

一种基于分簇结构的无线传感器网络混合调度 MAC 协议^{*})

刘兰军 张晓彤 王沁 李磊

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘要 针对突发和周期信号并存的应用场景,提出了一种基于分簇结构的无线传感器网络混合调度 MAC 协议——CBPMAC/TFC(A Cluster-based Wireless Sensor Network MAC Protocol for the System with Burst and Periodic Signals/ Based on TDMA,FDMA,CSMA)。簇间采用基于 FDMA 的调度机制,簇内采用基于 TDMA 和 CSMA 的联合调度机制。提出了以簇头为基准的相对时间同步机制,同步精度为一个帧周期的时钟漂移。给出了基于能量阈值的簇头轮换策略和基于侦听的故障处理策略。理论分析和实验结果表明:CBPMAC/TFC 协议在响应实时性和能量有效性方面介于 CSMA 和 TDMA 之间,与 CSMA 相比,在损失一定突发信号响应实时性的情况下,节省能耗 18.7%;与 TDMA 相比,在改善突发信号响应实时性的情况下,损失能耗 23.6%。

关键词 无线传感器网络,MAC,TDMA,FDMA,CSMA,时间同步,混合调度

Cluster-based Hybrid Scheduling MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

LIU Lan-jun ZHANG Xiao-tong WANG Qin LI Lei

(School of Information Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract For the application scene with both burst signals and periodic signals, this paper proposes a cluster-based hybrid scheduling MAC protocol for wireless sensor networks——CBPMAC/TFC(A Cluster-based Wireless Sensor Network MAC Protocol for the System with Burst and Periodic Signals/Based on TDMA,FDMA,CSMA). Among different clusters, a FDMA scheduling mechanism is adopted. In clusters, a coordinate Scheduling mechanism based on TDMA and CSMA is adopted. For the requirement of synchronization, a cluster-head-based relative time synchronization mechanism is proposed. The synchronization precision is the clock drifting of a sampling period. In addition, an energy-aware cluster-head alternation strategy and a listening-based disposal strategy for malfunctions are introduced. Analysis and test results show that CBPMAC/TFC is a compromise proposal. Compared with CSMA, CBPMAC/TFC will lose some real-time response for burst signals, but can save energy consumption by 18.7%. Compared with TDMA, CBPMAC/TFC may consume more energy by 23.6%, but can improve real-time response for burst signals.

Keywords Wireless sensor networks, MAC, TDMA, FDMA, CSMA, Time synchronization, Hybrid scheduling

1 引言

在无线传感器网络的多层协议栈中,MAC 协议负责解决多个节点共享无线信道的问题,决定节点何时占用共享信道,避免数据传输的碰撞。而数据碰撞是能量损耗的主要因素,因此 MAC 协议设计是无线传感器网络系统设计的一个关键问题。目前流行的无线传感器网络 MAC 协议主要基于四种调度机制,分别是 CSMA, TDMA, CDMA, FDMA。基于 CSMA 调度机制的 MAC 协议采用载波侦听随机接入的方式共享无线信道^[1],可有效解决突发信号实时传输的碰撞问题,但其能量消耗较多的空闲侦听对周期性信号而言是一种能量浪费;基于 TDMA 调度机制的 MAC 协议,节点按照预分配的时隙与其他节点通信^[2],避免了与邻居节点发生碰撞,同时节点仅在固定的时隙内打开无线收发器,在其余时间则关闭无线收发器,大大减少了空闲侦听的时间,因此 TDMA 具有内在的节能特性^[5],但不能满足突发信号的实时传输要求;基于 CDMA 调度机制的 MAC 协议为每个节点分配特定的具有正交性的地址码^[3],在频率、时间、空间上可以重叠,因此可以比

较好地解决无线传感器网络的信道共享问题,但需要复杂的 CDMA 编解码,对传感器节点的计算能力要求较高;FDMA 调度机制是一种辅助协议^[4],跟其他协议联合使用,提高网络的并行性。

