

一种基于功率控制的无线传感器网络 MAC 协议

曾斌军, 费耀平, 李敏, 陶志坚

(中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410001)

摘要: 提出了一种基于功率控制的无线传感器网络 MAC 协议, 根据节点接收阈值, 计算出节点发送最优功率, 在根本上减小发送功率从而节省节点能量。为了减少节点间的碰撞, 引入了自适应调整竞争窗口和快速退避机制, 减少节点空闲时间, 从而进一步减少节点耗能。仿真结果显示在能量和吞吐量上都有显著提高。

关键词: 无线传感器网络; 媒质接入控制; 能量效率; 功率控制

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)05-1931-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.05.094

New MAC protocol based on power control for wireless sensor networks

ZENG Bin-jun, FEI Yao-ping, LI Min, TAO Zhi-jian

(Institute of Information Science & Engineering, Center South University, Changsha 410001, China)

Abstract: This paper presented a basing on power control wireless sensor networks MAC protocol. This protocol used the node receive threshold value, then calculated the optimize transmission power. It could ultimately reduce node consume energy. In order to reduce the collision between node and the duration of the idle listening time, it added self-adaptive contention window size and fast back off scheme to make further save node energy. The result shows that the new MAC reduces the node energy consume and improves the throughput.

Key words: wireless sensor networks(WSN); media access control(MAC); energy efficiency; power control

0 引言

近年来, 传感器节点功能的增强和无线技术的发展, 推动了无线传感器网络的快速发展。无线传感器网络就是由部署在监测区域内大量廉价、低功率的传感器节点组成, 通过无线通信方式形成一个多跳的自组织网络系统, 其目的就是协作地感知、采集和处理网络中感知的对象信息, 并发送给基站^[1]。由于无线传感器网络具有易扩展性、自组织、分布式结构、健壮性和实时性等特点, 使其在军事、农业、医疗、环境监测等领域有着传统网络无法比拟的优势, 必将开发出很多有价值的应用。传感器节点体积微小, 通过电池提供能量, 加上节点数量多、成本低、分布区域大, 通常部署在比较危险或是人不能到达的地区, 所以不可能给传感器节点补充能量。如何最大化网络生命周期, 即如何高效使用能量成为传感器网络面临的首要挑战。在通信模块中, 节点的收发数据耗能最大, 所以如何减小收发数据耗能成为节省能量的方式之一^[2]。为了能准时收发数据, 节点必须有段时间进行空闲侦听, 实际上空闲侦听也占用了大量的节点能量^[3], 所以减少空闲侦听的时间也是节省能量的方式之一。基于以上原因, 本文提出了一种基于功率控制的无线传感器网络 MAC 协议。

1 相关工作

在无线传感器网络中, 介质访问控制(MAC)协议决定无

线信道的使用方式, 在传感器节点之间分配有限的无线通信资源, 用来构建传感器网络系统的底层基础结构, 对传感器网络的性能有较大影响, 是保证无线传感器网络高效通信的关键协议之一。在设计无线传感器网络的 MAC 协议时, 需要考虑如下几个方面: a) 节省能量, 由于节点由电池供电, 且不能提供再生能源, 为了提高网络生命周期, 节省能量成为设计考虑之首; b) 可扩展性, 由于节点数目多、分布密集, 有旧节点因能量耗尽而无效或是因节点加入而使网络拓扑动态变化, 协议必须适应这种变化; c) 网络效率, 包括公平性、实时性、网络吞吐量等。大量研究表明, 通信过程中主要能量浪费在冲突导致的重传、节点接收不属于自己的数据包(串音)、发射/接收不同步导致的分组空传、控制分组的开销、节点空闲侦听等^[4]。

