doi:10.11887/j.cn.201401028 http://journal.nudt.edu.cn

THO-MAC:一种两跳优化的低延迟低功耗无线传感器网络介质访问控制协议*

唐宏伟,徐 明,孙彩霞
(国防科技大学 计算机学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:功耗与延迟是无线传感器网络介质访问控制协议设计首要考虑的两个问题。提出了一种新的传感器网络低延迟、低功耗、接收节点初始化异步介质访问控制协议——THO-MAC协议。通过准确预测接收节点的唤醒时间,THO-MAC协议调度发送节点侦听信道,从而减少发送节点空闲侦听能量浪费。THO-MAC协议在发送节点两跳转发节点集中选择使报文两跳转发延迟最小的转发节点,从而降低报文传输延迟。使用NS2模拟器对THO-MAC协议进行了详细模拟。模拟结果显示,与RI-MAC和Any-MAC协议相比,THO-MAC协议可以减少35.5%和18%的报文传输延迟,同时节省23.5%和15.5%的节点功耗。

关键词:无线传感器网络;介质访问控制协议;低功耗;低延迟;伪随机数发生器
中图分类号:TP393 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)01-0161-06

THO-MAC: a low-latency and energy-efficient MAC protocol with two-hop optimization in WSNs

TANG Hongwei, XU Ming, SUN Caixia
(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Energy consumption and latency are two major problems that are primarily considered in the design of medium access control (MAC) protocols in wireless sensor networks (WSNs). A new low-latency, energy-efficient and receiver-initiated asynchronous MAC protocol in WSNs is proposed. By precisely predicting the receiver's wakeup time, THO-MAC protocol can schedule the sender to listen to the channel, such that it can reduce the sender's energy waste of idle listening. On the other hand, in order to reduce packet delivery latency, THO-MAC protocol chooses the forwarders in the sender's two-hop forwarders set to minimize the two-hop forwarding latency. The performance of THO-MAC protocol in terms of detailed NS2 simulation is evaluated. The simulation results show that the THO-MAC protocol reduces 35.5% and 18% packet delivery latency, while saving 23.5% and 15.5% sensor energy consumption, compared with RI-MAC and Any-MAC, the two state-of-the-art MAC protocols.

Key words: wireless sensor networks; medium access control protocol; energy-efficient; low latency; pseudo-random number generator

随着无线通信、嵌入式计算以及传感器节点等技术的飞速发展,无线传感器网络在军事、工业以及农业等领域具有广阔的应用前景,成为近年来的热门研究领域之一。

在无线传感器网络中,介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议决定无线设备之间如何共享无线信道,是对网络性能具有巨大影响的基础协议和关键技术。由于IEEE 802.11 MAC协议中空闲侦听导致大量能量浪费,不适用于节点能量有限的传感器网络。

为了减少空闲侦听能量浪费,传感器网络MAC协议提出了占空比机制。节点状态周期性地在活跃和睡眠之间进行转换,在活跃状态时发送或接收报文,而在睡眠状态时关闭无线通信设备从而节省能量。

占空比机制可以节省节点能量,但是当节点需要发送数据时,其接收节点可能处于睡眠状态,节点不得不等到接收节点唤醒,这种报文传输延迟称之为睡眠延迟。随着报文转发路径长度增加,睡眠延迟将逐步累积,导致较大的报文传输延迟,对于某些实时应用,这是不可以容忍的。

1 相关工作

根据节点访问信道的方式,传感器网络MAC

* **收稿日期**:2013-05-03
基金项目:"天河"新一代高性能计算机系统研制资助项目(2012AA01A301);国家863计划资助项目
作者简介:唐宏伟(1979—),男,四川南充人,博士研究生,E-mail: hwtang@nudt.edu.cn;
孙彩霞(通信作者),女,副教授,博士,E-mail: cxsun@nudt.edu.cn