本文针对突发和周期信号并存的应用场景,提出了一种基于分簇结构的无线传感器网络混合调度 MAC 协议——CBPMAC/TFC(A Cluster-based Wireless Sensor Network MAC Protocol for the System with Burst and Periodic Signals/ Based on TDMA,FDMA,CSMA/CA)。簇间采用 FDMA 机制,各簇可并行工作。簇内采用 TDMA 和 CSMA 的混合调度机制,将工作间隙分为周期信号时隙和突发信号时隙。在周期信号时隙内,当前时隙的节点发送周期信号,其它节点睡眠;在突发信号时隙内,各节点按照 CSMA 的调度机制共享信道。针对协议的同步要求,提出了以簇头为基准的相对时间同步机制,给出了基于能量阈值的簇头轮换策略和基于侦听的故障处理策略。理论分析和实验结果表明,该协议在能量有效性、实时性、可靠性方面满足了系统的应用要求。文章后续章节的内容安排如下:

^{*}基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA09Z115)。刘兰军 博士研究生;张晓彤 副教授,博士;王沁 教授,博士生导师,博士;李磊 博士研究生。

第2节介绍 CBPMAC/TFC 协议所适用网络的网络拓扑;第3节详细介绍 CBPMAC/TFC 协议的实现机制;第4节给出协议的性能分析和实验测试结果;最后进行了总结。

2 CBPMAC/TFC 协议所适用的网络拓扑

CBPMAC/TFC 协议针对基于分簇结构的层次型网络拓扑结构^[6]提出。如图1所示,这是一个两级簇的网络拓扑:汇聚节点是整个系统的一级簇头,它跟各个二级簇头节点构成系统的一级簇;各个二级簇头节点跟各自的子节点构成系统的各个二级簇。汇聚节点布置在监控室内,由稳定的电源供电,是一个带有无线通信装置和有线通信装置的网关设备,有线通信装置是异步串口或网络接口。簇头节点在硬件结构上跟普通传感器节点相同,只是存在功能和工作制式的差异:在功能上,簇头节点是簇的管理者,负责维护节点的工作时隙、监测节点的工作状态、接收并转发子节点的数据;在工作制式上,为了随时接收并转发子节点的数据,空闲时段簇头节点一直在监听状态。因此,簇头节点的功耗比普通传感器节点要大。考虑到网络的均衡性,在 CBPMAC/TFC 协议中采用了簇头轮换的策略。普通传感器节点负责数据的采集,在簇头节点的管理下,交替地工作在睡眠、监听、发送、接收等工作状态。

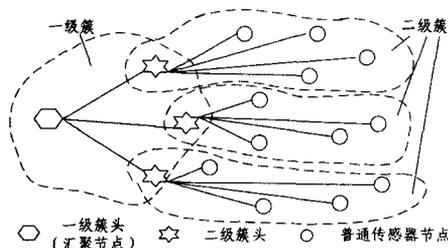


图1 基于分簇结构的层次型网络拓扑

3 CBPMAC/TFC 协议的实现机制

CBPMAC/TFC 协议是结合 TDMA, FDMA, CSMA 提出的一个基于分簇结构的混合调度方案,其实现机制包括:基于簇头频道切换的 FDMA 机制、基于 TDMA 和 CSMA 的联合调度机制、以簇头为基准的相对时间同步机制、基于能量阈值的簇头轮换机制、基于邻居侦听的故障处理策略。本节将分别详述各个实现机制。

3.1 基于簇头频道切换的 FDMA 机制

与基于簇的层次型网络拓扑结构相对应, CBPMAC/TFC 簇间采用基于簇头频道切换的 FDMA 机制。图2所示是一个具有 m 个簇的两层网络的频道分配情况,系统频道分配过程包括两个阶段:系统同步阶段和系统工作阶段。1) 系统同步阶段,在系统汇聚节点、各级簇头的管理下,通过簇头的频道切换(自上而下)实现网络的分级同步:在一级簇同步阶段,所有的二级簇头节点置为汇聚节点的频道,接收来自汇聚节点的同步信号;在二级簇同步阶段,簇头分别将频道切换到本簇的频道,向簇内节点广播同步消息,实现二级簇的同步。对于一个具有 n 级簇的网络,依此类推。2) 系统工作阶段,通过簇头节点在本簇频道和上级簇频道之间的频道切换(自下而上),实现各级簇之间的数据交换。本文采用的基于簇头频道切换的 FDMA 机制,是一个同构的机制,适合多级簇网络的网络扩展。