S-MAC(sensor MAC)协议^[3]是在 802.11MAC 协议基础上, 针对能量浪费的四个方面采取了相应的措施来节省能量, 即: 通过周期性侦听/睡眠的低占空比方式, 减少节点活动时间; 通过 RTS/CTS 来消除节点间的数据传送的碰撞; 通过网络分配矢量(NAV)机制使节点在 NAV 阶段进入睡眠而减少串音现象; 通过将长消息分成几个分组发送, 减少重传需要发送的能量, 并且在控制开销上通过一次 RTS/CTS 就可以完成长分组的发送, 减少控制帧的数量。

SMAC 协议将一个时间周期分为活动阶段(active)和睡眠阶段(sleep), 将活动时间和整个周期时间的比值称为占空比(duty cycle), 公式为

收稿日期: 2009-09-07; 修回日期: 2009-10-26

作者简介: 曾斌军(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络(zengbinjun@tom.com); 费耀平(1959-), 男, 河北平山人, 教授, 博士, 主要研究方向为图形图像处理、计算机网络、模式识别、数据挖掘; 李敏(1978-), 女, 博士, 主要研究方向为生物信息学、网络、数据挖掘; 陶志坚(1978-), 男, 主要研究方向为网络、数据挖掘。

$$D = \frac{T_{\text{active}}}{T_{\text{active}} + T_{\text{sleep}}}$$

D 的大小反映了节点工作时间的长短,在无线传感器中,希望 D 尽量小来减少节点的使用时间,从而节省节点的能量,但太小的 D 带来的是很大的延迟且降低了网络的吞吐量。因此 D 的选择也要根据应用的不同而选择合适的占空比。在 SMAC 中,活动阶段又分为三部分:SYNC、RTS 和 CTS。SYNC 部分(主要包含该邻居节点下一次睡眠的时间)主要完成节点之间的同步并且相同调度的节点形成一个虚拟簇,SMAC 可扩展性也是通过 SYNC 帧发现新节点或弃除无效节点达到动态适应拓扑变化,RTS 和 CTS 阶段主要是用于收发 RTS 和 CTS。

虽然 SMAC 在节省能耗上有了很大的突破,但是节省能耗是通过牺牲传感器网络的延迟、吞吐量等,从而造成了 SMAC 在能量上有优势,但有很大的延迟和比较低的带宽利用率^[6]。由于是固定的占空比,固定的发送功率和固定的竞争窗口大小,当网络的负载很大时,由于固定的占空比使得网络的信道利用率很低,固定的竞争窗口使得冲突的概率并没有减少,固定的发射功率使得节点间的连通性过于复杂而浪费更多的能耗。

FP-MAC^[6]是在 SMAC 上改进的一个协议,主要是提高了 SMAC 的吞吐量和降低了点到点的传输延迟,通过减少占空比来达到这种要求。通过改变 SMAC 中的 RTS 和 CTS 部分,其中周期为 p 的是 FP-MAC 改进 SMAC 后的周期,可以看到,相对于 SMAC 的周期, p 比 p' 小($t_m < t_{m1}$),并且它们的睡眠时间都一样,短的周期可以减少节点间的延迟,从而在一定程度上增加网络的吞吐量。并且由于 p 比 p' 少了两个控制帧(RTS 和 CTS),减少了控制帧的开销,从而也节省了节点的能耗,如图 1 所示。