协议可以分为基于竞争和基于调度的协议。基于竞争的MAC协议又进一步分为同步和异步协议。同步MAC协议，比如SMAC[1]，TMAC[2]，RMAC[3]，DWMAC[4]以及PRMAC[5]等，需要邻居节点之间进行同步，邻居节点同时唤醒进行通信。与之相反，异步MAC协议不需要邻居节点之间进行同步，每个节点根据自己的调度决定唤醒时间，这类协议包括BMAC[6]，WiseMAC[7]，XMAC[8]，RI-MAC[9]，PW-MAC[10]以及Any-MAC[11]等。

BMAC协议中的节点周期性唤醒以检查无线信道是否活跃，如果信道空闲，节点立即转入睡眠状态；否则节点保持接收状态以接收可能是发送给自己的数据报文。当节点需要发送数据报文时，在数据报文之前发送一个前导同步码，持续时间不少于接收节点的唤醒间隔。

在WiseMAC协议中，接收节点在数据确认报文中携带下一次唤醒的调度信息。发送节点需要再次与同一接收节点进行数据通信时，只需在其唤醒之前很短的时间才开始发送前导同步码，从而减少BMAC协议中前导同步码的长度，达到节省能量的目的。

XMAC协议的发送节点在每个短选通前导同步码中嵌入接收节点地址。无关节点接收到同步码后立即转入睡眠状态。接收节点在两个同步码之间发送确认报文，发送节点一旦接收到该报文，立即停止发送同步码而开始发送数据。XMAC协议减少了长前导同步码的能量浪费，同时降低了报文传输延迟。

前面提到的协议都是发送节点初始化异步MAC协议。RI-MAC协议不同于这些协议，它是接收节点初始化异步MAC协议。在RI-MAC协议中，节点周期性唤醒并发送信标报文，通知其邻居节点它已经唤醒可以接收数据。节点需要发送数据报文时立即唤醒侦听信道，一旦接收到接收节点的信标报文，则开始发送数据报文。

在RI-MAC协议中，当节点需要发送数据报文时，必须立即唤醒侦听信道，导致大量空闲侦听能量浪费。在PW-MAC协议和文献[12]提出的协议中，发送节点一旦获取了接收节点的伪随机数，生成器参数就可以预测接收节点的唤醒时间，因此发送节点仅需在接收节点唤醒之前开始侦听信道，有效减少发送节点的空闲侦听导致的能量浪费。

PW-MAC协议可以减少节点能量消耗，但是并不能降低报文传输延迟。Any-MAC协议采用数据链路层任意播机制来减少报文传输延迟。在Any-MAC协议中，假设发送节点 S 有 m 个一跳转发节点 $\{S_1, S_2, \cdots, S_m\}$，其唤醒时间分别为 $\{t_w^{S_1}, \cdots, t_w^{S_2}, t_w^{S_m}\}$，并且 $t_w^{S_1} < t_w^{S_2} < \cdots < t_w^{S_m}$，$S$ 将选择节点 S_1 作为其接收节点。另一方面，对于节点 $\{S_1, S_2, \cdots, S_m\}$，其对应的下一跳转发节点集中最小唤醒时间分别为 $t'^{S_1}_w$，$t'^{S_2}_w, \cdots, t'^{S_m}_w, t'^{S_1}_w$ 并不一定是最小值，因此选择 S_1 作为 S 的转发节点不能确保两跳范围内的报文转发延迟最小。

2 THO-MAC协议设计

2.1 协议概述

THO-MAC协议与RI-MAC以及Any-MAC协议相似，都是接收节点初始化异步MAC协议。

与RI-MAC协议不同的是，THO-MAC协议中的发送节点一旦获取接收节点的伪随机数生成器参数，就可以准确预测其接收节点的唤醒时间。发送节点仅需在接收节点唤醒之前唤醒侦听信道，从而减少空闲侦听导致的能量浪费。另一方面，不同于Any-MAC协议，THO-MAC协议在发送节点的两跳范围内选择使报文两跳转发延迟最小的转发节点，从而减少报文传输延迟。