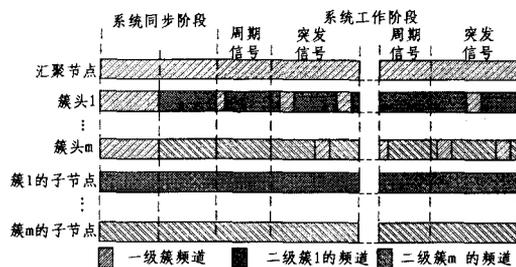


图2 基于簇头频道切换的 FDMA 机制

3.2 基于 TDMA 和 CSMA 的联合调度机制

考虑到周期信号的确定性和突发信号的随机性, CBPMAC/TFC 簇内采用基于 TDMA 和 CSMA 的联合调度机制。一个具有 n 个节点的簇的调度机制如图3所示:1) 簇头节点除了在固定的时隙内发送本簇的周期信号(融合后),其余时间均工作在监听状态,实时接收来自簇内子节点的信息。2) 簇内子节点按照各自的工作时隙,交替地工作在周期信号处理阶段和突发信号处理阶段。在周期信号处理阶段,处于当前工作时隙的节点采集周期信号并发送给簇头节点,若本节点有未发给簇头的历史突发信号信息,同时发送给簇头节点,未处于当前工作时隙的节点进入睡眠状态,各节点在该阶段均不发送当前突发信号的信息;在突发信号处理阶段,各节点均工作在监听状态,按照 CSMA 的调度机制共享簇内信道,发送突发信号。

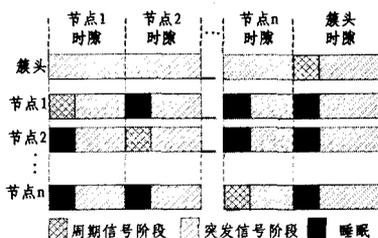


图3 基于 TDMA 和 CSMA 的联合调度机制

3.3 以簇头为基准的相对时间同步机制

如图3所示,簇头及簇内的传感器节点是按照一个固定分配的同步时隙工作的,同步时隙是各个节点根据同步时刻、工作时隙、采样周期各自维护的。由于节点之间时钟的漂移,随着工作时间的累积,节点之间的工作时隙将发生交叠,从而导致数据碰撞。因此,保持簇内节点工作时隙的同步是 CBPMAC/TFC 的关键。同时,分析后发现,各个节点工作时隙的同步只要达到相对同步即可,因此 CBPMAC/TFC 采用了以簇头为基准的相对时间同步机制。具体描述为三个策略:初始同步策略、以簇头为基准的时钟自校准策略、时钟漂移容错策略。

1) 初始同步策略。主要解决系统的初始同步问题,采用簇头广播和簇内侦听相结合的方法。首先,一级簇头广播同步消息,完成一级簇的同步。然后,二级簇头(一级簇的子节点)在收到同步消息后,在各自簇内广播同步消息,完成二级簇的同步;依次类推。由于通信的不确定性,在各簇内会存在收不到同步消息的节点,这类节点可以通过侦听簇内已同步的邻居节点的周期性消息包来完成同步。从3.5节的分析可知,该策略可以保证100%的系统初始同步概率。

2) 以簇头为基准的时钟自校准策略,主要解决由于时钟漂移等因素导致的时隙交叠问题,基本思想是:以簇头的时钟

为基准,实时调整簇内子节点跟簇头的时钟差异,以达到簇内节点时钟的相对同步。具体的实现方法如下:

① 簇头节点为簇内各个传感器节点维护一个期望的工作时隙。

② 簇内各个传感器节点各自分别维护一个实际的工作时隙。

③ 簇内传感器节点在发送周期信号数据包给簇头节点时,将发送起始时刻的时标 T_S 一起发给簇头节点。

④ 簇头节点在收到传感器节点的周期信号数据包时,记录本地开始接收时刻的时标 T_R ,然后计算本地时标 T_R 和接收到的传感器节点的时标 T_S 的差的绝对值 $T_D = |T_R - T_S|$,设定一个偏差阈值 T_K ,当 $T_D \geq T_K/2$ 时,以簇头时钟为基准,计算出传感器节点的时钟调整量,并通过发送给传感器节点的确认包将该调整量发送给相应的传感器节点。考虑到传感器节点传输数据信息要比执行计算更消耗电能,该判断阈值的方法比直接将时钟偏差传送给传感器节点的方法要节省能耗。

⑤ 传感器节点收到簇头的时钟调整量后,将在下一轮采样周期中调整自己的工作时隙。

3) 时钟漂移容错策略。由前面的分析可以看出,本协议采用的时钟同步方法是一种后同步方法,即当时钟偏差出现以后才进行调整,是一种有差调节。为了防止突发信号、周期信号以及不同传感器节点在固有时间偏差中的冲突,本协议采用了如图 4 所示的时钟漂移容错策略:通过在周期信号访问时段、突发信号访问时段以及不同节点的工作时隙之间加保护时间来实现。这种方法的优点是使系统对时钟漂移有了一定的容错能力,减少了数据碰撞,从而减少了系统能耗,缺点是损失了一定的突发信号响应实时性。



图 4 时钟漂移容错策略

3.4 基于能量阈值的簇头轮换机制

在图 1 所示的基于分簇结构的网络中,簇头的能量消耗比普通传感器节点要大,考虑到网络的均衡性,CBPMAC/TFC 采用了基于能量阈值的簇头轮换策略^[7,8],根据簇内传感器节点的能量剩余情况,选举剩余能量较大的传感器节点担任簇头。具体实现如下:

设新簇头的初始能量值为 P_S ,担当 n 轮簇头后剩余的的能量值为 P_R ,于是能量消耗为 $P_D = P_S - P_R$ 。设定一个阈值 P_K ,当 $P_D \geq P_K$,即 $P_R \leq P_S - P_K$ 时,当前簇头须进行簇头轮换。当前簇头节点根据其子节点上一轮发送数据包中的节点剩余能量信息,选出一个剩余能量值最高的传感器节点,将其确认为下一轮的簇头节点,并在本轮发送给各传感器节点的数据确认消息中稍带上簇头轮换消息(新簇头的 ID 号)。本簇所有的传感器节点都接收簇头轮换消息,从而获知新一轮的新簇头节点 ID 号。接收到簇头轮换消息后,未被选中的节点只是记录新簇头的 ID 号,被选中的新簇头节点要给原簇头发送确认信息并接收原簇头的簇内管理信息。至此,新一轮的簇头节点选举完成。如果符合新簇头选举条件的节点有多个,则由当前簇头根据节点号的大小选举一个作为新簇头,例如节点号小的优先。

3.5 基于邻居侦听的故障处理策略

故障处理策略属于协议容错性、可靠性的范畴,其性能好坏关系到协议的整体性能。基于分簇结构的层次性网络的故障主要体现在传感器节点故障和簇头节点故障两个方面,CBPMAC/TFC 采用基于邻居侦听的故障处理策略,由于簇头节点和普通传感器节点在网络中的地位不同。对其故障处理也略有不同,具体实现如下:

1) 簇头节点的故障处理。簇头节点是基于簇的层次性网络的骨干节点,负责时隙的维护、簇间的连通、簇头的轮换,一旦出现故障,将使整个簇乃至该簇以下的网络处于瘫痪状态。考虑到其位置的重要性,采用冗余簇头侦听策略来处理其故障。冗余簇头工作在低功耗侦听状态,接收当前簇头的时隙维护、簇头轮换等信息。当冗余簇头在某一轮采样时间内未收到当前簇头的任何信息时,则认为当前簇头出现故障,取而代之,并将故障信息通知上级簇头节点,通过分级传输,最终将故障信息通知到控制中心,簇头节点更新后,冗余簇头节点根据上级簇头节点的更新命令,实现新簇头节点的重新配置,然后进入低功耗侦听状态(此时,若需要,可更换冗余簇头节点的电源)。

2) 传感器节点的故障处理。当簇头节点在连续三轮采样周期内没有收到簇内某个传感器节点的周期性信号时,则给出该传感器节点失效的判断,并通知上一级簇头节点,通过分级传输,最终将故障信息通知到控制中心。此时,网络维护人员可采用一个新节点替换故障节点,新节点加入后首先处于侦听状态。由于簇内各个传感器节点发给簇头的周期性信号数据包、簇头给各个周期性信号数据包的应答数据包中包含着节点工作时隙信息,新节点可以通过监听这些数据包来计算分配自己的工作时隙。因此,新节点加入当前簇的途径有两个:

① 侦听簇内其他传感器节点发给簇头的周期性信号数据包;

② 侦听簇头发给各个传感器节点的周期性信号数据包的确认包。

新节点成功加入当前簇的概率分析如下:

假设簇内共有节点数量为 n ,故障节点的 ID 号为 q ,从新节点加入的时刻开始,将簇内带工作时隙的数据包按照出现先后进行排列,表示为 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_k, \dots\}$,其中, D_k 为 ①、②所述两种数据包中的一种。

定义 A、B 事件如下:

A: 新节点接收到 ①、②所述两种数据包中的一种;

B: 新节点接收到的信息是正确的。

设 $P_i(AB)$ 表示新节点接收到 i 号节点发送的周期性数据包或簇头发给 i 号节点的周期性信号的确认包后能够成功加入簇的概率,则

$$P_i(AB) = P_i(B|A) \cdot P_i(A), \quad (i=1, 2, \dots, q-1, q+1, \dots, n) \quad (1)$$

因此,新节点根据 D_1 成功加入簇的概率为

$$P_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq q}^n P_i(AB) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq q}^n P_i(B|A) \cdot P_i(A) \quad (2)$$

因此,新节点根据 D_k 成功加入簇的概率为

$$P_k = (1 - P_1)^{(k-1)} \cdot P_1 \quad (k=1, 2, \dots) \quad (3)$$

因此,新节点根据队列 D 成功加入当前簇的概率为

$$P = \sum_{i=1}^k P_i = \sum_{i=1}^k [(1 - P_1)^{(i-1)} \cdot P_1] = 1 - (1 - P_1)^k \quad (4)$$

通过实验得出 $P_i(B|A) \approx 98\%$, $P_i(A) \approx 99\%$, 由式(2)可得 $P_i \approx 97\%$, 根据式(4), 当 $k \rightarrow +\infty$ 时, $P \rightarrow 1$ 。此结果表明, 新节点通过侦听①、②所述的数据包成功加入当前簇的概率趋近于 100%。

4 性能分析与测试

4.1 以簇头为基准的相对时间同步机制的性能测试

以簇头为基准的相对时间同步机制的测试条件为: 网络规模是 1 个簇头、4 个传感器节点; 节点的晶振频率为 32.768kHz, 精度为 10ppm; 时钟偏差调节阈值为 40ms。图 5 所示是测试结果, 其中(a)是没有时间同步机制的时钟漂移结果, (b)是具有时间同步机制的时钟漂移结果。从图中可以看出, 时间同步机制有效地抑制了节点跟簇头之间的时钟差异, 限制在 $\pm 30\text{ms}$ 的范围内。

