调度节点时隙顺序, 提高能效. 文献 [18] 提出了一种根据信号噪声比 (Signal to interference plus noise ratios, SINR) 来调整节点发射功率的方法, 提高了节点数据包接收的成功率, 达到了节能的目的. 基于 TDMA 协议的调度算法, 需要精确的时钟同步, 而且, 当节点布置密度高、数据传输量大时, 会存在较高的数据冲突而难于实现.

另外, 文献 [19] 提出的分布式调度方法, 使节点可以通过观察收到数据包的时间间隔分布函数来整形自己的发送数据流量, 达到调度的目的. 该算法需要精确的时钟同步, 并有一定的丢包现象. 文献 [20] 提出了根据节点在路由中的位置调整节点唤醒频率的算法, 可以在确保延迟上限的条件下最大可能延长网络生存周期. 文献 [21−22] 针对节点的多级能量发送机制设计了一些调度算法. 迄今为止, 国内外有一些基于离散时间马尔可夫链 (Discrete time Markov chain, DTMC) 提出的调度机制. 其中, 大部分都基于自身的状态进行调度. 在文献 [23] 中, 作者提出了分析无线传感器网络性能的解析方法, 其中采用 DTMC 对节点进行建模. 作者引入了一个变量来对下一跳节点的工作状态进行建模分析.

通常情况下, 节点发送数据时的能耗要比接收数据时大. 这样, 在一个基于冲突的网络中, 能量除了消耗用于过度侦听外, 还有许多消耗在由相互冲突引起的数据包重传上. 特别是在节点布置密度高, 需要周期性地同步采集数据的 WSN, 如建筑物健康监控、目标定位和跟踪等应用中, 节点间发生数据包冲突的概率会更大, 从而引起过多的能量浪费. 针对这类数据采集网络, 为了减少节点能量消耗, 受文献 [23] 方法的启发, 我们提出了一种新的基于马尔可夫链的调度方法 (Markov chain-based scheduling approach, MBSA). 该方法通过节点相互协作形成工作状态调度策略, 是一个分布式的方法, 具备工程实用性. 我们首先证明了该方法的收敛特性, 然后进行了仿真. 结果表明该方法可以有效地减少能量消耗, 提高 WSN 的生存期, 同时网络的其他性能指标良好. 本文的主要贡献在于:

1) 对基于 CSMA/CA 协议的无线传感器网络节点工作状态进行划分, 建立了切合实际的 WSN 节点工作状态模型.

2) 提出了 MBSA 方法. 该方法根据节点及其邻近节点的统计信息调整节点状态调度的概率, 达到对工作环境的自适应调节. 该方法不仅可以对节点休眠模式进行调度, 还可以调度节点数据包的发送, 减少数据包冲突的发生.

3) 证明了 MBSA 方法是收敛的, 并能达到平衡状态.

4) 基于 CSMA/CA 协议, 我们对该方法进行了仿真. 结果表明该方法可以有效地节省能量, 并具有良好的自适应性和网络性能.

本文组织如下: 第 1 节提出了问题假设和模型; 第 2 节提出了 MBSA 方法, 并对其收敛性进行了证明; 第 3 节给出了相应的仿真结果, 并进行了分析; 第 4 节是本文的结束语.

1 模型和假设

本文研究的无线传感器网络是由许多位置相对固定或变化缓慢的节点组成. 各节点同步、周期性地感知环境, 将获得的数据组织成固定长度的数据包, 通过多跳通信发送到 Sink 节点, 供用户分析应用. Sink 节点数量没有特别要求, 本文中只考虑一个 Sink 节点的情况. 节点安装的是全向天线, 在同一个频率下进行数据通信. 数据发送和接收是两个不同的过程, 不能同时进行接收和发送. 系统的其他设定如下所述.

1.1 节点行为

设定节点发送数据、接收数据、空闲和休眠时, 分别处于发送状态 (T)、接收状态 (R)、空闲状态 (I) 和休眠状态 (S). 设定节点具有相同的工作周期长度和相同的唤醒时刻. 当节点唤醒以后, 可以接收数据、发送数据, 也可以进入空闲状态. 当节点休眠后, 不再进行数据的处理、发送或接收等操作, 将保持休眠直到下一个工作周期起始时刻被再次唤醒. 节点被重新唤醒后, 开始新的一轮工作周期. 节点的工作周期如图 1 所示. 需要注意的是, 当工作负载过大时, 节点在一个周期内可能无法进入休眠. 在新的周期开始时, 它将继续进行数据接收或发送等操作.

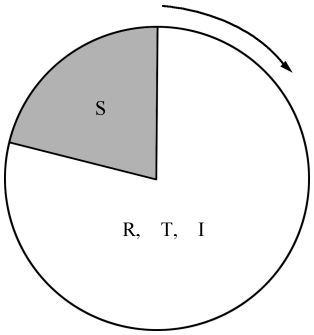


图 1　节点的工作周期

Fig. 1　Duty cycle of a node

设定节点在每个固定的时间间隔, 产生固定长度的数据包, 并将之存储在缓存中一个先入先出 (First input first output, FIFO) 队列中. 当节点接收数据以后, 将经处理后的数据也存储在 FIFO 队列中. 当发送数据包时, 节点从 FIFO 队列中取出数据包, 根据路由信息向下一跳节点发送. 存储在 FIFO 队列中的数据包会按序尽快发送出去. 如果数据包不能被正确接收, 则节点应当重发数据包, 直至收到下一跳节点发送回的确认帧, 从而保证网络系统是一个无丢失的、可靠的应用系统.

1.2　MAC 层

MAC 层采用 CSMA/CA 协议[24]. 可以采用 CSMA/CA 协议的基本方式, 或 RTS/CTS 方式.

1.3　路由

本文考虑节点位置相对固定或变化缓慢, 并且路由变化缓慢的 WSN 应用. 因而, 设定节点采用静态路由, 并且只有唯一的下一跳节点. 数据包沿该路由经多跳通信可以传送到 Sink 节点.

路由在 MBSA 方法开始运行前初始化形成, 具体过程如下: 由 Sink 节点广播发出路由探测包. 接收到该包的各节点, 经过各自的一个随机时延后, 向外以广播形式发出该路由探测包. 节点将接收到的第一个路由探测包的发送节点作为自己的下一跳节点, 不再处理接收到的其他路由探测包. 该过程一直持续到所有节点都明确知道了自己的下一跳节点. 路由过程结束后, 所有节点都具有到 Sink 节点的唯一路径.

