

# 基于跨层设计的无线传感器网络 MAC 协议

王永涛, 苏晓龙, 王香婷

(中国矿业大学计算机科学与技术学院, 徐州 221116)

**摘要:**针对占空比 MAC 协议存在端到端传输延迟问题, 提出一种新的占空比 MAC 协议——PRMAC。PRMAC 通过跨层路由信息帧的提前传送可以调度数据包在一个周期内多跳传输, 从而降低网络延迟, 提高能量有效性。NS-2 仿真结果表明, PRMAC 在没有牺牲能量有效性的情况下, 改进了传统占空比协议的端到端传输延迟, 并能提高网络吞吐量。

**关键词:**无线传感器网络; MAC 协议; 能量有效性

## Wireless Sensor Networks MAC Protocol Based on Cross-layer Design

WANG Yong-tao, SU Xiao-long, WANG Xiang-ting

(School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

**【Abstract】** The duty-cycle protocols exists significant end-to-end delivery latency. In order to solve this problem, a new duty-cycle MAC protocol named PRMAC is proposed. PRMAC can delivery a packet multiple hops in a period based on cross-layer routing information advanced transmission, thus reduce network latency and improve energy efficiency. Simulation result in NS-2 shows that PRMAC can improve end-to-end delivery delay and throughput in traditional duty-cycle protocol without reducing energy efficiency.

**【Key words】** Wireless Sensor Networks(WSN); Media Access Control(MAC) protocol; energy efficiency

### 1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)综合了传感器技术、微机电系统技术、分布式信息处理和网络通信技术, 在工业控制、环境检测、医疗监护、交通运输、抢险救灾等诸多领域有着广阔的应用前景, 已成为最新的研究热点<sup>[1-2]</sup>。

由于无线传感器网络的节点能量有限且无法得到补充, 限制了无线传感器网络的潜在应用, 因此如何有效利用能源, 延长网络的生命周期成为无线传感器网络的核心问题。研究表明, 无线通信模块是传感器节点能量的主要消耗者, 而 MAC(Media Access Control)协议直接控制着无线收发设备, 因此, 设计高效节能的 MAC 协议具有重要的意义。

### 2 占空比 MAC 协议

许多传统无线网络的 MAC 协议, 如 IEEE802.11, 要求节点的无线射频模块始终保持监听媒质的状态, 而无线传感器网络通常产生的通信量较小, 这种空闲监听机制造成了极大的能源浪费。传统无线网络的 MAC 协议不适合无线传感器网络的应用。

为了减小空闲监听带来的能量浪费, 占空比机制被引入到无线传感器网络 MAC 协议。如 S-MAC<sup>[3]</sup>协议, 协议中每个节点都遵循一个固定周期的活动时期和休眠时期。活动时期分为同步时期和数据时期。在同步时期, 节点醒来, 发送同步消息以同步传感节点的时钟。在数据时期, 节点通过 RTS/CTS/DATA/ACK 机制发送数据, 降低了碰撞造成的能量浪费。在休眠时期, 除了仍然处于数据传输过程中的节点外, 节点关闭其无线模块以节省能量。S-MAC 同 IEEE802.11 一样也使用网络分配矢量机制来避免串扰现象。占空比 MAC

协议和其他传统的无线 MAC 协议相比, 实现了能量有效性, 但是该协议也存在一些局限性, 增加了端到端传输延迟。例如, S-MAC 在每个操作周期, 一个数据包仅被向前传输 1 跳, 因为中间的转播节点必须等待下一个节点醒来才能接收数据包。

另外, 占空比 MAC 协议的节点和他的邻居节点在一个短的周期内同步醒来, 这可能导致网络竞争的增加, 容易造成数据的丢失和增加传输延迟。节点仅在一个短的时间段内被激活, 极大地限制了网络的吞吐量。

鉴于以上问题, 本文提出并设计了一个新的低占空比的 MAC 协议——PRMAC(Pioneer Routing frame MAC), 它利用跨层路由信息的传递, 使控制帧能在一个单操作周期内多跳传输并调度即将到来的数据包沿路径快速传输。

### 3 PRMAC 协议的设计

#### 3.1 协议描述

为了降低占空比 MAC 协议的端到端传输延迟, 协议必须能在一个单操作周期内多跳传输数据包。PRMAC 协议的操作流程如图 1 所示。

一个传感节点的操作周期在 PRMAC 中被划分为 3 个部分: 先遣(PION)时期, 同步(SYNC)时期和休眠(SLEEP)时期。在 PION 时期, 标记节点有无数据包需要发送, 若无数据