2.2 问题描述

由于传感器网络节点密集部署的特性，发送节点可以拥有多个转发节点。在异步MAC协议中，每个节点唤醒时间不同，选择不同的转发节点会导致不同的报文传输延迟。为了描述报文传输延迟问题，我们给出以下一些定义：

- $OHFS_i = \{i_1, i_2, \cdots, i_m\}$，节点 i 的一跳转发节点集，有 m 个一跳转发节点。
- $THFS_i = OHFS_{i_1} \cup OHFS_{i_2} \cup \cdots \cup OHFS_{i_m}$，节点 i 的两跳转发节点集。
- t_w^i，任意节点 i 的周期性唤醒时间。
- t_l^j，发送节点 j 的唤醒侦听时间。
- $l_{i,j}$，通信链路 (i, j) 之间的报文单跳转发延迟，其中 i 表示发送节点，j 表示接收节点。
- $L = \sum_{i=0}^{i=k-1} l_{n_i, n_{i+1}}$，数据报文从源节点到汇聚节点的 k 跳端到端传输延迟。

如果每个节点都拥有其到汇聚节点所有不同路由的节点唤醒调度，则节点可以从中选择使报文传输延迟最优的转发路径。但是由于传感器网络部署区域广、部署节点多以及网络动态性强，获取并维护整个网络内所有节点的唤醒调度信息几乎不可能。因此本文提出的THO-MAC协议采用一种可行的次优方法——在节点的两跳范围内选择最合适的转发节点使得报文在两跳范围内的

转发延迟最小:

$$\min(l_{s,i} + l_{i,j}), \forall i \in OHFS_S, \forall j \in OHFS_i \quad (1)$$

其中 S 是发送节点。

2.3　网络初始化及维护

在网络初始化阶段,所有节点保持活跃状态收集其两跳转发节点的信息。

由于无线传感器网络通常采用密集部署,每个节点都具有多个邻居节点[13]。在 THO-MAC 协议中,每个节点 i 采用最少跳数原则 MiHP(Minimum-Hop Principle)建立自己一跳转发节点集 $OHFS_i$,即每个节点总是选择那些距离汇聚节点跳数最少的邻居节点作为自己的一跳转发节点。

每个节点为了建立自己的一跳转发节点集,首先利用最少跳数决策 MiHD(Minimum-Hop Decision)过程来获取自己到汇聚节点的最少跳数 MiH(Minimum-Hop)。无线传感器网络部署后,由汇聚节点发起 MiHD 过程,汇聚节点的 MiH 设为 0,而其他节点的 MiH 均被初始化为 -1。MiHD 过程通过广播特殊的消息 MiHDM(Minimum-Hop Decision Message)来决定每个节点距离汇聚节点的最少跳数,在该消息中包含一个特定的 HOP 域(表示 MiHDM 传输的跳数)。汇聚节点将 HOP 设置为 1,并广播 MiHDM 发起 MiHD 过程。

算法 1　MiHDM 处理过程

```
1.  节点 i 接收到节点 j 广播的 MiHDM
2.  if (MiH < 0) then
3.    MiH = HOP;
4.    HOP = HOP + 1,并广播 MiHDM;
5.    将节点 j 加入 OHFS_i;
6.  else if(MiH > HOP) then
7.    MiH = HOP;
8.    HOP = HOP + 1,并广播 MiHDM;
9.    删除 OHFS_i 中的所有节点,并将节点 j 加
      入 OHFS_i;
10. else if (MiH == HOP) then
11.   HOP = HOP + 1,并广播 MiHDM;
12.   if (j ∉ OHFS_i) then
13.     将节点 j 加入 OHFS_i;
14.   end if
15. else
16.  丢弃接收到的 MiHDM;
17. end if
```