对一条路由而言, 我们定义上游方向是沿路由向 Sink 节点的方向, 下游方向是相反的方向. 如果节点 B 向上游方向传送数据包时下一跳节点是节点 A, 则称节点 A 是节点 B 的父节点, 节点 B 是节点 A 的子节点. 节点 A 的子孙节点是由其子节点和这些子节点的所有子孙节点共同组成的.

1.4　时间同步

假定在全网范围内, 节点都可以保持时间一致性. 这样可以确保节点在每个工作周期的起始时刻, 能同时从休眠状态被唤醒. 由于一个工作周期比 TDMA 协议中的时槽要长得多. 因而, 本文中对时间同步精度的要求, 比基于 TDMA 协议的调度算法要宽松得多.

1.5　能量消耗模型

WSN 节点的处理单元、无线收发模块和存储模块等部件都会消耗电能. 节点的能量消耗由节点在空闲状态的能耗、数据发送的能耗、数据接收的能耗和休眠时产生的能耗组成. 节点在空闲和休眠状态的能耗都是相应状态下电能消耗功率与在相应状态时间的乘积. 本文设定节点采用固定发射功率. 由于节点通信频率固定, 因而, 节点发送数据的能耗是发送状态的功率与数据发送所用时间的乘积; 接收数据时能耗也是接收状态的功率与数据接收时间的乘积.

2　方法描述

在运行过程中, WSN 节点的状态序列是一个 DTMC, 必然要受到子节点、父节点和其他节点的影响. MBSA 的核心思想是: 首先对一个节点的所有子节点的工作状态、父节点的状态和节点周围信道的忙闲程度进行评估; 在此基础上, 构建调度节点状态转换的概率值; 通过调度节点数据包发送概率和节点休眠概率, 达到节省能量的目的. 我们在第 2.1 节对节点的运行状态进行分析; 在第 2.2～2.4 节论述 MBSA 的运行过程, 并详细讨论节点状态调度矩阵的形成方法; 在第 2.5 节和第 2.6 节, 对 MBSA 收敛性进行证明.

2.1　节点状态描述

当节点在空闲状态时, 可以接收子节点的数据包. 然后, 节点按照设定的调度概率决定是将进行数据包的发送, 还是转入空闲状态. 当节点被调度进入发送状态, 并发送完数据包后, 进入空闲状态.

节点 MAC 层发送数据帧后可能由于冲突引起重传. 以 IEEE 802.11 DCF 的 CSMA/CA 协议为例[24], 当数据发送失败, 而重传次数超过限定值后, MAC 层会将失败交给上层处理. 对于 RTS/CTS 方式, 还包括 RTS 请求帧数量的限定值. 为了反映节点多次发送数据失败而交由上层处理的状态, 我们引入新的状态: 失败状态 (F). F 状态的产生可能由于节点周围信道拥挤, 冲突太多引起的; 也可能是由于下一跳节点进入休眠而无法响应造成的. 对于前一种情况, 为减少冲突, 节点应当有一定的调度机

制, 择机发送或重发数据包; 而后一种情况下, 节点应当考虑是否进入休眠, 以减少能量的消耗.

两种情况可以使节点进入休眠状态. 一种是节点发送完 FIFO 中的所有数据包后, 如果还没有到下一个工作周期, 则进入休眠; 另一种是由于下一跳节点处于休眠状态, 同时子节点无数据发送时, 节点自身为节省能量进入休眠.

节点休眠后, 在下一个工作周期起始时将被唤醒. 此时, 如果节点的 FIFO 队列中没有数据包, 表明节点在上一个工作周期成功地将所有的数据包发送到下一跳节点; 而若 FIFO 队列中存有数据包, 表明进入休眠状态是由于数据包发送失败而引起的. 这样, 我们将空闲状态细分为 FIFO 队列中没有数据包时的空闲状态 (I_0) 和 FIFO 队列中有数据包时的空闲状态 (I_x).

综上所述, 新建立的节点工作状态如图 2 所示. 可以看出, 当节点运行时, 节点的状态序列将是一个 DTMC.

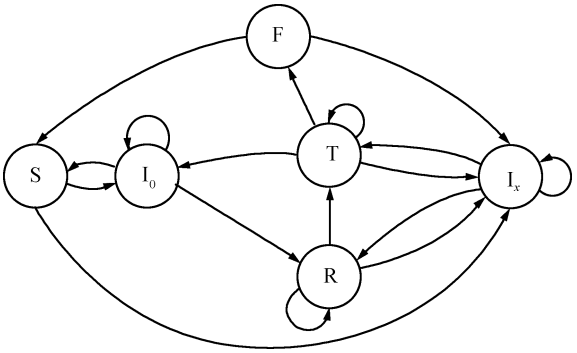


图 2 节点工作状态转移图

Fig. 2 State transition diagram of a node

图 2 中, S、T、R、F 分别表示休眠、发送、接收和发送失败状态, I_0 和 I_x 分别表示 FIFO 队列中无数据包时和存有数据包时的空闲状态.

节点的工作状态不仅与自身有关, 还与子节点和父节点的工作状况相关. 首先, 子节点的发送模式会对父节点的工作产生影响. 子节点发送数据包时, 可能与父节点发送过程产生冲突, 使父节点发送失败; 或者使父节点进入回退过程, 而不能发送数据. 为了反映子节点对父节点的影响, 我们将一个节点所有子节点的工作情况表示为下面两种状态: 静默态 (M) 和竞争态 (V), 如图 3 所示. M 表示所有子节点都处于未发送状态 (空闲、休眠和接收状态); V 表示子节点中至少有一个节点处于发送状态. 也就是说, 一个节点只有在其子节点为 M 状态时, 才可能成功地向自己的下一跳节点发送数据. 当为 V 状态时, 可能会产生冲突. 图中, v 表示由静默态转移到竞争态的概率, m 表示由竞争态转移到静默态的概率.