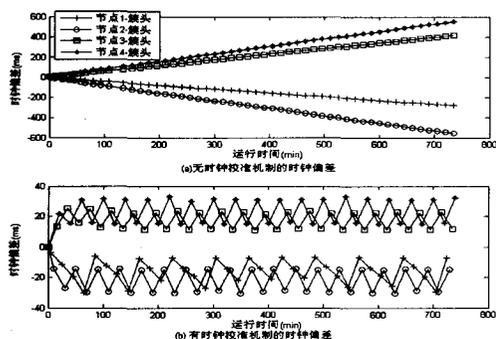


图 5 以簇头为基准的相对时间同步机制测试结果

4.2 CBPMAC/TFC 协议的性能分析与测试

CBPMAC/TFC 协议与单纯基于 TDMA 调度的协议相比: 1) 能够更好地保证突发信号的响应实时性。在 TDMA 协议中, 突发信号的发送要按照分配的固定时隙进行; 而 CBPMAC/TFC 协议中, 突发信号的发送是在突发信号发送时隙内通过 CSMA 调度机制共享信道, 信号响应的实时性较好。2) 具有更大的网络容量。在 TDMA 协议中, 时隙分配要同时考虑周期信号和突发信号, 分配时隙多, 可容纳节点少; 而 CBPMAC/TFC 协议中, 时隙分配只须考虑周期信号, 突发信号共享时隙, 分配时隙少, 可容纳节点多。3) 能量消耗较大。在 CBPMAC/TFC 协议中, 在突发信号工作时隙中, 节点工作在侦听模式, 比 TDMA 协议的睡眠模式能耗要大。

CBPMAC/TFC 协议与单纯基于 CSMA 调度的协议相比: 1) 网络能耗较小。CBPMAC/TFC 协议考虑到周期信号的确定性, 为周期信号发送分配固定的时隙, 在该时隙内防止了突发信号和周期信号的冲突, 同时信号的发送省去了 CSMA 的 RTS、CTS 握手信号, 减少了节点的能耗。2) 网络扩展性较差。由于采用了 TDMA 调度机制, 网络扩展性不如单纯的 CSMA。3) 损失了一定的突发信号响应实时性。由于在周期信号发送期间, 突发信号得不到响应, 因此突发信号的实时性有一定的损失。

总而言之, CBPMAC/TFC 协议是针对周期信号和突发信号并存的应用场景提出的一个折中策略, 能够同时满足系统的能量有效性和响应实时性要求。

图 6 所示是 CBPMAC/TFC、TDMA、CSMA 三种协议的传感器节点能量消耗对比情况。可见, CBPMAC/TFC 协议的能量消耗介于 TDMA 和 CSMA 之间。与 CSMA 相比, 节省能耗 18.7%; 与 TDMA 相比, 损失能耗 23.6%。测试条件

为: 1) 周期信号的发送周期为 30s, 发送时间为 300ms, 等待时间为 300ms, 最多重传 3 次, 周期信号工作时隙为 5s; 2) 突发信号的响应时间为 5s, 发送时间为 300ms, RTS、CTS 包发送时间为 100ms; 3) CSMA 的侦听周期是 1s, 侦听占空比 1/50; 4) 传感器节点基于 ATmega128L, CC1100 开发, 各个工作状态的工作电流如表 1 所示。

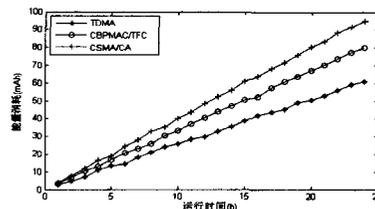


图 6 CBPMAC/TFC、TDMA、CSMA 三种协议的能量消耗情况

表 1 不同工作状态的工作电流情况

睡眠状态	空闲状态	数据发送状态	数据接收状态
40 μA	8mA	36.7mA	23.6mA

图 7 所示是 CBPMAC/TFC、TDMA、CSMA 三种协议的信号响应实时性对比情况。 P_K ($K=1, 2$) 表示节点 K 的周期信号响应时隙, B_K ($K=1, 2, 3, 4$) 表示节点 K 的突发信号响应时隙, SP 表示周期信号, SB 表示突发信号, SP 和 SB 下面的数字表示节点号。从图中可以看出, CBPMAC/TFC 协议对突发信号的响应实时性介于 TDMA 和 CSMA 之间, 同时 CBPMAC/TFC 防止了周期信号和突发信号的冲突判决。

