

MAC Protocol Design for Bone Network of Layer WSN*

MA Tao¹, SHAN Hong^{1*}, CHEN Juan²

(1. Department of Network Engineering, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Third Department, Army Officer Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: To the characteristics of great data traffic and high load of bone WSN, GBN-MAC is designed from three aspects including less collision, lower retransmission spending and timing dormancy. In this protocol, the radio of nodes is turned off when the node has heard a RTS (Request To Send) or fragment data frame. Temporary communication identification is used to reduce overhead made by data fragment. Simulation analysis shows GBN-MAC can keep high throughput under high load with energy saving at the same time.

Key words: wireless sensor network; MAC protocol; temporary communication identification; sleep scheduling; reducing energy

EEACC: 6150P; 6210Q

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.010.024

层次无线传感器网络中骨干层 MAC 协议设计*

马涛¹, 单洪^{1*}, 陈娟²

(1. 合肥电子工程学院网络工程系, 合肥 230037; 2. 合肥陆军军官学院三系, 合肥 230031)

摘要: 针对层次无线传感器网络中骨干层数据量大、高负载的业务特点, 从减少冲突碰撞概率、降低重传开销和适时休眠三个方面考虑设计了一种骨干层 MAC 协议 (GBN-MAC)。GBN-MAC 根据节点收到的 RTS (Request To Send) 帧和分片数据帧进行休眠, 使用临时通信标识符降低分片传输的额外开销。仿真结果表明在高负载下, GBN-MAC 协议能够在基本保持网络时延和吞吐量的情况下明显降低能量消耗, 可以较好地满足骨干层设计要求。

关键词: 无线传感器网络; MAC 协议; 临时通信标识; 休眠调度; 降低能耗

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)10-1452-06

无线传感器网络就是由大量部署在监测区域内的廉价微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织网络体系。无线传感器网络能够广泛应用于军事、环境监测和预报、健康护理及智能家居等各领域^[1]。无线传感器网络 MAC 层协议决定了无线信道的使用方式, 根据研究表明, 传感器网络的能量绝大部分消耗在节点间的无线通信上^[2]。一般认为, 无线传感器网络的功耗性能是其最主要的性能指标之一^[3]。因此, 设计出高效的 MAC 协议, 使它能够在合理地分配信道, 对降低网络能量消耗、延长网络使用寿命十分重要。一种简单而有效的节能方法是通过增加节点的休眠时间来节省能量, 基于这种思想, 人们提出了一些有效节能的 MAC 层协议, 其中以 S-MAC 最具有

代表性^[4]。

目前, 研究人员在 S-MAC 协议基础上, 针对无线传感器网络能量有限问题提出了多种能量高效的 MAC 层协议^[5]。文献[6]提出的 T-MAC 协议对 S-MAC 协议的固定占空比问题提出了一种解决方案, 它在保持周期长度不变的基础上, 根据通信数据量的不同动态的调整活动时间, 以突发方式发送信息, 减少空闲侦听时间。文献[7]针对 S-MAC 协议边界节点消耗能量过多现象提出了一种利用调度表的全网同步策略实现簇的合并来消除边界节点。文献[8]在 S-MAC 协议及其改进方案的基础上, 针对目前 S-MAC 协议存在的不足, 提出了几点不同的改进方法。对消除边界节点和占空比动态调整方面进行了有益的尝试。

本文根据所设计层次无线传感器网络的骨干层通信数据量大、网络负载较重的特点,设计了一种用于骨干层的 MAC 协议 GBN-MAC。协议使用临时通信标识符降低了分片传输的额外开销,用适时的休眠减少了串听带来的能耗。

1 模型及协议设计要求

层次无线传感器网络模型采用文献[9]中的网络模型。该网络模型分为基础层和骨干层,文献对基础层 MAC 协议的设计方法进行了仿真分析,本文重点研究骨干层的 MAC 协议设计。

网络模型中,骨干层网络具有以下特点:

(1)骨干节点数量较少,分布范围广,因此骨干层网络拓扑较稀疏,每个节点可能只有两三个直接相邻的邻居节点。

(2)骨干节点的数据传输距离比普通节点远,达到一二百米,在充满噪声的无线信道,传输距离的增长增大了信号出错的概率。

(3)骨干层网络上传输的数据较大,网络负载较重。骨干节点产生的数据是对其管理范围内所有节点报告信息的汇总和融合,可能达到成百上千字节。

(4)数据业务在各节点对之间都可能存在。

因此,骨干层网络的 MAC 协议需要在节约能源、延长网络生存时间的同时,保证网络具有较大的吞吐量和较小的时延。

2 骨干层 MAC 协议(GBN-MAC)设计

2.1 GBN-MAC 的节能方法

针对骨干层数据量大、网络高负载的业务特点,设计了骨干层 MAC 协议(GBN-MAC),该协议能够在保持高效网络性能的同时提高能量效率。GBN-MAC 主要从减少冲突碰撞的概率、降低重传的开销和适时的休眠这三个角度降低能量消耗。

(1)冲突预防和冲突解决

GBN-MAC 采用载波侦听避免通信干扰,但节点有限的载波侦听范围带来了隐藏终端和暴露终端的问题^[10-11]。因此,GBN-MAC 协议采用 RTS (Request To Send)-CTS (Clear To Send)握手机制为数据传输预约信道,减轻隐藏终端影响。对于发生的冲突,使用二进制指数回退算法,动态的适应网络负载变化,由于骨干层网络拓扑比较稀疏,GBN-MAC 竞争窗口的范围设为 4~16。

(2)分片

分片是降低重传代价的有效手段。GBN-MAC 使用 SMAC 中的方法,RTS、CTS 帧以及每个数据分

片和 ACK 帧都为剩下的待传输的所有分片和 ACK (Acknowledgement) 预约时间,保证一个长帧的传输只需一次握手过程,每收到一个分片就发送一个 ACK,减少冲突碰撞的概率。

(3)使用临时通信标识符

将长数据分片传输能够降低冲突重传的代价,但是同时,由于每个分片数据帧首部和 ACK 帧的开销,增加了传输的字节数量,为了尽量降低分片传输带来的额外开销,GBN-MAC 协议使用通信标识符代替源和目的节点的复用 MAC 地址。

通信标识符可以是永久的或临时的。永久的通信标识符需要单独的协议分配,要耗费一定时间和能量。GBN-MAC 协议利用 RTS-CTS 握手过程,协商临时通信标识符,在之后传输的数据分片和 ACK 帧中,以商定的通信标识符标识本次通信,代替原来的源与目的复用 MAC 地址。在 GBN-MAC 中,使用数据发送方的复用 MAC 地址作为临时通信标识符来保证通信标识符不重复。

(4)适时的休眠

骨干层节点长期存在较大的数据业务,为了减少因休眠降低的网络性能,GBN-MAC 没有使用固定周期的休眠,而是让节点根据网络分配向量 NAV (Network Allocation Vector)进行休眠。当节点串听到别的节点的帧之后,会根据帧中预约信道的信息设置 NAV,串听到 RTS 和单播数据的节点在设置 NAV 之后,如果 NAV 的值大于一个阈值 t_{sleep} 就进入休眠状态,待 NAV 计时器减为 0 后再激活;串听到 CTS 和 ACK 帧的节点则只设置 NAV 而不进入休眠。这么做的理由是:串听到 RTS 和数据分片的节点处在发送节点的发射范围内,在发送节点的发射过程中几乎会一直处在接收状态,也没有机会收到别的节点的信息,这段时间的能量消耗是可以避免,并且基本不会影响之后的通信,因此可以让这些节点的无线射频装置进入休眠状态。串听到 CTS 和 ACK 帧的节点,在源和目的节点通信的过程中,可能大部分时间处在空闲侦听状态,有机会接收其他相邻节点发送的数据,从这些数据中可以知道其他相邻节点的通信状态,并更新自己的 NAV,如果错过这些分组,再次激活后的节点可能会干扰别的节点正常传输。设置阈值 t_{sleep} 是为了避免短时间内频繁的激活/休眠无线射频装置,因为射频装置从休眠状态转换到发射/接收状态需要时间,GBN-MAC 中将这个阈值设为 20 ms。