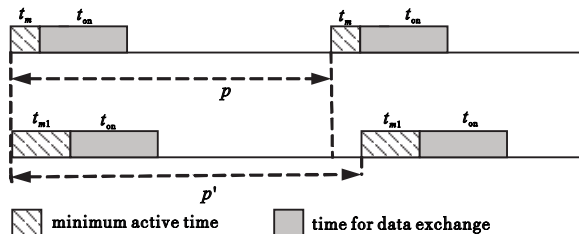


图1 短周期图

由于 FP-MAC 协议没有 RTS 和 CTS 帧,就无法控制节点间的冲突和串音等。通过引入简单退避机制来尽可能地减小冲突的概率。它的工作方式与 SMAC 有点不同的是,当节点 A 有数据要发送至 B 时,由于没有 RTS 和 CTS 帧,在节点 A 侦听到 B 发送来的 SYNC 消息时,就开始侦听信道,如果信道空闲,完成了退避时间后就发送数据给 B,收到 B 发送的确认帧时,就认为数据成功发送,节点重新进入睡眠。由于 B 是采用简单的退避机制(即二进制指数退避机制 BEB),该机制不能很好地适应网络负载较大的环境,只是通过简单地侦听忙就加倍竞争窗口,成功发送一个数据就将竞争窗口变为最小。当网络负载很大时,窗口过大,使得节点的退避时长过长,增加延迟和节点侦听时间;窗口过小,使得节点在碰撞后,选择新的退避时间又与旧的时间产生二次冲突,不但减小了吞吐量,增加了延迟,而且过多的碰撞使得节点频繁地重传数据重传,造成网络的信道利用率非常低。其在发射功率上与 SMAC 一样,采用固定发射功率。

2 协议描述

针对 SMAC 和 FP-MAC 协议的不足,提出了一种基于功率控制的 MAC 协议(power controlled short periodic MAC, PCSP-MAC),主要是通过以下几个机制来解决以上的不足:首先,将功率控制引入到 PCSP-MAC 中,通过调整节点发射功率,以最优的功率值来达到节省节点能量,并且减少冲突范围的目的;其次,通过减少 RTS 和 CTS 帧,改变 SYNC 帧的结构,得到节点的相关数据来计算节点的最优发射功率,并且减小了控制帧的数量,在一定程度上也减小了节点的能量;然后,通过引入一个参数(C_{busy}),将竞争窗口的抖动性变得平滑,使得竞争窗口的大小在网络负载很大时,自适应地将窗口调整到合理值。

2.1 最优发射功率

使用发射功率控制可以控制干扰,其基本思想是调节发射机的发射功率,在满足通信质量要求的前提下,使得在接收机处的接收功率尽量小^[7]。发射功率的大小影响着网络的连通性和网络拓扑等,大的发射功率使得节点将数据传输到基站需要的跳数减少,减小了时延,但由于覆盖的范围大,使得在该范围内节点间冲突的概率增加,抑制了其他节点的通信,从而减小了网络的整体吞吐量。小的发送功率可以减少节点间的相互影响,增加带宽利用率,但节点之间传输延迟会增长,所以发射功率大小的选择直接影响着网络的性能^[8]。本文选择最优发射功率值作为发射功率,根据电磁波在自由空间传播损耗的 Friis 公式,可得到接收端功率:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

其中: P_t 为发送端天线发射功率; G_t 、 G_r 分别为发射、接收天线增益; λ 为波长; d 为发射端到接收端的距离; L 为传播损耗因子($L \geq 1$)。节点通过侦听信道中的能量强度来判断是否有数据在信道中传输。当侦听到的能量强度高于节点的接收门限阈值 P_t 时,则说明信道中有数据在传输,接收节点能够正确接收信道内的数据。由此可得出发送节点所需的最小发射功率:

$$P_m = \frac{R_t L d^2 (4\pi)^2}{G_t G_r \lambda^2} \quad (2)$$

其中: R_t 为接收节点的接收门限阈值, P_m 为发送节点所需的最小发射功率。

由式(1)(2)可得

$$P_m = \frac{R_t P_t}{P_r}$$

由此,根据已知的数据 P_t 、 R_t 以及 P_r 就可以计算出发送节点所需的最小发送功率值 P_m 。考虑到信号在空间中的传输损耗,保证数据的可靠传输,必须将 P_m 乘以一个系数 c ($c \geq 1$)。得出了 P_m 后,就把 $P_{\text{optimal}} (c P_m)$ 作为节点的最优发射功率值^[9]。