算法 1 描述了节点 i 接收到邻居节点 j 的 MiHDM 后如何更新自己的 MiH 以及一跳转发节点集 $OHFS_i$。可以分为以下四种情况:

(1) 如果节点 i 从未接收到任何 MiHDM,节点 i 更新自己的 $MiH = HOP$,HOP 域值加 1,然后广播 MiHDM 并将节点 j 加入 $OHFS_i$。

(2) 如果节点 i 的 MiH 大于 $MiHDM$ 中的 HOP 域值,根据最少跳数原则,节点 i 作废 $OHFS_i$ 中现有节点,将节点 j 加入 $OHFS_i$,更新 $MiH = HOP$,HOP 域值加 1 并广播 $MiHDM$。

(3) 如果节点 i 的 MiH 等于 $MiHDM$ 中的 HOP 域值并且节点 j 不在 $OHFS_i$ 中,则将节点 j 加入 $OHFS_i$,同时 HOP 域值加 1 并广播 $MiHDM$。

(4) 如果节点 i 的 MiH 小于 $MiHDM$ 中的 HOP 域值,根据最少跳数原则,节点 j 不能作为节点 i 的转发节点,丢弃该 $MiHDM$。

网络完成 MiHD 过程后,每个节点都决定了自己距离汇聚节点的最少跳数 MiH,并建立了自己的一跳转发节点集。为了获取两跳转发节点集,每个节点将再次进行广播,并在广播消息中包含自己的一跳转发节点集。通过这次广播,所有节点都可以建立自己的两跳转发节点集。

由于无线传感器网络动态性非常强,我们从以下两方面阐述 THO-MAC 协议如何进行网络维护:

- 新加入节点

节点新加入时,首先侦听一段时间以获取邻居节点距离汇聚节点的跳数信息(节点可以在周期性信标报文中携带其距离汇聚节点的跳数信息),并建立其一跳转发节点集。其后,新加入的节点向自己的一跳转发节点请求唤醒参数以及这些节点的一跳转发节点信息,从而建立自己的两跳转发节点集。

- 节点失效

对于节点失效问题,THO-MAC 协议采用简单的黑名单机制。当节点选择某个节点作为其转发节点,如果连续多次都不能将数据报文转发至该节点,发送节点则将该节点加入黑名单,下次选择转发节点时不再考虑该节点。

2.4　发送节点自适应唤醒机制

THO-MAC 协议的目标之一是调度发送节点在其接收节点唤醒之前一点自适应唤醒侦听信道,从而减少发送节点空闲侦听时间,降低节点能耗。

为了使发送节点在其接收节点唤醒之前自适应唤醒,发送节点必须准确预测接收节点的唤醒时间。在 THO-MAC 协议中,每个节点都采用伪随机唤醒,一旦发送节点获取了接收节点的伪随机数生成器参数,就可以计算接收节点的伪随机数序列,从而预测接收节点的唤醒时间序列。

为了简化协议设计,THO-MAC 协议采用线

性同余伪随机数生成器：

$$x_{n+1} = (ax_n + b) \bmod m \quad (2)$$

其中 a、b 以及 m 为非负常量，x_n 为当前种子。四元组 (a,b,m,x_n) 称之为线性同余伪随机数生成器参数。发送节点一旦获取接收节点的参数 (a,b,m,x_n)，就可以计算接收节点的所有唤醒时间序列。算法 2 描述了发送节点需要发送数据报文时，如何决定其唤醒侦听时间。如果节点 i 检测到事件或者接收到上一跳节点传送的报文，节点 i 计算节点 i 的唤醒时间 $j \geqslant (TIME_NOW + \Delta)$，其中 $TIME_NOW$ 表示当前时间，Δ 表示发送节点和接收节点之间最小唤醒时间差。一旦发送节点 i 计算出接收节点 j 的下一次唤醒时间 t_w^j，发送节点 i 计算自己的唤醒侦听时间为 $t_l^i = t_w^j - \Delta$。

