

一种由接收端发起的无线传感器网络 MAC 协议

马礼¹ 高洪磊¹ 马东超¹ 邱庆媛²

(1. 北方工业大学计算机学院, 北京, 100144; 2. 兰州石化自动化研究院, 兰州, 730060)

摘要: 在无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSN)中, 现有的基于接收节点发起的异步 MAC 层协议, 在计算接收节点唤醒时刻时, 多采用维持邻居节点的伪随机唤醒时间表的方法。在网络动态负载条件下, 此方法不能动态地改变节点唤醒间隔, 从而带来较高的数据传输冲突率及较大的数据传输延时。为了解决此问题, 本文提出一种新协议 HELD-MAC(High energy efficiency and low delay MAC), 保证节点之间具有不同的唤醒时间, 同时能够准确预测接收端唤醒时刻, 而且接收端可以根据网络负载情况动态改变唤醒间隔。同时为了减轻能量黑洞问题, 协议根据节点的剩余能量, 自适应地改变节点的最小唤醒间隔。通过仿真对 HELD-MAC 进行评估, 与 RI-MAC, PW-MAC 等对比, 在数据传输延时、能量消耗、网络吞吐量和传输碰撞方面具有较大优势。

关键词: 无线传感器网络; 自适应; 接收端; 异步

中图分类号: TP393; TN971; TN95 **文献标志码:** A

New MAC Protocol for Wireless Sensor Network Initiated by Receiver

Ma Li¹, Gao Honglei¹, Ma Dongchao¹, Qiu Qingyuan²

(1. Computer College, North China University of Technology, Beijing, 100144, China; 2. Automation Institute of Lanzhou Petrochemical Company, Lanzhou, 730060, China)

Abstract: In wireless sensor networks (WSN), the existing receiver-initiated MAC protocol based on asynchronous duty cycling, is almost using pseudo-random wakeup schedule of neighbor nodes, in predicting the receiving node wakeup time. In dynamic load conditions in the network, this method cannot change the wakeup interval of node dynamically, thus leading to higher data conflict rates while transmitting and larger data transmission delay. To solve this problem, the paper presents high energy efficiency and low delay MAC (HELD-MAC), a new protocol that can ensure a different wakeup time between the nodes and predicate the wakeup time of receiving node accurately. The protocol can change the wakeup interval of node dynamically according to the load conditions. Meanwhile, in order to alleviate the problem of energy hole, the protocol can adaptively change the lowest node wakeup interval according to the residual energy of the node. The simulation show that, the HELD-MAC protocol has obvious advantages in the performance of data transmission delay, power consumption, network throughput and transmission collision, compared with RI-MAC and PW-MAC protocols.

Key words: wireless sensor networks (WSN); adaptivity; receiver; asynchronous

引 言

无线传感器网络(Wireless sensor networks, WSN)是一种多跳的无固定基础设施的自组网络^[1]。WSN中资源受限表现为传感器节点有着固定的能量,较短的通信范围,较小的带宽,受限于计算和存储能力^[2]。目前,睡眠-唤醒策略是传感器网络节点常采用节省能量的方法,即在有数据传送时打开射频模块传送数据,传输结束后关掉射频以节约电量,若节点空闲,即不传输数据时,定期不间断唤起侦听信道,侦测信道是否有数据在传输。若节点传输数据冲突,则需竞争对接信道,否则会产生更多电量消耗。因此从节省能耗和延长传感器网络生存周期角度,MAC层具有重要的意义,因为MAC层协议影响着WSN中消耗能量的主要来源。现有采用唤醒/休眠机制的MAC层协议有两类:同步和异步MAC层协议。同步MAC层协议主要有S-MAC^[3],AS-MAC^[4]等,通过同步虚拟簇内节点的唤醒/睡眠时间以减少节点能量消耗。然而这类协议在传送数据之前的时间同步会带来不容忽视的能量消耗^[5],同时在网络负载多变化的情况下,固定的唤醒和休眠时间使其不适合。