2.2 自适应调整竞争窗口算法

S-MAC 协议采用的退避算法是二进制指数退避算法(BEB),只是其窗口大小 CW 是固定的。BEB 算法中的窗口调节和退避时长确定如下:

$$CW \leftarrow CW_{\min}, (\text{initialization});$$

$$CW \leftarrow \min(2 \times CW, CW_{\max}), \text{if}(\text{busy});$$

$$CW \leftarrow CW_{\min}, \text{if (idle)};$$

$$B = \text{random}(0, CW - 1) \times \text{SlotTime}$$

其中: CW 为竞争窗口大小, B 为退避时间, $\text{random}(0, CW - 1)$ 为在当前竞争窗口中的随机值。

当多个节点因同时完成退避后而发送自己的报文时,就会有碰撞发生。每当节点发送失败(如遇到 ACK 确认超时),则默认为网络中节点之间对信道的竞争程度加剧(发生了碰撞),因此,节点将当前的竞争窗口值 CW 加倍,直至达到最大门限值 CW_{\max} 。由于退避计数器的值 B 是由在 $0 \sim CW - 1$ 间随机选取的整数来决定的,所以节点在下一次发送之前更有可能选择较长的退避时间。从网络角度来看,在某一空闲时隙有多个节点同时发送的概率减小了,从而在一定程度上降低了冲突概率。每当节点成功发送一个报文,则又默认为信道竞争程度降低了,因此节点将 CW 重置为最小值 CW_{\min} 。

BEB 算法存在的一个问题是在某一小段时间内,它总是有利于前一次成功发送的节点短时间内再次竞争信道,从而造成小时间尺度上的不公平性现象,短程不公平现象是由于 CW 变化过于剧烈而造成的。BEB 的另一个问题是当网络中只有一个活跃节点(不存在报文碰撞问题)时,其竞争窗口 CW 始终等于 CW_{\min} (过大),仍然需要平均退避 $CW_{\min}/2$ 个时隙才能发送一个报文;而当网络节点数较多时,节点每次成功发送后都将 CW 重置为 CW_{\min} (过小),这又会引起新的碰撞。算法参数不能随网络状况而改变造成了资源浪费。

鉴于 BEB 的不能自适应网络负载的变化,通过引入一个参数 C_{busy} 来记录在退避过程中的碰撞次数,每次监测到碰撞就增加 1,将 C_{busy} 和一个设定的阈值 $l_{\text{threshold}}$ 相比较,如果 $C_{\text{busy}} > l_{\text{threshold}}$,则认为网络中冲突的次数太多,表示了网络需要传输数据的节点多,即网络负载较高,当前竞争窗口过小,在较小的窗口内有较多的节点竞争信道,引起频繁的碰撞。BEB 算法成功传送一次就将 CW 重置为 CW_{\min} ,使得竞争窗口抖动性太大,二次冲突概率加大。本算法不是简单地将 CW 重置为 CW_{\min} ,使得窗口的抖动性更小,变化更平滑。如果 $C_{\text{busy}} < l_{\text{threshold}}$,表明网络负载较低,成功传送一次数据窗口将减小一半,如果连续几次成功发送数据,就将窗口大小置为 CW_{\min} 。其中 α 为一个小于 1 的系数。在网络负载较高时,不想 BEB 将 CW 减半,而是将窗口大小变为 αCW_{\min} ,窗口的减小相对于 BEB 显得更平滑,并且由于减小后的 CW 值不会因为急剧减小而造成频繁的碰撞。 β ($\beta \geq 1$) 的系数,当网络负载较小时,当侦听到信道忙时,将 CW 变为 $\geq \beta CW$,其相对于 BEB 的指数增长使窗口快速增大而言,有着更合适的窗口大小。因为负载较小,需要传送数据的节点比较少,太大的窗口必然导致节点需要过长的退避时间而浪费节点的能量,并且增加节点间的延迟。当节点连续侦听到 counter 次空闲后,认为此时信道比较好,将 CW 置为 CW_{\min} ,如下所示。其中: C_{busy} 表示当前信道忙的累积次数; $l_{\text{threshold}}$ 表示一个阈值; counter 为计数器; α, β 为一个常系数。自适应调节窗口算法如下:

```

if  $C_{\text{busy}} > l_{\text{threshold}}$ 
     $CW = \min(CW_{\max}, \alpha CW)$ ; if (success)
     $CW = \min(2 \times CW, CW_{\max})$ ; if (busy)
els
if  $CW > CW_{\min}$ 
    counter ++ ;
    
```

```

 $CW = \max(CW_{\min}, (CW + 1)/2 - 1)$ ;
if counter > max_counter
     $CW = CW_{\min}$ ;
    counter = 0;
 $CW = \min(CW_{\max}, \beta CW)$ ; if (busy)
    
```