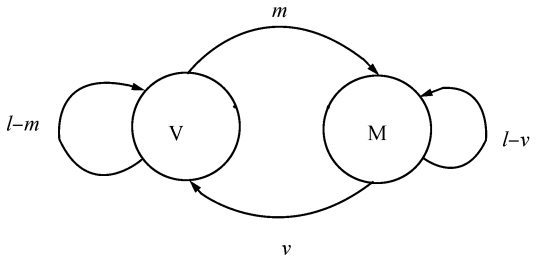


图 3 子节点工作状态转移图

Fig. 3 State transition of child nodes

其次, 由于父节点进入休眠状态后, 会使子节点发送失败, 而转入 F 状态. 所以, 节点进入 F 状态后, 还要对父节点的休眠情况进行预测. 我们引入参数 g_p 来表示父节点进入休眠的概率.

最后, 为反映节点所处环境的信道繁忙程度, 我们还引入变量 β 表示节点的数据帧发送成功率.

只有节点对信道繁忙程度、子节点工作状态和父节点的休眠状态进行合理的估计, 才可以有效地调度节点的工作状态.

2.2 系统工作过程

系统运行过程如图 4 所示. 系统开始运行时, 首先运行路由发现 (Routing discovery) 过程, 然后系统进入 MBSA 方法运行阶段. MBSA 方法由数据传输 (Data delivery, DD) 和调度更新 (Scheduling update, SU) 两个阶段组成. 系统将在这两个阶段间反复循环运行, 下面分别进行详细讨论.

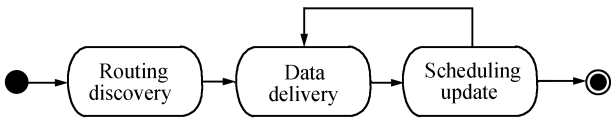


图 4 系统工作图

Fig. 4 System working diagram

2.3 数据传输

各节点具有相同数量的工作周期. 节点首次进入数据传输阶段时, 按预设调度概率值调度工作状态. 当调度更新以后, 节点按照新生成的调度值调度运行. 数据传输阶段节点主要完成以下工作:

1) 各节点按照固定时间间隔从感知部件获取定长的数据包. 每条路由的中间节点还将接收下游节点的数据包. 这些数据包先存于 FIFO 队列中.

2) 节点按照调度值, 确定是否能将数据包发送出去. 如果可以发送, 则将数据包发向下一跳节点; 如不能, 则调度节点进入空闲状态.

3) 节点发送完 FIFO 中的数据包后, 或者发送数据包失败后, 按照调度值, 确定是否进入休眠状

态. 如无法休眠, 则进入相应的空闲状态.

4) 进入休眠状态的节点将在下一个工作周期的起始时刻被唤醒.

5) 节点统计、汇总本次数据传输阶段中数据包发送时间、节点活动状态时间、成功发送数据包数、已发送数据包数. 这些数值将用于调度更新阶段, 节点间相互协作生成相应的调度矩阵.

2.4　调度更新

调度更新阶段由上行更新 (Upstream update)、下行更新 (Downstream update) 和概率计算三个步骤组成. 上行更新与下行更新如图 5 所示. 其中, 节点 $N_1 \sim N_k$ 为节点 N_m 的子节点, N_m 为节点 N_n 的子节点.

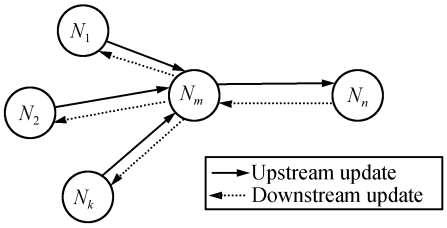


图 5　MBSA 方法调度更新过程示意图

Fig. 5　Scheduling update procedure in MBSA

1) 上行更新

由于子节点的发送状态会对父节点的发送状态产生影响. 因而, 通过上行更新, 父节点可以对子节点的工作状态进行预测. 上行更新过程时, 每个节点首先汇总在数据传输阶段中的数据包发送时间, 然后将这一参数发向下一跳节点. 当父节点接收到所有子节点的这一参数后, 计算反映其子节点工作状态的状态转移概率, 按式 (1) 和式 (2) 计算相应的 v 和 m.

$$v = \sum_{j \in ch} \frac{t_j}{t_a} \tag{1}$$

$$m = \prod_{j \in ch} (1 - \frac{t_j}{t_a}) \tag{2}$$

其中, ch 是该节点所有子节点的集合, t_j 表示子节点 j 在数据传输阶段数据包发送总时间, t_a 表示节点自身在数据传输阶段中活动状态总时间.

2) 下行更新

父节点进入休眠后, 会引起子节点发送数据包失败并转入 F 状态. 因而, 下行更新用来使节点在 F 状态时评估父节点的当前状态. 上行更新完毕后, 由 Sink 节点发起, 向全网广播下行更新包, 启动下行更新过程. 下行更新包沿各条路径向下游节点传播. 节点收到这一数据包后, 取出父节点进入休眠的概率, 结合考虑子节点工作状态后按式 (3) 计算自己由 F 调度到 S 的概率.

$$g = g_p \times (1 - v) \tag{3}$$

其中, g 是节点自身从 F 状态到 S 状态的调度概率, g_p 是父节点从 F 状态到 S 状态的转移概率.

然后, 节点将自己由 F 状态调度到 S 状态的概率值再插入到下行更新包后向下游节点发送. 下行更新包在各条路由上一直传播到最后一个节点. 这样, 所有节点可以计算出自己由 F 状态调度到 S 状态的概率. 需要说明的是, 在节点向下游方向发送下行更新包时, 其中只包含其由 F 状态调度到 S 状态的概率. 这是因为假定在理想情况下, 只有等所有子节点发送完数据并休眠后, 父节点才可能休眠. 因而, 子节点的 F 状态仅是由数据冲突而引起的. 只有当父节点的下一跳节点过早地进入休眠而导致父节点因发送失败转入休眠后, 才会引起子节点因父节点的休眠而进入 F 状态. 所以, 应当传递节点由 F 状态调度到 S 状态的参数. 本文中下行更新开始时的初始值如下: Sink 节点没有休眠; 距 Sink 节点只有一跳的节点, 其由 F 状态调度到 S 状态的概率值设定为其由 I_0 调度到 S 的概率值.