相反,异步协议不要求虚拟簇内节点间的时间同步,各个节点可以维持独立的唤醒/休眠时间。异步MAC层协议又分为发送端发起的MAC协议(X-MAC^[6],AS-MAC^[7])和接收端发起的MAC协议(RI-MAC^[8],PW-MAC^[9])。发送端发起的协议是在发送有效数据前,传输一定长的前导码以通知邻居节点前导码后面跟着有效数据包,其中前导码的长度必须大于一个射频检测周期,只有这样邻居节点在检测信道状态时间内才能够检测到前导码。首先,发送较长的前导码肯定会带来大量额外能量开销^[10],其次非目的节点接收前导码会带来较大的串音能量开销。相反基于接收端发起的协议将发送前导码替换为接收节点广播唤醒信标帧,其中唤醒信标帧长度远小于前导码的长度,因此无线信道带宽占用和冲突概率相对降低很多。当发送端监听到信标帧之后开始传输数据。

在异步MAC协议中,如WiseMAC^[11],PB-MAC^[12],PW-MAC和BS-MAC^[13],发送端通过预估接收端唤醒时刻,在接收端唤醒时刻发送数据包。但是这些协议不能根据网络流量情况自适应唤醒间隔,WiseMAC节点之间必须有相同的、固定的唤醒时间间隔。PW-MAC中节点和邻居传感器节点共享随机种子,用来推测对方的伪随机数,从而预估相邻节点的唤醒时刻,因此每个节点的后续唤醒间隔都是固定预知的。所以当网络负载突然增加时,节点不能自适应地改变唤醒间隔,肯定会带来较大的传输数据延时和较高的传送数据冲突概率。

在分析和研究节点唤醒机制的基础上,本文设计了一种新的能量高效、数据传输时延低的基于接收端发起的异步MAC层协议。节点之间具有相互独立唤醒/休眠时间,节点在能够准确预测邻居节点唤醒时间的同时,能够保证邻居节点之间具有不同的唤醒时间,从而保证了节点在不同时间唤醒传送数据,避免了节点在同一时间唤醒带来的数据传输冲突。协议能够根据网络负载动态地、自适应地改变唤醒间隔,同时保证邻居节点仍可以准确计算邻居节点的唤醒时刻。

1 HELD-MAC 协议

HELD-MAC协议主要包括以下几个环节。(1)新节点加入网络阶段。根据相邻节点唤起时刻选择偏移值,保证与相邻节点有不同的唤起时刻。(2)预测接收节点唤醒时间。当发送端有数据传送时,根据预测到的接收端唤醒时间提前 T_{cd} 时刻唤醒,以等待接收唤醒信标帧。(3)根据节点剩余能量比率 V_{st} ,自适应地改变节点最小唤醒时间。(4)根据等待传输的数据包数量等级 ρ_{wait} 自适应改变节点的唤醒时间间隔。(5)HELD-MAC协议传输冲突检测和数据重传机制。图1为HELD-MAC协议工作过程。

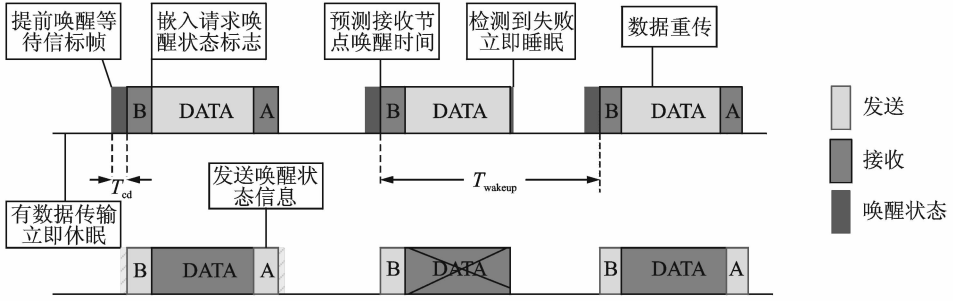


图 1 HELD-MAC 协议工作过程

Fig.1 Working process of HELD-MAC

1.1 节点加入网络初始化阶段

新节点加入网络初始阶段,持续监听 T_{init_wakeup} 时长,其中 T_{init_wakeup} 为节点初始最大唤醒间隔。监听过程中,当收到相邻点传输的 Beacon 帧时,发送带有请求节点唤醒状态标志位的空数据帧,当发送节点接收到带有标志位的状态请求数据帧时,在发送 ACK 帧中嵌入节点的唤醒间隔 T_{wakeup} ,节点最近的唤醒时刻 T_{last} ,节点当前时刻 T_{cur} 。在持续监听时间内,新节点将收到相邻节点发送的 ACK 帧。监听结束后,新节点将维护相邻节点唤醒时刻表,用于记录节点唤醒时刻偏移值 $O_w(i)$ 。由于节点存在时钟偏差,将邻居节点最近一次唤醒时间 $T_{last}(i)$ 与 $T_{diff}(i)$ 相加作为邻居节点的 $O_w(i)$,其中 $T_{diff}(i)$ 为新节点接收到邻居节点的 ACK 帧时刻 $T_{loc}(i)$ 与 ACK 帧中节点当前时间 $T_{cur}(i)$ 的差值,即 $T_{diff}(i) = T_{loc}(i) - T_{cur}(i)$ 。然后新节点依据相邻节点的 $O_w(i)$ 确定其唤醒时刻偏移值 O_w 。 O_w 由式(1)给出