2.3 扩展的 SYNC 消息

SYNC 消息机制的作用与 SMAC 的同步消息机制差不多,只不过在原来的基础上增加了一些字段来达到功率控制的目的,将原来的 SYNC 结构增加两字节,用于存储发送同步消息节点的发射功率值。由于采用了扩展的 SYNC 消息机制,并且减少了 RTS 和 CTS 帧,使得节点在侦听阶段比 SMAC 侦听阶段在控制帧的开销上要节省将近 2/3。

当节点有数据需要发送时,首先在节点的调度表中找出需要接收节点的唤醒时间,在得到目的节点的唤醒时间后,在目的节点发送同步帧之前打开收发器进行信道侦听,一旦接收到目的节点的 SYNC 消息后,发送节点从目的节点的消息帧中提取 P_i 的值,根据最优发射功率算法,算出发送数据需要的最优功率值,再随机选择一个退避时间,当退避的时间耗完后,物理层就进行载波侦听,来确定信道是否空闲,如果空闲,则开始传送数据。其他竞争节点侦听到信道忙后,根据侦听到的信道,从中提取出分组的长度,从而知道该次通信需要的时间,并且关闭收发器,待通信完后再打开收发器,选择一个新的退避窗口。为了提高网络的信道利用率和减小数据延时,所有节点在发送完 ACK 帧后,不是立即将收发器关闭,而是继续侦听一段时间,如果节点在这段时间侦听到别的 SYNC 消息,并且接收节点为自己,则继续接收数据,使得节点不必等到下一周期才发送数据,降低了延时,如图 2 所示。

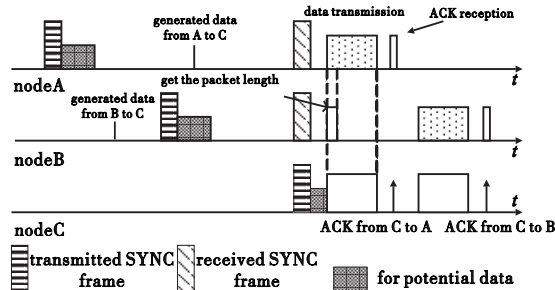


图2 PCSP-MAC中的收发数据

当节点 A、B 都有数据需要发送给 C,在节点 A 竞争到信道后,节点 B 侦听到信道忙后,提取分组中的数据长度得出通信需要的时间,当传输结束后,由于 C 不是立即关闭收发器, B 选择了新的退避时间,如果信道空闲,则发送数据至 C。通信完后,节点进入睡眠状态。

3 实验结果与分析

利用 NS2 仿真平台验证本协议,为了测试 PCSF-MAC 的性能,将本协议与 SMAC 和 FP-MAC 在能量的消耗、冲突的次数、吞吐量三个方面进行比较,从而评估出 PCSF-MAC 的性能。

3.1 实验设置

在仿真实验中,本文采用与 SMAC 相同的拓扑结构,由五个节点组成的交叉型拓扑结构如图 3 所示, A 和 B 为源节点, C 为中转节点, E 和 D 为汇聚节点。