3) 概率计算

当采用 CSMA/CA 的基本方式时, 按式 (4) 计算节点数据帧发送成功率参数 β. 当采用 RTS/CTS 方式的 CSMA/CA 协议时, 可以用 RTS 帧的数量来替换式 (4) 中数据帧的数量. 该参数反映了节点所处环境的数据包发生冲突的概率, 也反映了信道的拥挤情况.

$$\beta = \frac{\text{成功发送的数据帧数目}}{\text{发送数据帧的总数目}} \tag{4}$$

然后, 我们就可以按照表 1 所示的各公式计算节点的状态调度矩阵 (Scheduling matrix, SM). 表中未列出的其他概率为 0. 其中, 各转移概率值的物理意义可以从第 2.1 节得出. 以 $p(\mathrm{T}|\mathrm{R}) = m \times \beta$ 为例, 一个节点接收到一个数据包后, 其立即进行数据包发送的前提条件是该节点的所有子节点都停止发送, 并且它发出的数据包在信道中能够成功被下一跳节点接收. 因此, 该式表示节点收到数据包后调度其立即进行发送的概率等于该节点的所有子节点都停止发送数据的概率与该节点成功发送数据帧比率的乘积. 由于我们是在 CSMA/CA 协议之上来实现 MBSA 方法的, 因此, 我们不对节点是否进入 R 状态和 F 状态进行调度. 一个节点是否接收数据包由 MAC 层对象按 CSMA/CA 协议与其他节点协商决定. 当节点发送数据时, 将数据包交给 MAC 层对象. MAC 对象发送数据, 当失败次数超过限定值后,

上交给 MBSA 算法, 使节点处于 F 状态. 由于从一个状态转移到其他各种状态的概率和为 1, 故可以用其他概率值来计算转移到这两个状态的概率.

表 1 节点状态调度概率表

Table 1 State scheduling probabilities

S_i	S_{i+1}	$P(S_{i+1} \mid S_i)$
S	I_0/I_x	1
I_0	S	$1-v$
I_0	I_0/R	v
R	T	$m \times \beta$
R	I_x	$1-m \times \beta$
I_x	I_x/R	$1-(1-v) \times \beta$
I_x	T	$(1-v) \times \beta$
T	I_x/F	$1-(1-v) \times \beta$
T	T	$(1-v) \times \beta$
F	I_x	$1-g_p \times (1-v)$
F	S	$g_p \times (1-v)$

表 1 中, 第 1 列为节点当前时刻状态, 第 2 列为下一时刻转移后的状态, 第 3 列为状态转移的概率值. 在每个工作周期的起始时刻节点唤醒, 此时如果 FIFO 队列为空, 则状态转移至 I_0, 否则转至 I_x. A/B 表示状态 A 或者状态 B, 该行的第 3 列概率值表示转到状态 A 与转到状态 B 的转移概率之和.

需要说明的是, 父节点影响子节点的休眠概率, 而子节点也影响了父节点的发送概率和休眠概率. 例如, 若父节点休眠概率过大时, 会使休眠时间增加, 从而会造成子节点数据包发送时, 数据包的多次重传, 引起子节点数据包发送时间延长. 这样, 当进行上行更新过程时, 会引起父节点参数 v 的增大, 导致父节点由 F 转移到 S 的概率和由 I_0 进入 S 的概率减小. 所以, 路由上相邻节点间具有相互影响和制约的功能.

2.5 调度参数序列

MBSA 方法运行过程中, 节点或 WSN 系统在运行数据传输和调度更新一轮以后, 计算形成新的调度矩阵, 如图 6 所示. 调度矩阵决定了节点在下一轮数据传输阶段中的工作特性, 决定了其进入休眠的概率和数据包发送的概率, 也决定了休眠的时间和数据包发送时间等参数. 由表 1 可以看出节点的调度矩阵是由参数 v, m, g, β 决定的, 称其为调度参数 (Scheduling parameter, SP). 可以用调度参数来代表节点的调度矩阵. 从图 6 中可以看出, 节点或系统按轮反复运行, 这几个参数将形成一串参数序列, 称该序列为调度参数序列. 节点调度参数序列决定了节点全程的运行状况. 同样地, 所有节点的调度参数组成了 WSN 的系统调度参数. 经过运行, 也形成了系统调度参数序列.

图 6 中, 上标表示 MBSA 算法运行的轮数, SM^i 表示第 i 轮的调度矩阵, SP^i 是第 i 轮的调度参数, DD^i 和 SU^i 是第 i 轮的数据传输阶段和调度更新阶段.

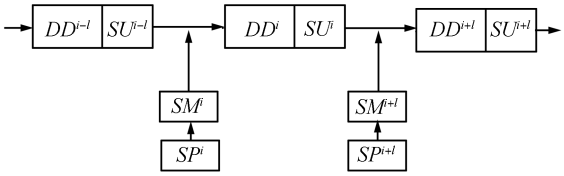


图 6 节点调度参数序列图

Fig. 6 The sequence of scheduling parameters

2.6 收敛性分析

由于数据包长度是固定的, 因此, 每个数据包的发送时间是定长的. 另外, 对于 CSMA/CA 协议而言, 短帧间间隔 (Short interframe space, SIFS), 分布式 (协调功能) 帧间间隔 (Distributed (coordination function) interframe space, DIFS), 扩展帧间间隔 (Extended interframe space, EIFS), 点 (协调功能) 帧间间隔 (Point (coordination function) interframe space, PIFS) 的时间长度都与 Slottime 和 SIFS 相关[24], 这几个时间值也是离散变量. 因此, 由式 (1) 和式 (2) 知, 参数 v, m 也是离散随机变量. 由式 (1) ~ (3) 知, 由于 g 是子节点、节点自身和下一跳节点的数据发送时间、自身活动时间的函数, 它也是一个离散的变量. 而参数 β 本身是两个整数值的比值, 也是离散随机变量. 假设一个节点有 k 个子节点, 那么它在第 n 轮循环的调度参数可以用 $SP^n = (t_a^n, t_1^n, t_2^n, \cdots, t_k^n, g^n, \beta^n)$ 来表示. 下面将讨论调度参数序列的马尔可夫特性. 由于每个调度参数也是马尔可夫链中的一个状态, 故也称其为调度参数状态. 设 H_L 是节点调度参数状态空间, 由于数据传输阶段是一个固定长的时间值, 而数据包数量也是一个固定的值, 因此, 节点的调度参数状态数量是有限的, 并有如下的定理.