算法 2　发送节点计算唤醒侦听时间

1. if（节点 i 需要发送报文给节点 j）then
   获取节点 j 的伪随机数生成器参数 $(a,b,m,x_n)_j$；
2. do
3. $x_{n+1} = (a * x_n + b) \bmod m$；
4. 计算 x_{n+1} 对应的唤醒时间 t_w^j；
5. while（$t_w^j \geqslant TIME_NOW + \Delta$）
6. $t_l^i = t_w^j - \Delta$；
7. 节点 i 根据 t_l^i 调度唤醒侦听信道的时间；
8. else
9. 节点 i 按照自己的周期性唤醒调度唤醒并广播信标报文；
10. end if

2.5　最优两跳转发节点选择机制

THO-MAC 协议通过在发送节点的两跳范围内选择最合适的转发节点，使得报文两跳转发延迟最小，从而优化报文从源节点到汇聚节点的端到端传输延迟。

算法 3　THO-MAC 协议最优两跳转发节点选择

节点 S 在 t_0 时刻产生数据报文

输入：发送节点 S 的一跳转发节点集 $OHFS_S$ 以及两跳转发节点集 THF_S，两跳转发节点的伪随机数生成器参数

输出：发送节点 S 的两跳转发节点 OHF_S 和 THF_S

1. $l_{th}^{min} = +\infty$；$OHFS_S = -1$；$THF_S = -1$；
2. for 节点 $i \in OHFS_S$ do
3. 根据节点 i 的唤醒调度参数 $(a,b,m,x_n)_i$ 计算其唤醒时间 $t_w^i \geqslant t_o + \Delta$；
4. for 节点 $j \in OHFS_i$ do
5. 根据节点 j 的唤醒调度参数 $(a,b,m,x_n)_j$ 计算其唤醒时间 $t_w^j \geqslant t_w^i$；
6. if（$t_w^j - t_w^i \geqslant Thre$）then
7. if（$t_w^j - t_o \leqslant l_{th}^{min}$）then
8. $l_{th}^{min} = t_w^j - t_o$；
9. $OHF_S = i$；$THF_S = j$；
10. else
11. $OHFS_i$ 中的下一个节点；
12. end if
13. else
14. $OHFS_i$ 中的下一个节点；
15. end if
16. end for
17. end for
18. if（节点 S 不能找到合适的两跳转发节点）then
19. $OHF_S = OHFS_S$ 中最先唤醒的节点；
20. end if

算法 3 描述了 THO-MAC 协议中发送节点 S 需要发送数据报文时如何选择其两跳转发节点。假设节点 S 在 t_o 时刻产生报文，对于 $\forall i \in OHFS_S$，S 将计算选择节点 $\forall j \in OHFS_i$ 作为其第二跳转发节点时的两跳报文转发延迟 $l_{th} = t_w^j - t_o$，并从中选择使得 l_{th} 最小的两个节点作为节点 S 的两跳转发节点。如果节点 S 不能找到合适的两跳转发节点，则采用 Any-MAC 协议的任意播机制，从一跳转发节点集中选择最先唤醒的节点作为其下一跳节点。

算法3中的第6行语句确保第二跳转发节点与第一跳转发节点之间的唤醒时间差大于或等于某个预先定义的阈值 $Thre$。其目的在于确保第一跳节点可以在第二跳节点唤醒之前完成接收发送节点的数据报文。在 THO-MAC 协议中，$Thre$ 的值被设置为：

$$Thre = durBeacon + SIFS + durData + durACK \quad (3)$$

其中 $durBeacon$ 表示发送信标报文的时间，$SIFS$ 表示短帧间间隔时间，$durData$ 表示发送数据报文的时间，$durACK$ 表示发送数据确认报文的时间。