2.2 GBN-MAC 协议帧格式

GBN-MAC 协议的控制帧有 RTS、CTS、ACK 帧,数据帧有单播数据帧 Unicast Data 和广播数据帧

Broadcast Data, 格式如图 1 所示。

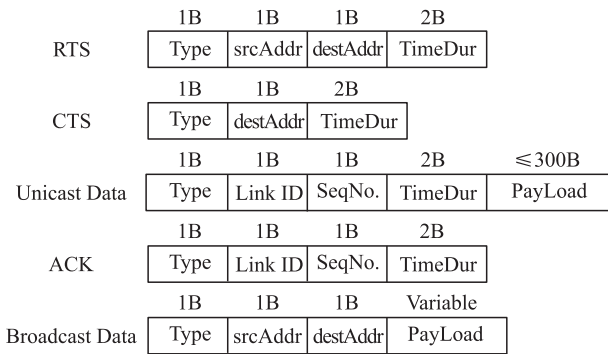


图 1 GBN-MAC 协议帧格式

每个帧的第 1 个字节是帧类型字段。源和目的节点的复用 MAC 地址各为 1 个字节。对于拓扑稀疏的骨干层网络,用 1 个字节表示每个节点的 MAC 地址。Link ID 字段填入临时通信标识符,也就是发起数据通信节点的 MAC 地址。SeqNo. 字段用来区分分片后的每个数据片,最多支持 127 个分片数据。TimeDur 字段表示传输剩余数据需要的时间。单播帧的数据负荷不超过 300 byte,大于这个值的数据要进行分片。广播的数据不分片,不使用通信标识符。

2.3 GBN-MAC 协议流程

GBN-MAC 协议的通信过程如图 2 所示。当侦听信道空闲 DIFS 时间后,随机等待一段退避时间,竞争到信道的节点用 RTS 分组为所有的分片数据预约信道,收到 RTS 和分片数据帧的节点根据帧中的时间指示休眠以节约能量。

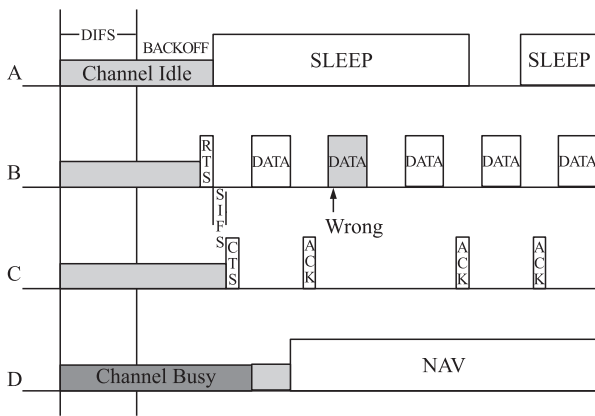


图 2 GBN-MAC 协议流程图

有数据要发送的节点要等待信道空闲时间超过 DIFS,进入随机退避状态竞争发送。图 2 中节点 B 竞争到信道,发送 RTS 帧,节点 C 回应 CTS 之后进入数据传输阶段。节点 A 没有竞争到信道,根据收到的 RTS 设置 NAV 之后进入休眠状态,C 的邻居节点 D 由于信道繁忙没能正确收到 CTS,但在收到 ACK 后依然能够设置 NAV,进行虚拟载波侦听。在