定理 1. 对于 MBSA 方法, 一个节点所生成的调度参数序列 $\{SP^n, n \in \mathbf{N}_0, SP^n \in H_L\}$ 是一个有限、齐次、不可约的马尔可夫链.

证明. 由于 H_L 中的状态是有限的, 在 MBSA 方法中, 调度参数 SP^n 是节点按照上一轮形成的调度参数 SP^{n-1} 在数据传输阶段与其相邻节点交换数据包形成的, 故而调度参数是由上一轮的调度参数状态决定的, 而与其他时间段的调度参数状态无

关. 从而, $\{SP^n, n \in \mathbf{N}_0, SP^n \in H_L\}$ 是一个有限状态、齐次马尔可夫链.

另外, 相邻两轮数据传输阶段中, 节点工作过程是相互独立的. 对于任意的 $SP^n \in H_L$, 均存在 $SP^{n+1} \in H_L$, 使得

$$P(SP^{n+1}|SP^n) > 0$$

并且, 对于任意 $SP^{n+1} \in H_L$, 也存在 $SP^n \in H_L$, 使得

$$P(SP^{n+1}|SP^n) > 0$$

因此, 这说明 $\{SP^n, n \in \mathbf{N}_0, SP^n \in H_L\}$ 还是一个不可约的马氏链. □

引理 1. 不可约的有限状态马氏链有唯一的平稳分布, 并且该平稳分布就是其极限分布.

证明. 由文献 [25] 中定理 3.5.1 的推论 2 可得, 不可约的有限状态马氏链的所有状态都是正常返状态, 因而也是一个遍历链. 由文献 [25] 中定理 3.5.6 可得, 不可约的有限状态链存在唯一的平稳分布. 由文献 [25] 中定理 3.5.8 可得, 该平稳分布就是不可约有限状态马氏链的极限分布. □

定理 2. 设 $\{SP^n, n \in \mathbf{N}_0, SP^n \in H_L\}$ 是由 MBSA 方法所生成的节点调度参数序列, 则其一步状态转移概率矩阵 $P = (p_{i,j})$ 存在极限、平稳分布.

证明. 根据上述定理, 在 MBSA 算法运行下, 节点调度参数序列 $\{SP^n, n \in \mathbf{N}_0, SP^n \in H_L\}$ 是一个有限、齐次、不可约的马尔可夫链. 根据引理 1 可知, 它的一步状态转移概率矩阵 $P = (p_{i,j})$ 存在平稳分布 π_L, 而且这一平稳分布也是其极限分布. □

一个 WSN 系统的调度参数是由系统内全部节点的调度参数共同组成的. 一个节点在一轮数据传输阶段中传送的数据包数据是固定的, 因此数据包发送成功率 β 与其数据包发送总时间相关, 可以用数据包发送总时间来表示. 当节点 β 越大时, 数据包发送总时间越小; 反之越大. 另外, 节点休眠概率也是其子节点数据包发送时间和其上游节点时间参数的函数. 因此, 系统在第 n 轮循环数据传输阶段, 调度参数序列用下式所示

$$SP_G^n = (t_1^n, t_2^n, \cdots, t_N^n, t_{a1}^n, t_{a2}^n, \cdots, t_{aN}^n)$$

其中, t_i^n, t_{ai}^n 分别表示第 i 个节点在第 n 轮循环数据传输阶段中, 数据包发送时间和活动状态时间; N 为 WSN 内节点的总数. 设 H_G 为系统调度参数状态的状态空间, 对于系统调度参数有如下的定理.

定理 3. 一个 WSN 系统由有限个节点组成. 每个节点运行 MBSA 方法, 则该 WSN 系统调度参数序列 $\{SP_G^n, n \in \mathbf{N}_0, SP_G^n \in H_G\}$ 是一个有限、齐次、不可约的马尔可夫链.

证明. 证明的过程与定理 1 相似.

由于各节点的 H_L 是一个有限的状态空间, 加之节点数量有限, 所以 H_G 也是一个有限状态集. SP_G^n 是由系统在上一数据传输阶段中的统计信息形成的, 与其他轮数据传输阶段的统计信息无关. 即只与 SP_G^{n-1} 有关, 而与其他调度参数无关. 因此, $\{SP_G^n, n \in \mathbf{N}_0, SP_G^n \in H_G\}$ 是一个有限状态、齐次马尔可夫链.

另外, 对于任意的 $SP_G^n \in H_G$, 均存在 $SP_G^{n+1} \in H_G$, 使得

$$P(SP_G^{n+1}|SP_G^n) > 0$$

并且, 对于任意 $SP_G^{n+1} \in H_G$, 也存在 $SP_G^n \in H_G$, 使得

$$P(SP_G^{n+1}|SP_G^n) > 0$$

因此, 这说明 $\{SP_G^n, n \in \mathbf{N}_0, SP_G^n \in H_G\}$ 还是一个不可约的马氏链. □

定理 4. 设 $\{SP_G^n, n \in \mathbf{N}_0, SP_G^n \in H_G\}$ 是由 MBSA 方法所生成的 WSN 系统调度参数序列, 则该参数序列的一步状态转移概率矩阵 $P' = (p'_{i,j})$ 存在极限、平稳分布.

证明. 根据定理 3 可以得出, 系统调度参数序列 $\{SP_G^n, n \in \mathbf{N}_0, SP_G^n \in H_G\}$ 是一个有限、齐次、不可约的马尔可夫链. 根据引理 1 可知, $P' = (p'_{i,j})$ 存在平稳分布 π_G, 而且这一平稳分布也是其极限分布. □

上述定理说明, 在 MBSA 方法下, 节点和系统形成的调度参数序列经过多次运行后, 其一步状态转移概率矩阵将收敛到其平稳分布. 下面将从马尔可夫决策过程角度分析节点和系统运行的收敛特性.