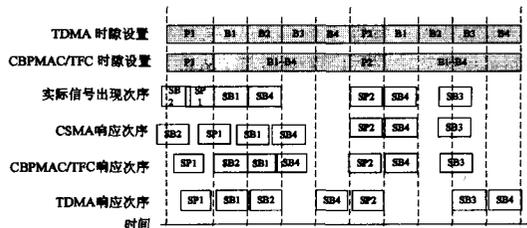


图 7 CBPMAC/TFC、TDMA、CSMA 三种协议的信号响应实时性对比

结束语 针对突发信号和周期信号并存的应用场景, 提出了一种基于分簇结构的 TDMA, FDMA, CSMA 相结合的无线传感器网络 MAC 协议——CBPMAC/TFC, 给出了实现机制: 基于簇头频道切换的 FDMA 机制、基于 TDMA 和 CSMA/CA 的联合调度机制、以簇头为基准的相对时间同步机制、基于能量阈值的簇头轮换机制和基于邻居侦听的故障处理策略。分析和测试结果表明, 该协议是一个同时满足能量有效性和响应实时性的折中方案, 有效解决了周期信号和突发信号并存系统的数据碰撞问题, 减少了能量消耗, 延长了网络生存周期。

参考文献

- [1] Zhao J, Erdogan A T. A novel self-organizing hybrid network protocol for wireless sensor networks[C] // First NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems. Istanbul, Turkey: IEEE Comput. Soc, 2006: 412-419
- [2] Arisha K A, Youssef M A, Younis M Y. Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks[J]. Computer Networks Journal, 2003, 43(5): 539-694
- [3] Guo C, Zhong L, Rabaey J M. Low-power distributed MAC for