$$O_w = O_w(i) + \left\lfloor \frac{\max[t(i,j)]}{\lambda} + 0.5 \right\rfloor \quad (1)$$

其中 $\lambda \neq 2^{\sigma}, \sigma \in N^+$; $t(i,j)$ 是 i, j 两节点唤醒时间差值,两个节点唤醒时间必须在所有节点中唤醒间隔最短的时间内,图 2 中 $[t_{A2}, t_{A1}]$ (因为 $[t_{A2}, t_{A1}] < [t_{B2}, t_{B1}]$)。 $\max[t(i,j)]$ 代表邻居节点唤醒时间差值中最大时间差,图 2 中 $t(B,A)$ (因为 $t(B,A) > t(A,B)$)。如果仅有唯一的邻居节点,则 $\max[t(i,j)]$ 为节点的 $T_{wakeup}(i)$ 。 $O_w(i)$ 是 $\max[t(i,j)]$ 中某个节点的唤醒偏移值,如图 2 中的 $O_w(B)$ 。 λ 是偏移因子,其值的选取会影响到邻居节点之间是否具有不同的唤醒时间。下节将描述节点根据 ρ_{wait} 自适应改变节点唤醒间隔,其中唤醒间隔是按 2^{σ} 倍增加或者减少,为保证唤醒间隔改变之后节点仍然具有不同唤醒时间, λ 必须选取符合条件 ($\lambda \neq 2^{\sigma}, \sigma \in N^+$) 的整数,在协议中让 $\lambda = 3$ 。新节点唤醒状态请求过程如图 1 所示。

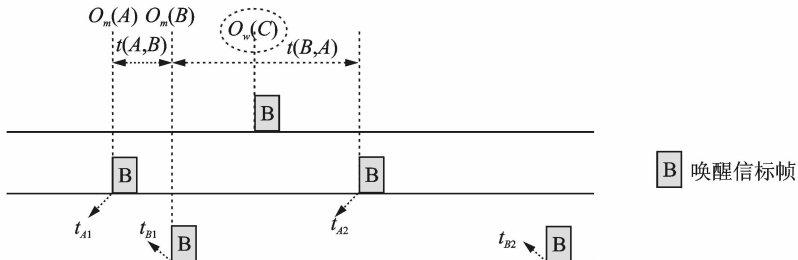


图 2 新节点初始化阶段

Fig.2 Initialization phase of new Node

1.2 预测接收节点唤醒时间

HELD-MAC 能够准确预测到接收端唤醒时刻,有效地减弱空闲侦听带来的电量消耗。当节点 t_c 时刻有数据发送时,首先查询唤醒时间表中对应的接收节点信息,根据式(2)预测目的节点唤醒时间。

$$t_{\text{remain}}(i) = T_{\text{wakeup}}(i) - (t_c - O_w(i)) \% T_{\text{wakeup}}(i) \quad (2)$$

式中 $t_{\text{remain}}(i)$ 代表接收端下次唤醒时刻剩余时间, $T_{\text{wakeup}}(i)$ 代表节点唤醒间隔, t_c 为发送端当前时间, $O_w(i)$ 是接收节点的唤醒偏移值。接收节点因为时钟漂移带来的时间偏差为

$$T_{\text{cd}} = (T_{\text{cur}} - T_{\text{last}}) \cdot \theta \quad (3)$$

$$T_{\text{cur}} = T_c - T_{\text{diff}} \quad (4)$$

式中 θ 为时钟频率偏差, T_{cur} 为接收节点当前时间, T_{last} 为节点初始化阶段接收节点的最近一次唤醒时间, T_c 为发送节点当前时间, T_{diff} 为两节点时钟偏差。

当源节点有数据传送时立即转入休眠状态,在接收端下次唤醒时刻提前 T_{cd} 唤醒来等候接收端 Beacon 帧,如图 1 所示。协议只考虑节点由于时钟漂移带来的提前量,而不考虑滞后,是为了确保发送节点能在接收节点被唤醒之前已经进入空闲侦听状态。