数据传输过程中,有几个数据分片出现了错误,节点 B 进行了重传。因此当休眠的节点 A 激活之后 B 和 C 的传输还未结束,在收到分片数据分组后,根据剩余未传的数据数量的多少,节点 A 可能保持侦听或再次休眠一段时间,而节点 D 由于一直侦听到 C 的 ACK 分组,能及时调整 NAV。

3 GBN-MAC 协议仿真实验与结果分析

3.1 仿真实验参数设置

利用 QualNet5.0 对 GBN-MAC 进行了建模,并建立仿真实验验证其性能。计算能耗时参照 CC2500 的相关参数,如表 1 所示。其中, I_{tx} 、 I_{rx} 、 I_{sleep} 分别表示节点通信模块处在发送、接收和休眠状态时的工作电流,U 表示通信模块的工作电压,通信模块空闲状态时的电流等于接收状态时的电流,即 $I_{idle} = I_{rx}$ 。带宽 250 kbit/s,节点发射范围 212 m,仿真时间 1 000 s。由于节点无移动性,拓扑在网络形成后一段时间能保持不变,实验中使用静态路由由减少路由协议的影响。应用层用恒定比特速率 (CBR) 的数据流测量时延和吞吐量等性能,骨干层网络传输的主要是大的数据,设置分组大小为 1 000 byte。每个场景取不同参数时独立运行 10 次,统计结果为 10 次运行结果的平均值。

表 1 GBN-MAC 主要实验参数

参数	数值	参数	数值
I_{tx}	21.6 mA	bandwidth	250 kbit/s
I_{rx}	15.6 mA	radio_range	212 m
I_{sleep}	900 μ A	Sim Time(T_{sim})	1 000 s
U	3 V	Packet Size	2 000 byte

能耗的比较上,由于不同协议的性能表现有差别,在一次实验中收发的比特数不同,有的协议可能只是因为收发的数据少才具有较低的总能耗,因此不考虑收发的数据量只比较总能耗是不够公平的。本文主要比较成功收发每个字节的平均能量消耗。设 E_{nodes} 是一次实验的总能耗,应用层成功接收的总字节数为 S_{Bytes} ,那么每字节能量消耗 e_{Byte} 可表达为: $e_{Byte} = E_{nodes} / S_{Bytes}$,相当于应用层成功收发一个字节的能量代价。

QualNet 仿真软件可以统计每次仿真实验中节点处在接收、发送、休眠和空闲四种状态各自占仿真时间的比例 P_{rev} 、 P_{tx} 、 P_{sleep} 、 P_{idle} ,因此总能耗可以用如下公式计算:

$$E_{nodes} = E_{Rcv} + E_{Tx} + E_{Idle} + E_{Sleep}$$

$$= T_{sim} \times (P_{rev} \times I_{rx} + P_{tx} \times I_{tx} + P_{idle} \times I_{idle} + P_{sleep} \times I_{sleep}) \times U。$$

3.2 仿真实验与分析

(1) 实验 1

为了说明有固定激活/休眠周期的 MAC 协议在网络负载较大的时候会影响时延和吞吐量等性能,在实验一中用如图 3 所示的拓扑场景,比较 SMAC 与 GBN-MAC 在一定的网络负载下的性能表现。

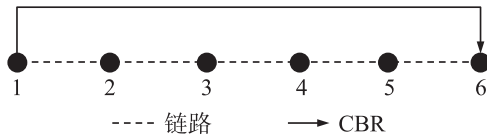


图 3 GBN-MAC 实验一场景

节点 1~6 排列成链式拓扑,相邻节点相距 200 m。节点 1 向节点 6 的发送恒定比特速率的数据,数据大小 1 000 字节,通过改变分组发送间隔改变网络负载,仿真时间 1 000 s。激活/休眠周期对 SMAC 的性能有影响,因此在不同链路负载下改变 SMAC 的激活/休眠周期,测试其性能。GBN-MAC 不是周期性的休眠,是根据控制分组休眠的,没有改变休眠周期的情况。当分组发送间隔分别为 0.5 s 和 0.3 s 时,链路负载率分别约为 12.8% 和 21.3%,这两种情况下两种 MAC 协议的时延、吞吐量、网络总体能耗与每字节能耗的实验结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 链路负载率为 12.8% 时 SMAC 与 GBN-MAC 的性能比较