3　协议模拟与性能评估

本文使用 NS2 网络模拟器 2.29 版对 THO-MAC 协议进行模拟，并将模拟结果与 RI-MAC 和 Any-MAC 协议进行对比。

3.1　模拟环境

表 1 描述了本文模拟中使用的无线通信参数，这些参数主要取自 CC2420 无线通信模块规范。CC2420 已经广泛用于 MICAz 和 TelosB 等传感器节点。

表 1　无线模块参数

Tab. 1　Wireless parameter

带宽	250Kbps	Beacon	6B
SIFS	192μs	ACK	5B
Slot	320μs	CCA	128μs
Tx Range	250m	CS Range	550m
Data	50B		

图 1 给出了本文模拟使用的网络拓扑结构。网络由大量节点构成,节点均匀分布在一个 1200m × 1200m 的正方形区域内,汇聚节点位于该区域右上角。缺省节点个数为 400,本文也通过改变节点个数评估 THO-MAC 协议在不同节点密度下的性能。

采用 RCE 模型产生网络负载,该模型在节点分布区域内随机选择一个坐标 (x,y) 产生一个事件。如果节点传感半径为 R,那么在以 (x,y) 为圆心,半径为 R 的圆形范围内的所有节点都将检测到该事件,并产生数据报文向汇聚节点报告事件。随着节点传感半径增大,网络负载随之增大。节点传感半径缺省为 100m,RCE 模型每 200s 产生一个事件。

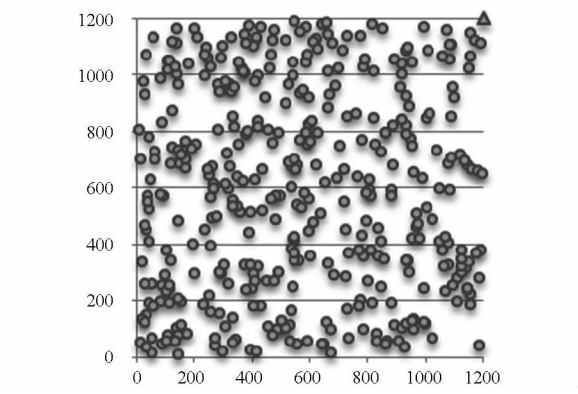


图 1　400 个节点随机部署

Fig. 1　Random deployment with 400 nodes

3.2　报文传输延迟评估

图 2 给出了 RI-MAC、Any-MAC 以及 THO-MAC 协议在不同节点传感半径条件下的报文传输延迟。与 RI-MAC 协议相比,THO-MAC 协议的报文传输延迟平均减少了 35.5%。当节点的传感半径为 120m 时,THO-MAC 协议的报文传输延迟仅为 RI-MAC 协议的 53.5%。与 Any-MAC 协议相比,在各种节点传感半径条件下,THO-MAC 协议的报文传输延迟均优于 Any-MAC 协议,平均减少 14%,当节点传感半径为 80m 时,THO-MAC 协议的报文传输延迟比 Any-MAC 协议减少 18%。