文献[9]在 MICAz 节点中实验证明:时钟漂移并不是造成预测唤醒时间误差的唯一因素,操作系统和硬件延迟都会带来明显的预测误差。为有效解决此问题,HELD-MAC 协议引入预测误差阈值。当接收节点实际唤醒时间与发送节点预测的唤醒时间差值大于误差阈值 $E_{\text{threshold}}$ 时,节点根据初始化阶段方法重新请求接收节点唤醒时间信息。确定接收节点 $O_w(i)$ 后,更新邻居节点唤起时刻表中此节点的唤醒时刻。当请求节点再有数据发送时,会利用新值计算节点的唤醒时间,从而有效解决了节点过早提前唤醒带来额外的空闲侦听。

1.3 节点自适应改变最小唤醒间隔

靠近 sink 的节点由于要转发更多的数据,其能量消耗较快。能量消耗的不平衡导致了 sink 周围产生能量洞^[14],HELD-MAC 协议允许节点唤醒时间间隔在 $[T_{\text{min}}, T_{\text{init_wakeup}}]$ 间根据网络负载状况自适应地改变唤醒间隔,其中 T_{min} 是节点最小唤醒间隔, $T_{\text{init_wakeup}}$ 是节点初始唤醒间隔。 T_{min} 取决于节点剩下的能量,即节点根据剩余能量比率 V_{st} 自适应地改变最小唤醒间隔。其中 V_{st} 取决于 $\eta_{\text{cur}}, \eta_{\text{cur}}$,由式(5)给出

$$\eta_{\text{cur}} = \frac{E_{\text{cur}}}{E_i} \quad (5)$$

式中: E_{cur} 是节点剩余电能的估计值, E_i 是初始电能值。决定 T_{min} 的节点剩余能量比率 V_{st} 为

$$V_{\text{st}} = \left| \frac{1}{\eta_{\text{cur}}} \right| \quad (6)$$

靠近 sink 端的节点,随着网络层次增加,要传送的数据量逐渐增加。如果某个转发节点由于转发数据量过大而关闭,则此节点的孩子节点将会与网络失去联系。因此随着 η_{cur} 的逐渐减小,相比关注数据传输延时,协议更应该关注节点的能量消耗。根据 V_{st} 的值自适应地改变节点的最小唤醒时间间隔,有

$$T_{\text{min}} = \min(2^{V_{\text{st}}} \cdot T_{\text{MIN}}, T_{\text{init_wakeup}}) \quad (7)$$

式中 T_{MIN} 节点初始最小唤醒间隔。

采用预估值来衡量节点的剩余能量对算法性能不会带来较大的影响,采用文献[15]提到的 First order radio 模型估计节点的剩余能量 E_{cur} 。

1.4 节点自适应改变唤醒间隔

发送节点每当发送出数据之前,检测待传输队列中等候传输的数据包数量。如果除本次传输的数

据包之外有等待传输的数据包,则根据等待数据包的数量 $N_{\text{wait}}(i)$ 计算数据包数量等级 $\rho_{\text{wait}}(i)$ 。如果相比于上一次数量等级发生改变,则将标志位和数据包数量等级嵌入到即将发送的数据帧中,其中标志位用来通知接收节点数据帧中嵌入有改变的包数量等级,数据包数量等级 $\rho_{\text{wait}}(i)$ 由式(8)给出。接收节点动态维持着孩子节点中等待传输数据包数量等级总和 ρ_{wait} ,其中 ρ_{wait} 值越大,代表孩子节点中等待传输的数据包越多。当节点收到带有标志位的数据帧后更新 ρ_{wait} ,当接收的数据包未带有标志位时,则此节点数量等级不变, ρ_{wait} 由式(9)给出。如果 μ 值改变,则接收节点根据此值动态的改变唤醒间隔;若 μ 值未改变,则唤醒间隔保持不变,由式(10~12)给出,即

$$\rho_{\text{wait}}(i) = \begin{cases} 0 & N_{\text{wait}}(i) < n_{\text{threshold1}} \\ 1 & n_{\text{threshold1}} \leq N_{\text{wait}}(i) < \rho_{\text{threshold2}} \\ 2 & n_{\text{threshold2}} \leq N_{\text{wait}}(i) \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_{\text{wait}} = \sum_{i=1}^s \rho_{\text{wait}}(i) \quad (9)$$