一个离散时间马尔可夫决策过程可以用以下的五元组来表示[26]

$$\{U_S, A[i], q(\cdot|i,a), r(i,a), V,\ i \in U_S,\ a \in A[i]\}$$

其中, U_S 表示系统状态集合, $A[i]$ 表示在状态 i 时可用的决策集, $q(\cdot|i,a)$ 表示在状态 i 采取决策 a 后系统在下一个时刻所达状态的概率, $r(i,a)$ 表示节点在状态 i 采取行动 a 得到的报酬 (或费用), V 是准则函数, 表示采取何种方式评价决策. $V[i]$ 表示在 0 时刻从状态 i 出发的条件下, 采取某种评价决策最终获得的效用.

引理 2. 对于一个马尔可夫决策过程, 如果其状态集合的一步状态转移矩阵 Q 是一个不可约的或者是单马尔可夫链的转移概率矩阵, 那么它的无限阶段平均报酬 $\bar{V}$ 为一个常向量, 其值如下所示

$$\bar{V} = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^{N} Q^n r = Q^* r$$

其中, Q^* 是状态转移矩阵 Q 的极限性态.

证明过程参见文献 [27] 中的推论 4.1.

定理 5. 对于一个满足第 1 节条件的 WSN 网络, 当节点采用 MBSA 方法对工作状态进行调度时, 所生成的节点平均每轮能耗和网络的整体平均每轮能耗将会逐步收敛到某固定值.

证明. 当一个满足第 1 节条件的 WSN 的各节点依照 MBSA 方法对工作状态进行调度时, 根据图 6 所示, 在 DD 阶段进行数据的传输, 在 SU 阶段进行统计和参数交互, 并形成下一轮调度参数. 将每次 SU 阶段结束时刻记为决策时刻, 设第 i 个决策时刻节点调度参数状态为 SP^i, 则节点的调度参数状态集合为 H_L. 根据式 (1) ∼ (3) 和表 1 可知, 节点在下一轮的调度矩阵 SM^i 是 SP^i 中各参数的确定值. 该调度矩阵为节点在此状态下的行动, 即节点在 SP^i 状态下的行动集合 $A(SP^i) = \{SM^i\}$. 这样, 节点调度参数序列一步状态转移概率 $p(SP^{i+1}|SP^i)$ 表示节点在调度参数状态 SP^i 时选择对应的确定行为 SM^i 后, 下一决策时刻所处调度参数状态 SP^{i+1} 的概率. 用 $e(SP^i)$ 表示节点在调度参数状态 SP^i 时采取相应的调度矩阵 SM^i 后在数据交换阶段消耗的能量, 可以看出节点采取 MBSA 方法调度运行的过程是一个马尔可夫决策过程.

根据定理 1 知, 节点调度参数序列是一个有限状态、齐次、不可约的马尔可夫链. 因此, 节点在无限阶段上的平均每轮能量消耗可以写为

$$\bar{E} = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^{N} P^n e$$

根据定理 2 知, 节点调度参数序列一步状态转移概率矩阵 P 存在极限分布. 设 P 的极限性态为 P^*, 根据引理 2, 可以得到 $\bar{E}$ 是一个常向量, 其值为

$$\bar{E} = P^* r$$

由于 P^* 各行与 P 的平稳分布相同, 因此 $\bar{E}$ 是一个各行相等的向量. 这表示节点从任一初始状态出发, 经过无限轮运行后平均每轮能量消耗将收敛于一个常量.

同样地, 根据定理 3、定理 4 和引理 2 也可以得到: 整个 WSN 系统从任一初始状态出发, 经过无限轮运行后整个网络的平均每轮能量消耗也将趋于某一常量. □

节点调度更新可以按固定周期进行, 也可结合节点周期性的时钟同步或者路由更新时进行. 另外, 在数据传输阶段, 节点只是进行 4 个参数的统计; 在调度更新阶段, 节点间交换的参数更少, 只有 2 个. 这些交换的参数可以单独组包发送, 也可以插入 MAC 协议的管理包中捎带进行参数交换. 节点接受参数后, 进行调度处理计算也非常简单. 因此 MBSA 方法可以应用到实际 WSN 系统中去.

3 仿真实验

为了对 MBSA 进行验证, 我们在 NS2 仿真平台上, 基于 RTS/CTS 方式的 CSMA/CA 协议进行了仿真实验, 并分析了网络的能耗和其他性能.

3.1 参数设置

我们构建的 WSN 网络含有 200 个节点, 随机均匀地分布在边长为 2 000 m 的正方形区域内, Sink 节点位于区域的中心位置. 节点周期地生成数据, 并将数据发向 Sink 节点. 节点的通信距离统一设为 250 m.

参照 Crossbow 公司 IRIS 节点的能量消耗[28], 我们设定节点的状态能耗模型如表 2 所示. 由于 IRIS 节点的 RAM 容量比 MICAZ 增加了一倍, 本文中不考虑外部存储器的使用. 根据 IRIS 节点在 T、R、I 状态下的实测电流值和 IRIS 节点手册中各部件都处于休眠状态时的电流值, 计算出节点在各状态的能耗功率值. 我们定义节点接收时能耗功率为 0.053 W, 发送时能耗功率为 0.07 W, 空闲时能耗功率为 0.048 W, 休眠时能耗功率为 0.000033 W. 本文中不考虑节点用于传感器感知的能耗.

表 2 节点状态能耗模型

Table 2 Energy model of nodes′ states

状态	处理器	收发模块	外部存储器
T	活动	发送	休眠
R	活动	接收	休眠
I	空闲	接收	休眠
S	休眠	休眠	休眠

网络通信速率设为 250 Kbps, 应用层每 20 秒产生 100 字节的数据, 节点工作周期为 10 秒, 节点数据传输阶段定为 60 秒, 之后进行调度更新. 调度更新之后下一个数据传输阶段开始时, 节点唤醒并重新进行数据传输.

设定系统具有高可靠性的要求, 数据不能丢失. 数据传输时采用点到点的数据确认方式. 当节点发送数据失败后, 应当择机进行数据包的重发. 数据包的发送依照 FIFO 队列中的先后顺序进行, 发送成功一个数据包后才发送下一个.

我们采用两组实验, 一组运行没有采用 MBSA 方法 (Non-MBSA) 的 CSMA/CA 协议进行实验, 作为性能的对比和参照; 另一组采用基于 CSMA/CA 协议的 MBSA 方法进行实验. MBSA 方法初始时设定节点的休眠概率为 0, 发送概率为 1, 即首轮不进行调度. 每组中各进行 20 次实验, 每次实验

MBSA 算法循环 40 轮, 节点位置固定不变, 每次实验时路由都是随机形成. 实验设置如表 3 所示.