图 3 给出了不同节点密度下的各协议报文传输延迟。三种协议的报文传输延迟随着节点密度的增加而增加。当部署的节点个数为 500 时,

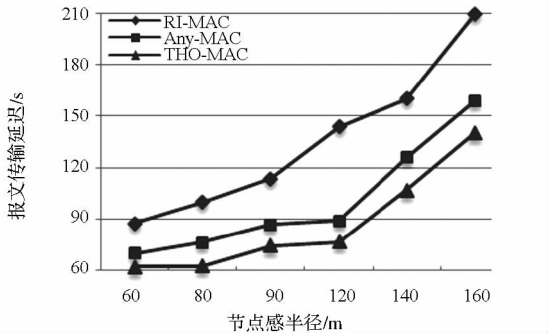


图 2　不同传感半径下的报文传输延迟

Fig. 2　Packet delivery latency with various sensing radii

THO-MAC 的报文传输延迟分别为 RI-MAC 和 Any-MAC 协议的 60.4% 和 73.1%。

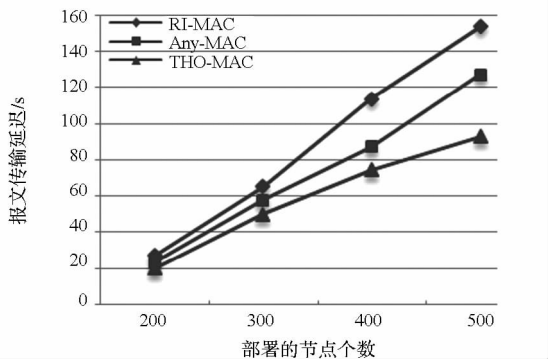


图 3　不同节点密度下的报文传输延迟

Fig. 3　Packet delivery latency with different nodes densities

3.3　节点功耗评估

图 4 给出了在不同节点传感半径条件下各种协议的平均节点功耗。如图 4 所示,THO-MAC 协议的平均节点功耗总是最低,与 RI-MAC 协议相比,当节点传感范围为 160m 时,THO-MAC 协议最多可以减少 23.5% 的节点功耗。而与 Any-MAC 协议相比,当节点传感范围为 140m 时,THO-MAC 协议最多可以减少 15.5% 的节点功耗。

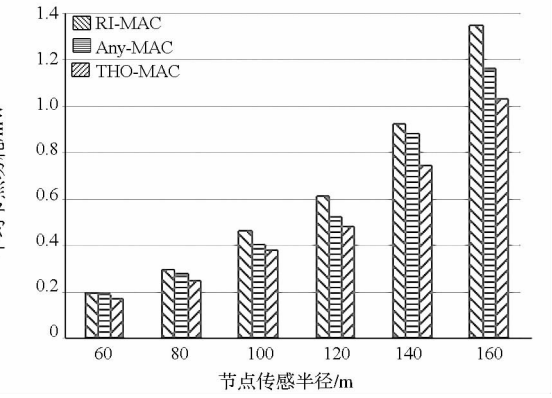


图 4　不同传感半径下的平均节点功耗

Fig. 4　Average sensor energy consumption with different radii

图5给出了不同网络部署密度下各种协议的平均节点功耗。THO-MAC 协议的平均节点功耗最小。当网络内部署的节点个数为 500 时，THO-MAC 协议的平均节点功耗分别为 RI-MAC 和 Any-MAC 协议的 77.3% 和 85.1%。

与 RI-MAC 和 Any-MAC 协议相比，THO-MAC 协议网络初始化会导致额外的能量消耗，但是这种大范围泛洪广播操作只在网络初始化时进行。随着网络运行时间的增加，THO-MAC 协议通过调度发送节点唤醒时间而获得的能量节省将抵消其由于初始化带来的额外能量消耗，甚至可以获得更少的能量消耗。

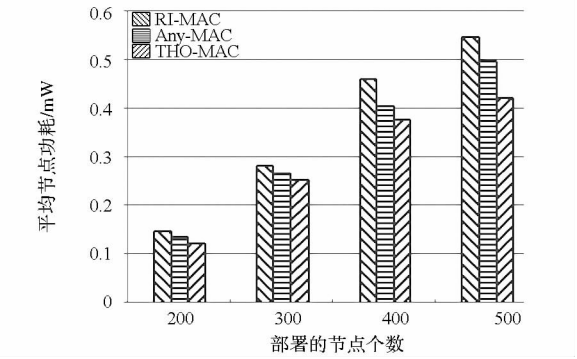


图5 不同网络密度下的平均节点功耗

Fig. 5 Average sensor energy consumption with different network densities

图6给出了三种协议在不同模拟时间下的平均节点功耗。在网络运行初期，THO-MAC 协议的平均节点功耗最大，随着模拟时间的增加，THO-MAC 协议的平均节点功耗出现逐步下降的趋势。当模拟时间为 8000s 时，THO-MAC 协议的平均节点功耗低于 RI-MAC 协议，进一步当模拟时间为 12000s 时，THO-MAC 协议的平局节点功耗低于 Any-MAC 协议。