$$\mu = \begin{cases} 0 & \rho_{\text{wait}} < \rho_{\text{threshold1}} \\ 1 & \rho_{\text{threshold1}} \leq \rho_{\text{wait}} < \rho_{\text{threshold2}} \\ 2 & \rho_{\text{threshold2}} \leq \rho_{\text{wait}} < \rho_{\text{threshold3}} \\ 3 & \rho_{\text{threshold3}} \leq \rho_{\text{wait}} \end{cases} \quad (10)$$

$$T_{\text{tmp}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\mu} \cdot T_{\text{in_it_wakeup}} \quad (11)$$

$$T_{\text{wakeup}} = \begin{cases} T_{\text{min}} & T_{\text{tmp}} < T_{\text{min}} \\ T_{\text{tmp}} & T_{\text{min}} \leq T_{\text{tmp}} < T_{\text{in_it_wakeup}} \\ T_{\text{in_it_wakeup}} & T_{\text{tmp}} \geq T_{\text{in_it_wakeup}} \end{cases} \quad (12)$$

式中 s 为孩子节点的个数, T_{min} 根据上节中节点剩余能量计算而来。 $N_{\text{wait}}(i)$ 是孩子节点等待传输的数据包个数, μ 是调整因子,其中 μ 值越大,代表孩子节点中等待传输的数据包越多, $n_{\text{threshold}}$ 是发送节点负载因子, $\rho_{\text{threshold}}$ 是接收节点负载因子,其中两个负载因子可根据应用对数据包传输延时容忍度调整,若对传输延时容忍度较大,则可以适当增加其值,相反,可减小其值。

接收端将改变之后的唤醒间隔嵌入到确认帧中,以告知发送端唤醒时间间隔已改变。此时接收节点回复的确认帧有双重功能,首先是确认数据帧成功传输,然后是告知发送节点唤醒间隔已改变。

1.5 冲突检测与数据重传机制

高效的数据重传机制是真实传感器网络中需要考虑的重要方面。网络负载的增加以及多个相邻节点同时传输都会带来数据传输冲突,传输失败需要数据重传。HELD-MAC 协议中,发送节点当需要数据重传时,检测到传输冲突,节点立即切换到睡眠状态,智能地选择何时唤醒重传数据,实现了高效的能量利用。图 1 说明了 HELD-MAC 协议的基于预测的数据重传机制。若发送端 S 接收到的是接收端 R 的唤醒 Beacon 帧而不是 ACK 帧, S 节点会当作数据传输失败或 ACK 帧传输失败。 S 节点立即切换到睡眠模式直到接收端下次唤醒时刻时再重送数据,因此减小了等候接收端唤醒时间,从而减少能量消耗。

如果两个节点同时向某一个节点发送数据,可以利用 RI-MAC 协议中基于接收节点的数据传输冲突解决机制来解决数据传输冲突问题,即当发送节点通过 CCA(Clear channel assessment)检测到传输冲突时,通知发送节点增加随机退避窗口大小后重传数据。

2 仿真验证

2.1 仿真参数

实验采用 NS2 软件对比分析了 PW-MAC, PB-MAC 和 RI-MAC 的性能,采用 MATLAB 辅助分析

实验数据。仿真参数见表 1。在 PW-MAC 协议和 PB-MAC 协议中,为确保节点之间随机种子最大可能不邻近,公式中的参数 a, c, m 一次设为 20, 7, 999。偏移因子 λ 的选取条件见 1.1 节详细描述。

仿真中测量以下指标:(1)平均占空比。节点处于唤醒模式占测试时间的比率。(2)端到端的数据延迟。从节点产生数据或收到数据开始到该数据成功被下一跳节点接收的平均时间。(3)碰撞次数。节点在激活状况下同时接收到两个及更多发送端发送数据的总次数。(4)网络吞吐量。SINK 节点单位时间内接收到的有效数据。

表 1 参数设置

Tab. 1 Parameter setting

参数	值	参数	值
发送能耗/mW	31.2	退避窗口	30
接收能耗/mW	22.2	唤醒间隔/s	0.2~1.6
空闲侦听能耗/mW	22.2	重传次数	5
睡眠功耗/ μ W	3	传输距离/m	200
状态转换功耗/mW	31.2	数据包长度	50 B
节点初始能量/J	1 000	偏移因子 λ	3
$T_{\text{init_wakeup}}$ /s	1.6	$E_{\text{threshold}}$ /ms	20
$n_{\text{threshold1}}$	2	$\rho_{\text{threshold1}}$	6
$n_{\text{threshold2}}$	4	$\rho_{\text{threshold2}}$	2
$\rho_{\text{threshold3}}$	4		