表 3　仿真参数设置表

Table 3　Parameters setting for simulations

参数	数值	单位
节点数量	200	个
安放区域	$2\,000 \times 2\,000$	m^2
通信距离	250	m
接收能耗	0.053	W
发送能耗	0.07	W
空闲能耗	0.048	W
休眠能耗	0.000033	W
通信速率	250	Kbps
工作周期	10	秒
更新周期	60	秒
数据长度	100	字节
数据生成周期	20	秒

3.2　实验结果

对每次仿真实验, 定义如下的网络性能指标:

1) 能量总消耗: 网络内所有节点在实验结束时消耗的能量总和, 计量单位为瓦 (W).

2) 队列长度: 在数据传输阶段, 最大的节点 FIFO 队列长度的平均值, 计量单位为数据包数量.

3) 网络吞吐率: 在数据传输阶段内, Sink 节点一秒钟内平均收到的数据包字节数, 计量单位为字节每秒 (Bps).

4) 包延迟: 在数据传输阶段内, 数据包从源节点传送到 Sink 节点所花费时间的平均值, 计量单位为秒 (s).

对两组各 20 次仿真实验结果进行统计, 结果如表 4 所示. 从表 4 中可以看出, 采用 MBSA 方法比未采用该方法的系统, 可以显著地节省能量. 采用 MBSA 方法时, 节点的队列长度稍有增加, 但增加不大; 采用 MBSA 方法时, 网络的吞吐率基本上一致, 但标差稍大; 在网络的包延迟方面, 采用 MBSA 方法时稍有增加, 但是相差不大. 这主要是由于 MBSA 方法引入冲突避免和休眠/唤醒机制引起的. 总之, MBSA 方法可以大大减少系统能耗水平, 而其他网络性能指标与 Non-MBSA 方法时相差不大.

图 7 反映了节点平均能耗与跳数的关系, 可以看出, MBSA 方法与 Non-MBSA 方法的曲线相似, 能耗都随着跳数的减小而逐渐增加. 但在相同的跳数下, 运行 MBSA 方法比基于单纯 CSMA/CA 的 Non-MBSA 方法的系统能省更多的能量. 图 8 反映了节点平均能耗与节点的子孙节点数量的关系. 由于节点在固定周期产生数据包, 因此, 节点的子孙越多, 其应当转发的数据包数量也越多, 结果导致休眠的概率越小, 并且数据包冲突概率也增大, 所以能量消耗也会越多. 图 8 实际上也反映了能耗与节点工作量的关系. 从图中也可以看出, 运行 MBSA 方法时, 节点的能耗随着工作量增加而增加. 图 7 和图 8 都表明该方法具有很好的自适应性.

表 4　仿真结果

Table 4　Simulation results

性能指标	特征	Non-MBSA	MBSA
能量总消耗 (W)	均值	27 934.969	10 929.128
	标差	237.064	163.661
队列长度 (包数量)	均值	58.800	59.430
	标差	6.085	10.590
网络吞吐率 (Bps)	均值	1 194.000	1 194.295
	标差	0.000	10.976
包延迟 (s)	均值	3.801	5.657
	标差	0.139	1.179

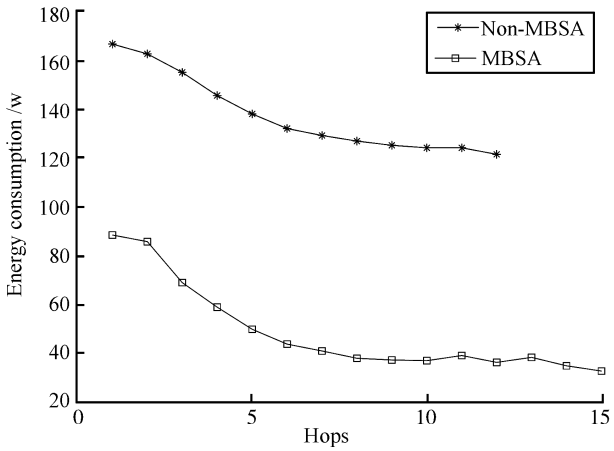


图 7　节点平均能量消耗与跳数关系图

Fig. 7　Average energy consumption with the hop of nodes

图 9 和图 10 反映了系统和节点在每轮循环中能量消耗的情况, 可以看出, 能耗将很快趋于稳定, 这表明 MBSA 方法具有很好的稳定性, 而且收敛速度比较快.