**基金项目:**江苏省自然科学基金资助项目“RFID 安全与隐私研究”(BK2007035)

**作者简介:**王永涛(1983-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 苏晓龙, 副教授; 王香婷, 教授

**收稿日期:**2008-12-16 **E-mail:** wyt2001\_1983@163.com

包需要发送(如节点 E),节点就在 PION 时期之后直接进入休眠时期,这样就进一步降低了节点的占比,节省了能量。如果节点有数据包发送,节点就利用路由信息与下一跳节点启动通信,相邻节点间的通信不是通过使用 RTS 和 CTS 帧来实现的,而是通过向下一跳节点发送一个 PION 控制帧,下游节点收到 PION 帧后,经过处理再把 PION 帧转发出去,这个经处理的 PION 帧对于前驱节点来说可以完成确认(ACK)的功能,对于后继节点来说可以完成请求通信(RTS)的功能。PION 帧在先遣时期可以被传输多跳。

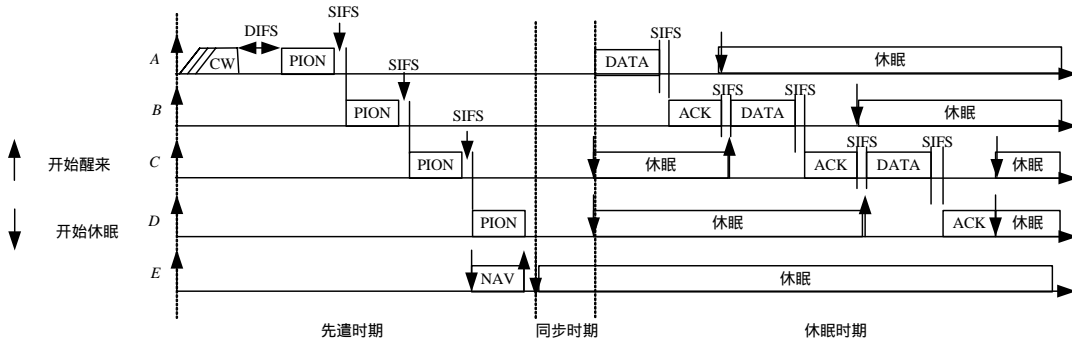


图1 PRMAC 协议的操作流程

在同步时期,有数据发送或有转发任务的路由信息上的节点开始广播同步消息,按照要求的精度同步传感节点的时钟。在休眠时期,节点进行休眠除了有通信任务的节点。那些有数据转发任务的节点通过 PION 帧的设置,在休眠时期的特定时刻醒来去转发上游节点发送来的数据包。每个节点在完成自己的通信任务后,就回到休眠状态。

### 3.2 PION 控制帧

当一个节点有数据要发送,节点就在 PION 时期发起发送数据的请求。如在图 1 中,源节点 A 有数据要发送到目的节点 D,下一跳节点是 B。节点 A 在 PION 时期首先从竞争窗口中随机选择一个时期,等待媒质空闲(空闲长度等于随机选择的时间长度加上额外的 DIFS 时期)就发送 PION 帧给节点 B。

这个 PION 帧包括 RTS 帧的所有字段,例如当前传感节点的地址,下一跳地址以及传输所需的持续时间。更重要的是,PION 也包括了一些跨层信息:当前传输的最终目的地址和 PION 帧已经传输的跳数。最终的目的地址是通过网络层发送的,跳数当数据包在源节点处产生的时候被设置为 0。

当节点 B 收到节点 A 的 PION 帧,如果 B 不是此次数据传输的最终目的地址,那么 B 就从它的网络层获得了下一跳地址,作为目的地址。然后 B 等待一个 SIFS 时期,传送它自己的 PION。同 IEEE802.11 一样,SIFS 时期对于一个节点来说是足够长的去切换发送/接收模式和去做必要的数据处理的。经节点 B 处理的 PION 帧除了最终的目的地址外还包括 3 个地址:它自己的地址;前一跳的地址(A)和下一跳地址(C)。另外,跳数在这个新的 PION 帧中被设置为比接收到的 PION 帧的值多 1。

这个 B 节点发出的 PION 帧对于 A 来说是 CTS,对于 C 来说是 RTS。不像 S-MAC 和其他的协议,当节点 A 收到节点 B 的 PION 帧后,A 并不立即发送它的数据,而是等到休眠阶段再去发送它的数据帧。先遣周期只被用来发送和接收 PION 帧,建立实际的数据传输调度。数据帧的接收和传输放在 SLEEP 时期。收到 A 的 PION,B 完成和 A 一样的步骤。