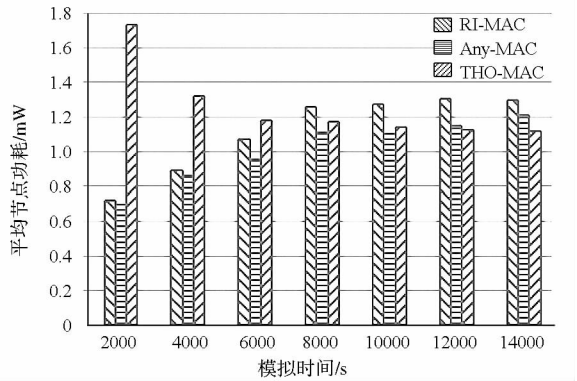


图6 不同运行时间长度平均节点功耗

Fig. 6 Average sensor energy consumption with different simulation times

4 结束语

本文提出了一种新的低功耗低延迟传感器网络异步 MAC 协议——THO-MAC 协议。THO-MAC 协议通过准确预测接收节点的唤醒时间来调整发送节点的侦听时间，从而减少发送节点空闲侦听，实现减少节点能耗的目的。另一方面，THO-MAC 协议利用传感器网络密集部署的特点，采用两跳优化机制，在发送节点的多个两跳转发节点中选择使报文两跳转发延迟最小的节点作为其两跳转发节点，从而优化报文传输延迟。模拟显示，在各种场景下，与 RI-MAC 和 Any-MAC 协议相比，THO-MAC 协议实现了更低的报文传输延迟以及更少的节点能量消耗。

参考文献(References)

[1] Ye W, Heidemann J S, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceedings of INFOCOM 2002, June 2002: 1567 – 1576.

[2] Dam T V, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proceedings of SenSys 2003, November 2003:171 – 180.

[3] Du S, Saha A K, Johnson D B. RMAC: A routing-enhanced duty-cycle MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of INFOCOM 2007, May 2007: 1478 – 1486.

[4] Shu Y J, Du S, Gurewitz O, et al. DWMAC: A low latency, energy efficient demand-wakeup mac protocol for wireless sensor networks[C]//Proceedings of MobiHoc 2008, 2008: 53 – 62.

[5] Canli T, Khokhar A. PRMAC: Pipelined routing enhanced MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proceedings of ICC 2009, Jun. 2009: 1 – 5.

[6] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks [C]//Proceedings of Sen Sys 2004, November 2004: 95 – 107.

[7] El-Hoiydi A, Decotignie J. WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks [C]// Proceedings of ALGO SEN SORS 2004, July 2004: 18 – 31.

[8] Buettner M, Yee G V, Anderson E, et al. XMAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks [C]//Proceedings of Sen Sys 2006, November 2006: 307 – 320.

[9] Sun Y, Gurewitz O, Johnson D B. RI-MAC: A receiver initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks[C]//Proceedings of Sen Sys 2008, 2008: 1 – 14.

[10] Tang L, Sun Y J, Gurewitz O, el al. PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proceedings of INFOCOM 2011, April 2011: 1305 – 1313.

[11] Asharf F, Vaidya N H, Kravets R H. Any-MAC: Extending any asynchronous MAC with anycast to improve delay in WSN [C]//Proceedings of SECON 2011, June 2011: 19 – 27.

[12] Lee H, Hong J, Yang S, el al. A pseudo-random asynchronous duty cycle MAC protocol in wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 12(2): 136 – 138.

[13] Jing D, Yunghsiang S H, Wendi B H, et al. Scheduling sleepingnodes in high density cluster-based sensor networks [J]. Mobile Networksand Applications, 2005, 10(6): 825 – 835.