在仿真中,通过调节源节点产生数据的快慢来表示网络中负载的变化。在每种流量情况下,独立地仿真 10 次,然后取平均值作为最后的结果,仿真时间为 1 000 s。其他一些重要的

参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of nodes	5	Power for reception/W	1.0
Maximum transmission range/m	250	Power for idle/W	1.0
Traffic type	CBR traffic flow	Power for sleep/W	0.001
Packet length/Byte	1 000	Power for sleep/idle transition/W	0.2
SMAC duty cycle/%	10	Time for sleep/idle transition/s	0.005
Power for transmission/W	2.0 (for 250 m)		

3.2 实验结果

按照图 3 的拓扑进行仿真,首先对三种协议的冲突次数进行分析,如图 4 所示,在网络负载较小时,PCSP-MAC 和 FP-MAC 大致相同,由于 PCSP-MAC 采用了功率控制,使得节点的影响半径变小,从而使得 PCSP-MAC 在负载较小时,比 FP-MAC 在节点的冲突次数上少将近 10%。随着网络负载的增大,当负载大于 4 (packets/s) 时,会发现 FP-MAC 开始超过 S-MAC,冲突曲线变化加剧,因为 FP-MAC 在冲突避免的措施中,只是应用了简单的退避算法,并且没有 S-MAC 中的 CTS 控制帧来抑制其他节点,从而使得在负载较大时比不上 S-MAC,在退避算法上,S-MAC 和 FP-MAC 的竞争窗口都是固定的,当网络负载增大时,太小的窗口会引起节点的再次碰撞,造成网络在该阶段碰撞加剧。由于 PCSP-MAC 在退避阶段采用了自适应窗口调节机制,当负载比较大时,自动调整竞争窗口的大小,使得竞争窗口变大,减少冲突的可能性。使用自适应调节竞争窗口算法,使得节点窗口大小适中,维持在一个合理的大小,避免了节点的频繁冲突,使得冲突的次数比 S-MAC 要少 15%。

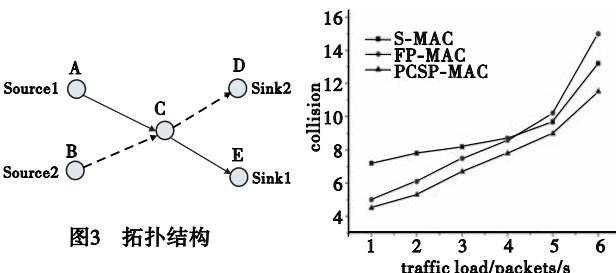


图 3 拓扑结构

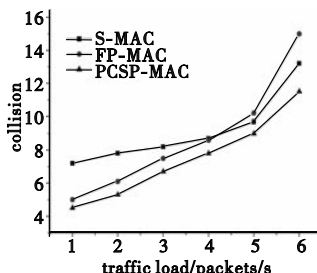


图 4 不同负载下的冲突次数

图 5 为不同负载下的网络吞吐率。网络负载比较小时,由于 PCSP-MAC 采用了功率控制和自适应调节竞争窗口的大小,节点间的相互影响减少,在退避时间上比 FP-MAC 的要小,而 S-MAC 的周期时间比这两种协议都要长,并且竞争窗口固定,使得在网络负载小时,吞吐率比较低。当小于 3 (packet/s) 时,此时网络负载不太大,由于 S-MAC 采用了固定的空占比,使得节点不能很好地适应负载的变化,从而它的吞吐率比较低;PCSP-MAC 采用了三种技术来动态适应网络负载的变化,所以在负载较小时,对比 S-MAC,吞吐率也将近提高了 25%。当网络负载较大时,如大于 4 (packets/s) 时,三种协议的吞吐率大致相同,约为 93%,主要是负载较大时,节点间碰撞加剧,冲突导致的重传使得信道的利用率趋近饱和,从而使得吞吐率在该阶段几乎不变。