2.2 随机网络评估

在 900 m \times 900 m 内随机安装 49 个 WSN 节点,在中心部署 1 个基站,节点传输距离为 200 m。假设节点间隔 0.8 s 固定时间产生数据报,在某时间段内不出现数据包数量急剧增加的情况。表 2 为 HELD-MAC, PW-MAC, RI-MAC 以及 X-MAC 在平均占空比、端到端延迟和平均碰撞次数指标的对比如。

表 2 随机网络性能对比

Tab. 2 Performance comparison of stochastic network

协议	平均占空比/%	平均端到端传输延迟/s	平均碰撞次数/次
HELD-MAC	10.59	0.85	10.02
PW-MAC	15.89	1.05	12.5
RI-MAC	45.30	1.63	40.62
X-MAC	37.69	1.71	42.51

由表 2 可得出,在平均占空比方面,HELD-MAC 相比其他的 3 种协议有着显著优势,比 PW-MAC 协议减少 5.3%,比 RI-MAC 和 X-MAX 分别减少了 34.71%和 27.1%。因为在节点运作过程中,假设节点不会出现数据包急剧增加的情况,HELD-MAC 中节点的唤醒间隔大部分时间处在最大值,而 PW-MAC 中节点的唤醒间隔始终在 0.2~1.6 s 之间随机变换。同时 HELD-MAC 协议确保节点之间具有不同的唤醒时刻,从而减少了数据传送冲突和数据重传。而 RI-MAC 和 X-MAC 不能准确预估节点的

唤醒时刻,需要每次醒来侦听信道,等待接收端唤醒信标帧,所以平均占空比方面有较大劣势。

在平均端对端传送延时方面,HELD-MAC 比 PW-MAC 协议有略微提高,但是比 RI-MAC 和 X-MAC 有了较大提高。相比于 RI-MAC 和 X-MAC,HELD-MAC 和 PW-MAC 保证了节点之间不同的唤醒时间,减少了数据传输冲突和数据重传,从而减少了传输延时。PW-MAC 不能根据节点的负载情况,自适应地改变节点的唤醒间隔,因此靠近 SINK 节点的一些转发节点,由于需要转发的数据量较大,会产生传输冲突,从而带来数据传输延时。而 HELD-MAC 中节点可自适应改变节点的唤醒间隔,因此当检测到转发的数据量较多时,减小唤醒间隔,从而缩短传输延时。

2.3 网格网络评估

在 4×4 网格网络中,SINK 节点处在网格中央,节点与邻居节点之间距离为 90 m,节点通信半径为 100 m。边缘节点固定时间间隔传送数据帧。通过改变此时间间隔来模拟网络中出现突发事件,导致数据量逐渐增加的情形。通过改变产生数据包时间间隔,观察 HELD-MAC,PW-MAC 和 RI-MAC 在应对网络负载增加时性能对比。

图 3,4 是 3 种协议在网格环境中占空比和平均冲突量类比。随着数据产生间隔逐渐减小,需要等待传输的数据包数量逐渐增加,由于 HELD-MAC 能够自适应改变节点的唤醒间隔,由图可看出,HELD-MAC 中数据传输碰撞次数相比于 RI-MAC 和 PW-MAC 增加趋势缓慢。因此 HELD-MAC 中节点数据重传的次数要比其他两种协议要少,发送节点的平均占空比要比 RI-MAC 和 PW-MAC 有较大优势。