这样当节点收到一个 PION 后立即转发另一个 PION,直到最终目的节点收到 PION 帧或当前的 PION 时期结束。

### 3.3 数据传输过程

PRMAC 协议中的所有数据帧都在 SLEEP 时期发送。如图 1 中的例子,当第 1 个节点 A 收到节点 B 发送来的 PION 确认信息,它就等到直到休眠阶段的开始去发送数据帧。节点 B 在休眠阶段开始时醒来去接收数据帧,当节点 B 收到数据帧,它发送一个确认(ACK)帧给节点 A。当收到 ACK,节点 A 就进入休眠模式。

数据传输过程就像一个管道的过程,在 SLEEP 时期开始时,节点 A 和节点 B 立即开始它们的数据帧发送/接收。其他的在这个多跳路径上的有数据转发任务的节点在 SLEEP 时期的开始

就进入睡眠状态,保存能量。直到上一个节点有数据包发送给它时醒来接收数据,并转发数据给下一个节点。例如,节点 C 在 SLEEP 时期开始进入睡眠,但它当节点 B 准备发送数据帧给它时醒来。休眠时期的节点的正确唤醒时间能根据跳数计算出来。假设一个节点在 PION 传输中的第 i 跳,那么它的醒来时间为

$$T_{\text{wake up}}(i) = (i - 1) \times (\text{durDATA} + \text{SIFS} + \text{durACK} + \text{SIFS}) \quad (1)$$

其中,  $\text{durDATA}$  和  $\text{durACK}$  是发送一个数据帧和 ACK 帧的时间。

### 3.4 同步与串音避免机制

PRMAC 协议同 S-MAC 协议一样,在开始周期性活动和睡眠之前,每个节点都须选择睡眠调度机制并与邻居节点一致。再按照先遣时期、同步时期和休眠时期的机制进行调度。在 PRMAC 协议中,因为 PION 时期在 SYNC 时期之前,因此,PION 时期应足够长以应付时钟误差和漂移。一般 PION 时期的长度要大于 SYNC 时期的长度。同步时期用来同步路由信息上的节点间的时钟。另外,当用式(1)计算一个节点的醒来时间时,它会被进一步扣除一个小的时间值,以保证在上一个节点开始传输之前它处于唤醒状态。

PRMAC 协议沿用了 S-MAC 协议的网络分配矢量机制来避免串扰现象,如图 1 中,节点 E 是节点 D 的邻居节点,它无意中监听到节点 D 发送的 PION 帧。节点 E 就设置它的 NAV 去标明这个虚拟载波并记录这个时间长度值,同时进入休眠状态。通信过程记录的剩余时间会随着时间不断减少。当剩余时间减少至 0 的时候,若节点仍处于 PION 周期,就会被唤醒;否则,节点处于睡眠状态直到下一个调度的活动时期。

## 4 仿真结果与分析

本文使用 NS-2<sup>[4-5]</sup>网络仿真软件进行性能评估。主要参数如下:带宽 20 Kb/s,发送能耗 0.5 W,接收能耗 0.5 W,空闲侦听能耗 0.45 W,发送范围 25 m,休眠能耗 0.05 W,竞争窗口(CW) 64 ms,载波侦听范围 550 ms,DCF 帧间间隔 10 ms,短帧间间隔 5 ms。

仿真环境的网络模型如图 2 所示, 为一个从源节点到目的节点的跳数为 24 跳的线性网络, 所有节点被均匀地分布在一条直线上, 相邻节点相距 200 m, 且节点被配置成只能与相邻的节点通信。

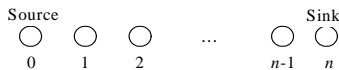


图 2 仿真网络模型

在本文的仿真中, 假定网络中的所有节点已经同步并使用一个单一的醒来和休眠机制。没有同步通信流量, 并且不包括任何路由选择通信, 假定存在一个路由选择协议去提供任何 2 个节点之间的最短路径。网络中的通信负载通过流量发生器(CBR)产生, 且所有的数据包都是 50 Byte 大小。中间转发节点不聚集或压缩数据。假定应用数据处理进程在每个节点都能在 SIFS 时期内完成, 数据处理不增加传输延迟。