图 6 为不同负载下的网络耗能情况。PCSP-MAC 和 FP-MAC 协议由于具有较小的空占比,网络耗能都小于 S-MAC。

这是因为 S-MAC 采用了固定的空占比,在网络负载比较大的时候,固定的空占比成为了降低节点能量的瓶颈问题,在负载很大时,希望节点能尽量处在活动状态,提高节点的发送时长,降低网络的时延,增大网络信道的利用率。所以在网络负载较大时,PCSP-MAC 使用了自适应调节竞争窗口机制,使得在网络负载较大时,竞争窗口也随之增大,让节点选择在同一时间发送数据的概率减少,使得冲突要比 S-MAC 少。相对于 FP-MAC 来说,PCSP-MAC 通过引入了功率控制,使得节点的发射功率减小,减小节点的传输影响半径,进一步减少了节点相互影响,缩小了节点在同一时刻发送数据的可能,所以本协议在网络负载较大时也比 FP-MAC 协议要节省 15% 左右的能耗。

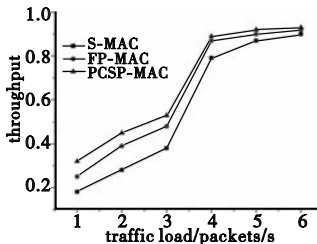


图 5 不同负载下的网络吞吐率

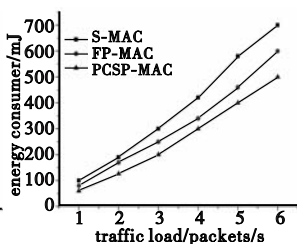


图 6 不同负载下的能耗

4 结束语

本文提出一种基于功率的无线传感器网络媒质接入控制协议(PCSP-MAC),在 FP-MAC 的基础上引入了功率控制来优化节点的发射功率,通过动态调整节点竞争窗口大小,使得窗口的大小能够自适应网络负载的变化,窗口的大小维持在一个合理的范围内,减少节点间的二次冲突;修改了 SYNC 消息帧,使得在每次广播 SYNC 消息时,节点都可计算出最优的发射功率。PCSP-MAC 降低了节点的占空比,使得节点的活动时间减少,延长了网络生命周期。仿真结果显示,PCSP-MAC 在网络负载较大时,吞吐率方面没有很大的改善,但在冲突概率和能耗上达到了理想的结果。

参考文献:

- [1] 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,2005:120-250.
- [2] AKYILDIZ I, SU W, CAYIRICI E. A survey on sensor networks [J]. IEEE Trans on Communications,2002,40(8):102-114.
- [3] YE Wei, HEINEMANN J, ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans on Networking,2004,12(3):493-506.
- [4] CARDEI M, THAI M, LI Ying-shu, et al. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks [C]//Proc of the IEEE INFOCOM. Miami:IEEE Computer Society,2005:1976-1984.
- [5] CHANGSU S, YOUNG-BAE K. A traffic aware, energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proc of International Symposium on Circuits and Systems. New York: IEEE Computer Society,2005:2975-2978.
- [6] GRAGOPOULOS I, KARAPISTOLI E, PAVLIDOU F. FP-MAC: a distributed MAC algorithm for 802.15.4-like wireless sensor networks [J]. Ad hoc Networks,2008,6(6):953-969.
- [7] KAWADIA V, KUMAR P. Principles and protocols for power control in wireless Ad hoc networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2005,23(1):76-88.
- [8] NAR P, CAYIRICI E. PCSMAC: a power controlled sensor-MAC protocol for wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE EWSN 2005. Piscataway: IEEE Computer Society, 2005.
- [9] 李方敏,徐文君,高超.一种适用于无线传感器网络的功率控制 MAC 协议[J].软件学报,2007,18(5):1080-1091.