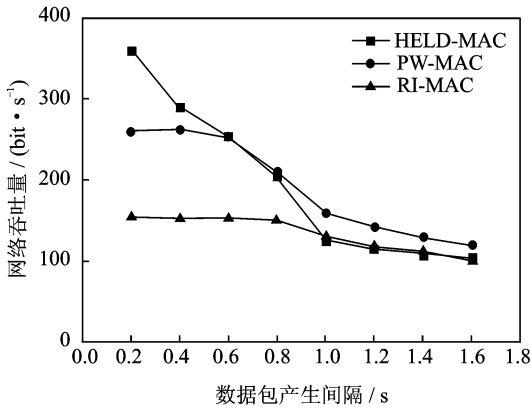


图 3 平均占空比较

Fig. 3 Average duty cycle

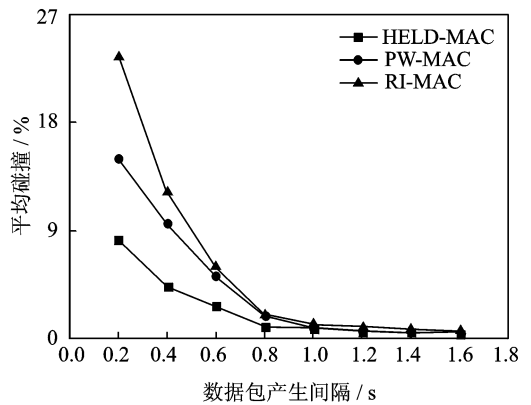


图 4 平均碰撞次数

Fig. 4 Average transmission collision

图 5 是 3 种协议在网格环境下的数据平均传输延迟对比图。HELD-MAC 中接收节点可以依据发送节点负载情况自适应地改变节点唤醒间隔,当负载增大时,节点减小唤醒间隔,当负载减小时,增大节点的唤醒间隔。因此随着数据产生时间间隔减小,当数据传输冲突时,数据重传次数要比其他两种协议要少,数据传输延迟要小。

图 6 是 3 种协议网络吞吐量对比图。在时间间隔为 8 ms 之前,网络负载不是很大,使得 HELD-MAC 协议中节点的唤醒时间间隔为最大值,因此整个网络吞吐量要比其他两种协议要小。随着网络负载的逐渐增加,HELD-MAC 协议优势逐渐体现,接收节点唤醒间隔减小,数据传输延迟减小,使得网络吞吐量较其他两种协议要大。

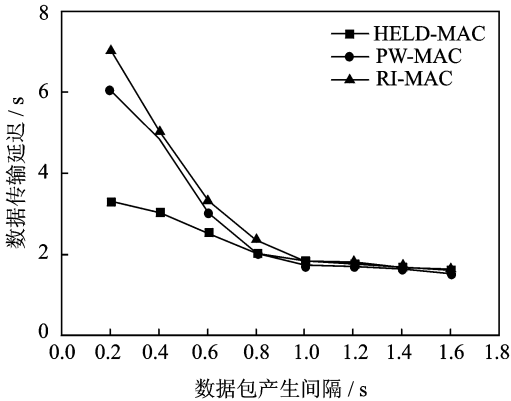


图 5 平均传输延迟

Fig. 5 Average delivery latency

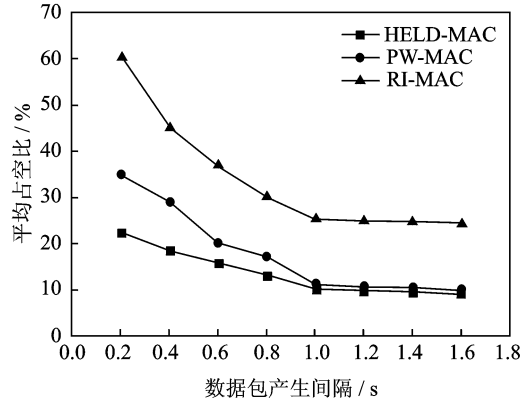


图 6 网络吞吐量比较

Fig. 6 Average network throughput

总体来讲,随着网络负载的逐渐增加,HELD-MAC 协议在平均占空比、数据平均传输延迟以及数据传输冲突次数方面呈线性增加,稳定性较强,比其他两种协议有明显优势。

3 结束语

在研究现有基于接收节点发起的非同步协议基础上,从低延迟和节能方向提出了一种接收节点发起的异步 MAC 层协议——HELD-MAC。新加入节点依据相邻节点的唤醒时刻,选择自身唤醒时刻,确保和相邻节点具有不同的唤醒时刻,从而避免数据传输冲突。节点通过准确预估接收端的唤醒时刻,以便提前唤醒以等待。在预测节点的唤醒时间机制中,引入预测误差阈值 $E_{\text{threshold}}$,当接收节点实际唤醒时间与发送节点预测的唤醒时间差值大于误差阈值 $E_{\text{threshold}}$ 时,发送节点重新请求节点的唤醒状态。HELD-MAC 中接收节点可以依据发送节点中需要等待传输的数据包数量,自适应地改变节点唤醒时刻,从而减小了数据传输延迟和传输冲突率,提升了吞吐量。考虑到靠近 SINK 节点的转发节点需要频繁转发数据,消耗较大的能量,节点能够根据剩余能量自适应地改变最小唤醒时间间隔,从而延长了整个网络的生存周期。通过实验仿真验证,随着网络负载的逐渐增加,HELD-MAC 协议在平均占空比、数据平均传输延迟、数据传输碰撞次数和网络吞吐量方面,比已有的 PW-MAC 和 RI-MAC 协议有较大优势,为提高 WSN 末端节点寿命、降低传输延迟提供了一种有效的方法。