本文比较了不带自适应侦听的 S-MAC 协议与 PRMAC 协议在 5% 占空比情况下时延、网络吞吐量和能量消耗方面的性能。在端到端传输延迟和能量消耗仿真中, 设定每个 CBR 流在每 50 s 产生一个数据包的情况下, 产生一个 100 个数据包的通信负载, 仿真运行时间是 5 500 s。而在吞吐量的仿真中, 改变了通信负载和数据包产生率, 即从每 50 s 产生 1 个数据包调整到每 50 s 产生 10 个数据包, 即 2 个数据流都是每 50 s 产生 2.5 个数据包的速率。仿真运行时间为 2 000 s。

#### 4.1 平均端到端传输延迟分析

图 3 显示了数据包传输延迟情况。仿真结果表明, 传输延迟在 S-MAC 协议和 PRMAC 协议中都是随着路径的跳数增加而增加。然而, 传输延迟在 S-MAC 中增加的速率较快, 这表明了 PRMAC 在一个单独周期内多跳传输能力较强。

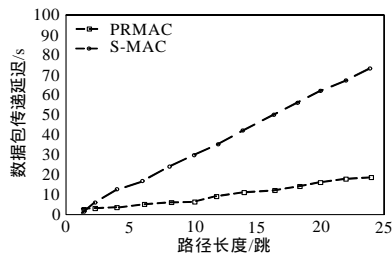


图 3 2 种协议的数据包传输延迟比较

#### 4.2 能量消耗分析

当网络中没有通信时, PRMAC 协议中的节点比 S-MAC 协议中的节点消耗的能量要低。这是因为在 PRMAC 协议中, 当没有通信时, 节点在 PION 时期之后直接进入休眠时期, 降低了占空比, 所以消耗的能量较低。当通信负载增加, PRMAC 和 S-MAC 都会增加他们的能量消耗, 但是 PRMAC 增加的速率比 S-MAC 增加的速率要小。这是因为 PRMAC 的控制帧比 S-MAC 协议简洁。对于一个数据包的多跳传输, PRMAC 协议中的传感节点传送的控制帧比 S-MAC 协议的控制帧要少一半。少的传送也意味着少的接收和串扰, 这些都增加了 PRMAC 协议的能量有效性。PRMAC 能量有效性的另一个因素是 PRMAC 中的传感器节点在数据包传输过程中不会发生串扰, 因为在数据帧传输时期, 除了相互通信的 2 个节点, 其他的节点都处于休眠模式。

2 种协议的平均能耗比较如图 4 所示。

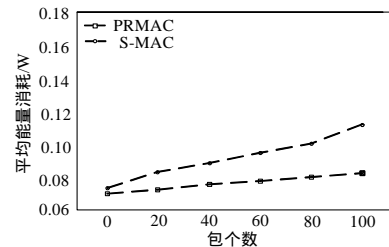


图 4 2 种协议的平均能耗比较

#### 4.3 吞吐量分析

图 5 显示了吞吐量仿真结果。当输入率很低时, PRMAC 和 S-MAC 的输出率相当, 当随着输入率增加, 输出率最终达到峰值。如果继续增加输入率, 输入会在系统中产生多个竞争并且慢慢降低吞吐量直到吞吐量达到一个稳态值。仿真结果显示, 当输入量达到一定值之后, PRMAC 协议的吞吐量明显高于 S-MAC 协议的吞吐量。

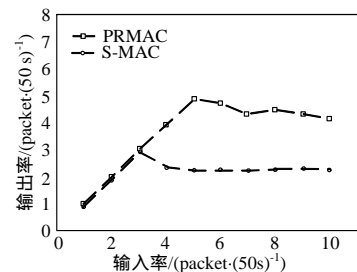


图 5 2 种协议的吞吐量比较

#### 5 结束语

本文针对占空比 MAC 协议的延迟问题, 提出一种基于跨层路由信息的低延迟 MAC 协议——PRMAC 协议。在先遣时期利用跨层路由信息的多跳传输来建立路由, 并把数据包放在休眠时期进行传输。仿真结果表明, 与 S-MAC 协议相比, PRMAC 协议保证了能量有效性, 降低了传输延迟, 提高了吞吐量。尽管 PRMAC 表现出了优势, 但仍然有很多问题留待以后进一步改进, 如 PION 帧在传输过程中可能丢失, 这将增加传输的延迟。另外, PION 机制也增加了数据包处理的复杂性等, 这些都是下一步的研究方向。

#### 参考文献

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林 闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] 孙利民, 李建中, 陈 渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 21st Int'l Annual Joint Conf. of the IEEE Computer Communications Societies. New York, USA: [s. n.], 2002.
- [4] 徐雷鸣, 庞 博, 赵 耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [5] Index of nsnam/dist[Z]. (2008-01-01). <http://www.isi.edu/nsnam/dist/>.

编辑 顾姣健