4　结束语

能量效率是无线传感器网络一个非常关键的研究内容. 鉴于此, 本文提出了一种基于马尔可夫链的

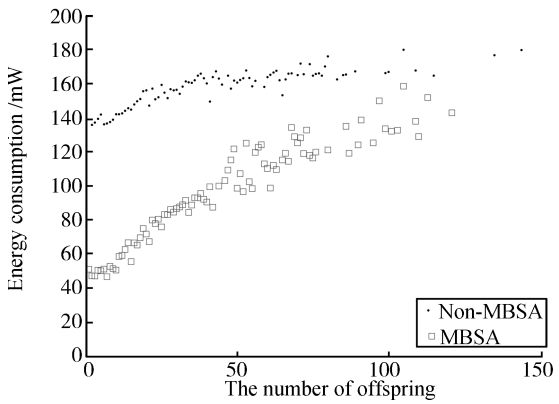


图 8 节点能耗与子孙节点数量关系图

Fig. 8 Average energy consumption with the number of descendant nodes

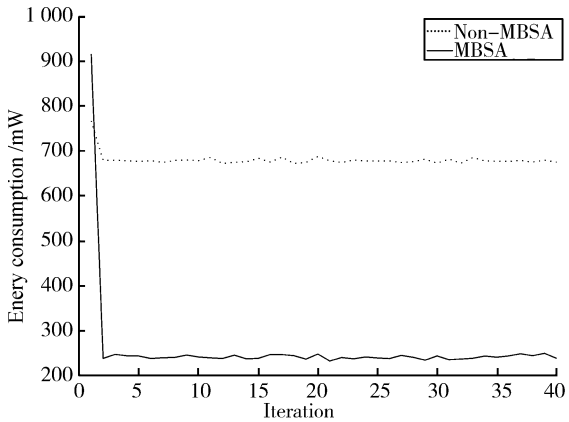


图 9 每轮循环的系统能量总能耗图

Fig. 9 Total energy consumption of WSN system at each iteration

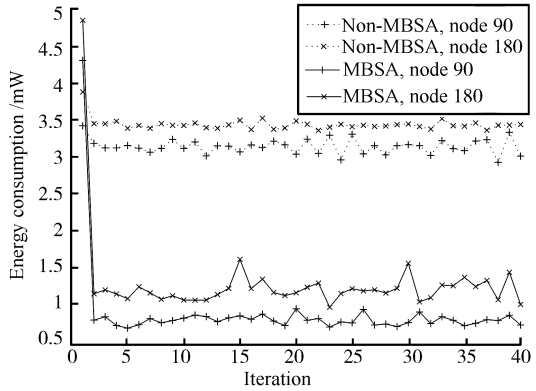


图 10 90 号和 180 号节点在每轮循环中的能耗

Fig. 10 Energy consumption on the nodes of No. 90 and No. 180 at each iteration

协作分布式调度方法. 通过该方法可以调度节点进入休眠状态, 并根据数据包冲突情况调度节点的数据包发送. 理论证明了该方法的收敛特性. 仿真结果表明, 该方法可以节省大量的能量, 且该方法由于运行简单, 可以运用到实际应用系统中. 下一步的研究将主要集中在节点能量均衡和高能效的路由协议上.

References

1 Akyildiz L F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communication Magazine*, 2002, **40**(8): 102−114

2 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)

3 Mainwaring A, Culler D, Polastre J, Szewczyk R, Anderson J. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. Atlanta, USA: ACM, 2002. 88−97

4 Kim S, Pakzad S, Culler D, Demmel J, Fenves G, Glaser S. Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks, Technical Report No. UCB/EECS-2006-121, Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, USA, 2006

5 Tran D A, Nguyen T. Localization in wireless sensor networks based on support vector machines. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2008, **19**(7): 981−994

6 Sun Li-Min, Li Jian-Zhong, Chen Yu. *Wireless Sensor Network*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 69−83 (孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络. 北京: 清华大学出版社, 2005. 69−83)

7 Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy-constrained Ad Hoc wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2002, **9**(4): 8−27

8 Amit S, Anantha C. Dynamic power management in wireless sensor network. *IEEE Design and Test*, 2001, **18**(2): 62−74

9 Jiang Hua, Zheng Chun-Lei, Liu Hai-Tao. Research of link level energy efficiency strategy in wireless sensor networks. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(6): 2738−2742 (姜华, 郑春雷, 刘海涛. 无线传感网中链路级能量有效策略的研究. 传感技术学报, 2006, **19**(6): 2738−2742)

10 Wang B, Han Z, Liu K J R. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using buyer/seller game. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Alaska, USA: IEEE, 2007. 544−552

11 Chang T J, Wang K, Hsieh Y L. A color-theory-based energy efficient routing algorithm for mobile wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2008, **52**(3): 531−541

12 Chatterjea S, Nieberg 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

13 Liu Song, Zhong Chong-Quan, Teng Hong-Fei, Zhou Qian, Song Ben-Jie. Research and implementation of node adaptive sleep schedule algorithm for wireless sensor networks.

Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, **21**(10): 1755−1759
(刘嵩, 仲崇权, 滕弘飞, 周倩, 宋本杰. 无线传感器网络节点自适应睡眠调度算法 NASS 的研究与实现. 传感技术学报, 2008, **21**(10): 1755−1759)

14 Wang L, Xiao Y. A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 2006, **11**(5): 723−740

15 Chen Y, Fleury E. A distributed policy scheduling for wireless sensor networks. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Alaska, USA: IEEE, 2007. 1559−1567

16 Yao Y, Giannakis G B. Energy-efficient scheduling for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, **53**(8): 1333−1342

17 Wu Yan-Ping, Liu Ming, Ye Juan. Time-slot scheduling algorithm based on weighted traffic load in wireless sensor networks. *Journal of Computer Applications*, 2007, **27**(12): 3004−3006
(伍燕平, 刘明, 叶娟. 无线传感器网中基于加权负载的时隙调度算法. 计算机应用, 2007, **27**(12): 3004−3006)

18 Lu G, Krishnamachari B. Energy efficient joint scheduling and power control in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Santa Clara, USA: IEEE, 2005. 362−373

19 Visweswara S C, Dutta R, Sichitiu M L. Adaptive Ad Hoc self-organizing scheduling for quasi-periodic sensor network lifetime. *Computer Communications*, 2006, **29**(17): 3366−3384

20 Cohen R, Kapchits B. An optimal wake-up scheduling algorithm for minimizing energy consumption while limiting maximum delay in a mesh sensor network. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, **17**(2): 570−581

21 Randeep B, Abhishek K, Li L. The power balancing problem in energy constrained mlti-hop wireless networks. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Alaska, USA: IEEE, 2007. 553−561

22 Altman E, Avrachenkov K, Miller G, Prabhu B. Discrete power control: cooperative and non-cooperative optimization. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Alaska, USA: IEEE, 2007. 37−45

23 Chiasserini C F, Garetto M. An analytical model for wireless sensor networks with sleeping nodes. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, **5**(12): 1706−1718

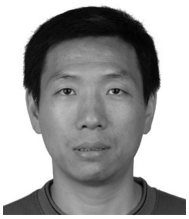
24 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ANSI/IEEE Standard 802.11, 2003

25 Lin Yuan-Lie. *Applied Stochastic Process*. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
(林元烈. 应用随机过程. 北京: 清华大学出版社, 2002)

26 Hu Qi-Ying, Liu Jian-Yong. *An Introduction to Markov Decision Processes*. Xi′an: Xidian University Press, 2000
(胡奇英, 刘建庸. 马尔可夫决策过程引论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000)

27 Liu Ke. *Applied Markov Decision Process*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
(刘克. 实用马尔可夫决策过程. 北京: 清华大学出版社. 2004)

28 MPR-MIB Users Manual (Revision A) [Online], available: http://www.xbow.com, June 6, 2007



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, 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、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, 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.)