- ad hoc sensor radio networks[C]//Proc. Internet Performance Symp IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom'01). San Antonio, TX, USA;IEEE, 2001;2944-2948
- [4] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for self-organization of a wireless sensor network[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(5): 16-27
- [5] Mao Jianlin, Wu Xing, Wu Zhiming, et al. A novel energy-aware TDMA scheduling algorithm for wireless sensor networks[C]//First International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications (WASA2006). Xi'an, China; Springer-Verlag, 2006; 319-328
- [6] Fan Yong, Zhang Xiaotong, Duan Shihong, et al. Energy Consumption Distribution-aware Node Placement in Wireless Sensor Networks (WSNs) [C] // 2006 International Conference on Wireless Communications, Networking, and Mobile Computing. Wuhan, China; IEEE Comput. Soc, 2007; 4145-4149
- [7] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, Oct. 2002; 660-670
- [8] Santi P, Simon J. Silence is golden with high probability: maintaining a connected backbone in wireless sensor networks[C]//First European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004). Berlin, Germany; Springer-Verlag, 2004; 106-121
-
- (上接第 38 页)
- [25] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A Scalable Content-Addressable Network//Proceedings of the ACM SIGCOMM. 2001; 168-175
- [26] Maymounkov P, Mazières D. Kademlia: A peer-to-peer information system based on the XOR metric//Proceedings of IPTPS' 2002. Mar. 2002; 53-65
- [27] Malkhi D, Naor M, Ratajczak D. Viceroy: A scalable and dynamic lookup network//Proceedings of the ACM PODC 2002. ACM Press, 2002; 183-192
- [28] Xu J, Kumar A, Yu X X. On the fundamental tradeoffs between routing table size and network diameter in peer-to-peer networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), 2004, 22(1)
- [29] Harvey N J, Jones M B, Saroiu S, et al. Skipnet: A scalable overlay network with practical locality properties//Proceedings of USITS' 2003. Mar. 2003; 113-126
- [30] Aberer K, Mauroux P C, Datta A, et al. P-Grid: A Self-organizing Structured P2P System // Proceedings of the ACM SIGMOD2003. ACM Press, 2003; 29-33
- [31] Jagadish H V, Ooi B C, Vu Q H. BATON: A Balanced Tree Structure for Peer-to-Peer Networks//Proceedings of the 31st VLDB Conference. 2005; 661-672
- [32] Kaashoek F, Karger D R. Koorde: A Simple Degree-optimal Hash Table//Proceedings of the IPTPS2003. Feb. 2003
- [33] Fraigniaud P, Gauron P. An overview of the content-addressable networks D2B//Proceedings of the ACM PODC 2003. 2003
- [34] Loguinov D, Kumar A, Rai V, et al. Graph Theoretic Analysis of Structured Peer-to-Peer Systems; Routing Distances and Fault Resilience//Proceedings of the ACM SIGCOMM2003, 2003
- [35] Shen H, Xu C, Chen G. Cycloid: A constant degree and lookup-efficient p2p overlay network//Proceedings of the IPDPS 2004. Santa Fe, New Mexico, Apr. 2004
- [36] Li D S, Lu X C, Wu J. FISSIONE: a scalable constant degree and low congestion DHT scheme based on Kautz graphs//Proceedings of the IEEE INFOCOM2005. 2005
- [37] Ratnasamy S, Shenker S, Stoica I. Routing Algorithms for DHTs: Some Open Questions//Proceedings of the 1st International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS'02). 2002
- [38] Xu J, Kumar A, Yu X X. On the fundamental tradeoffs between routing table size and network diameter in peer-to-peer networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), 2004, 22(1)
- [39] Gummadi K, Gummadi R, Gribble S, et al. The impact of DHT routing geometry on resilience and proximity // Proceedings of ACM SIGCOMM2003. Karlsruhe, Germany. Sep. 2003; 381-394
- [40] Naor M, Wieder U. A Simple Fault Tolerant Distributed Hash Table//Proceedings of the IPTPS2003. Feb. 2003
- [41] Skype. <http://www.skype.com/>.
- [42] Rhea S, Geels D, Roscoe T, et al. Handling churn in a DHT//Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference 2004. Boston, USA, 2004
- [43] Li Jinyang, Stribling J, Morris R, et al. Bandwidth-efficient management of DHT routing tables // The Proceedings of the 2nd Symposium on Networked System Design and Implementation (NSDI'05). May 2005
- [44] Aberer K, Mauroux P C, Datta A, et al. P-Grid: A Self-organizing Structured P2P System // Proceedings of the ACM SIGMOD2003. ACM Press, 2003; 29-33
- [45] Zhu Y, Hu Y. Efficient. Proximity-aware load balancing for DHT-based P2P systems[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(4): 349-361
- [46] Manku G S. Canada Balanced binary trees for ID management and load balance in distributed hash tables//Proceedings of the twenty-third annual ACM symposium on principles of distributed computing. New York, NY, USA, 2004
- [47] Mitzenmacher M. The Power of Two Choices in Randomized Load Balancing. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(10): 1094-1104
- [48] Dabek F, Kaashoek M F, Karger D, et al. Wide-Area Cooperative Storage with CFS//Proc. 18th ACM Symp. Operating Systems Principles (SOSP). Oct. 2001; 202-215
- [49] Rao A, Lakshminarayanan K, Surana S, et al. Load Balancing in Structured P2P Systems//Proc. Second Int'l Workshop Peer-to-Peer Systems (IPTPS). Feb. 2003; 68-79
- [50] Godfrey B, Lakshminarayanan K, Surana S, et al. Load Balancing in Dynamic Structured P2P Systems//Proc. IEEE INFOCOM. Mar. 2004
- [51] Byers J W, Considine J, Mitzenmacher M. Simple Load Balancing for Distributed Hash Tables // Proc. Second Int'l Workshop Peer-to-Peer Systems (IPTPS). Feb. 2003; 80-87
- [52] Karger D R, Ruhl M. Simple Efficient Load Balancing Algorithms for Peer-to-Peer Systems // Proc. Third Int'l Workshop Peer-to-Peer Systems (IPTPS). Feb. 2004