参考文献:

- [1] 王建平,陈改霞,孔德川,等. 一种基于学习自动机的 WSN 区域覆盖算法[J]. 数据采集与处理,2014,29(6):1016-1022.
Wang Jianping, Chen Gaixia, Kong Dechuan, et al. Learning automate-based area coverage algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014,29(6):1016-1022.
- [2] Suriyachai P, Roedig U, Scott A. A survey of MAC protocols for mission-critical applications in wireless sensor networks [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012,14(99):1-25.
- [3] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2002. New York:IEEE,2002: 1567-1576.
- [4] Zhao Y Z, Ma M, Miao C Y, et al. An energy-efficient and low-latency MAC protocol with adaptive scheduling for multi-hop wireless sensor networks [J]. *Computer Communications*, 2010,33(12):1482-1461.
- [5] 胡玉鹏,林亚平,周四望. 面向异步通信机制的无线传感器网络及其 MAC 协议研究[J]. 计算机学报,2011,34(8):1463-1477.
Hu Yupeng, Lin Yaping, Zhou Siwang. Asynchronous communication mechanism oriented wireless sensor networks and MAC protocols[J]. *Journal of Computers*, 2011,34(8):1463-1477.

- [6] Michael Buettner, Gary V Yee, Eric Anderson, et al. X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[J]. *Sen Sys*, 2006,14(4): 307-320.
- [7] Jang Beakcheol, Jun Bum Limb, Mihail L. An asynchronous scheduled MAC protocol for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2013,57(1):85-98.
- [8] Wang H, Zhang X, Nait-Abdesselam F. DPS-MAC: An asynchronous MAC protocol for wireless sensor networks[C]//14th International Conference on High Performance Computing. Goa, India; Springer-Verlag, 2007:393-404.
- [9] Tang L, Sun Y, Gurewitz O, et al. PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor network[C]//IEEE INFOCOM 2011. Shanghai; Shanghai Jiao Tong University, 2011:1305-1313.
- [10] Vikas, Parma Nand. Contention based energy efficient wireless sensor network—A survey [C]//International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2015). Uttar Pradesh, India; Galgotias University, 2015:546-551.
- [11] Amre El-Hoiydi, Jean-Dominique Decotignie. WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks[J]. *ALGOSENSORS*, 2004(1):18-31.
- [12] 李哲涛,朱更明,王志强. 低占空比、低碰撞的异步无线传感器网络 MAC 协议[J]. *通信学报*, 2013,34(10):9-16.
Li Zhetao, Zhu Gengming, Wang Zhiqiang. Low duty cycle and low collision asynchronous MAC protocol for wireless sensor network[J]. *Journal on Communications*, 2013,34(10):9-16.
- [13] Alvi A N, Bouk S H, Ahmed S H, et al. Enhanced TDMA based MAC protocol for adaptive data control in wireless sensor networks[J]. *J Commun Netw*, 2015,17(3):247-255.
- [14] 李巧勤,刘明,杨梅,等. 负载相似节点分布解决传感器网络能量洞问题[J]. *软件学报*, 2011,22(3):451-465.
Li Qiaoqin, Liu Ming, Yang Mei, et al. Load-similar node distribution for solving energy hole problem in wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2011,22(3):451-465.
- [15] Chi Yashen, De Nianyang, Ming Yanchen. Collaborative and distributed search system with mobile devices[J]. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 2012,11(10):1478-1493.

作者简介:



马礼(1968-),男,博士,研究方向:分布式系统,无线传感器网络,E-mail:mali@ncut.edu.cn。



高洪磊(1990-),男,硕士研究生,研究方向:无线传感器网,E-mail:crazy_leilei@126.com。



马东超(1980-),男,副教授,研究方向:计算机网络协议、嵌入式系统设计,E-mail:madongchao@gmail.com。



邱庆媛(1972-),女,助理工程,研究方向:计算机网络,E-mail:qqyuan@cnpc.com.cn