激活/休眠周期/s	时延/s	吞吐量/(bit·s ⁻¹)	总能耗/mJ	每字节能耗/mJ
0.1	0.56713	32002	484655	0.12497
0.2	2.75046	75.6	93253.9	10.1363
0.3	6.38285	105.2	94728.1	7.40063
SMAC 0.4	8.1971	79.4	94075	9.7995
0.5	10.7171	79.4	94517.7	9.84559
0.6	12.8371	79.4	95006.8	9.89654
1.0	22.3171	79.8	97151.2	10.1199
GBN-MAC	0.340473	31997.5	1498969	0.386492

表 3 链路负载率为 21.3% 时 SMAC 与 GBN-MAC 的性能比较

激活/休眠周期/s	时延/s	吞吐量/(bit·s ⁻¹)	总能耗/mJ	每字节能耗/mJ
0.1	1.75859	154.8	95812.8	5.09642
0.2	4.13714	79.2	93614.3	9.75149
0.3	6.25714	79.2	93727.4	9.76328
SMAC 0.4	8.5771	79.4	94075	9.7995
0.5	11.0971	79.4	94517.7	9.84559
0.6	13.2171	79.4	95006.8	9.89654
1.0	22.6971	79.8	97151.2	10.1199
GBN-MAC	0.337335	52984.5	1459110	0.261156

从表 2 可以看出,仅当 SMAC 的休眠调度周期

为 0.1 s 时,它的时延、吞吐量和每字节能耗的性能才和 GBN-MAC 相近。当网络负载比较重时,SMAC 的时延和吞吐量性能都不如 GBN-MAC (表 2,表 3)。随着激活/休眠周期的延长,SMAC 时延迅速增长,吞吐量降低到较低水平。虽然 SMAC 协议的总体能耗较低,但由于其吞吐量较低,实际每个成功发送的字节能耗是很大的。

实验 1 表明,有固定激活/休眠周期的 SMAC 协议在网络负载较重的网络中应用时,固定的休眠调度会增加网络的时延、降低吞吐量,使每个成功收发的字节能耗较大。骨干层网络主要是大数据量通信,网络负载较重,不适合使用有固定休眠调度的 MAC 协议。GBN-MAC 只在收到 RTS 帧或分片的数据帧时才进入休眠,使网络具有较低的时延和较高的吞吐量,特别当网络负载较重的时候,由于吞吐量较大,实际每个成功收发的字节的能耗很小。

(2) 实验 2

实验 2 的目的是测试网络负载变化时,休眠对 GBN-MAC 性能的影响。设置三种不同的场景,如图 4 所示。

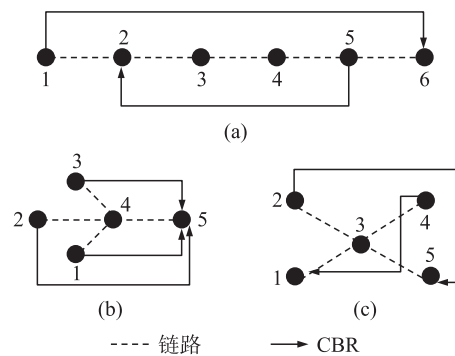


图 4 GBN-MAC 实验二的三种场景

图 4(a) 中节点 1~节点 6 依次排列,相邻节点相距 200 m,节点 1 向节点 6 发送 CBR 数据,节点 5 向节点 2 发送 CBR 数据,从第 10 s 开始发送,数据分组大小 1 000 byte。

图 4(b) 中,节点 1、2、3 与节点 4 相距 200 m,节点 4 与节点 5 相距 200 m,节点 1、2、3 通过节点 4 向节点 5 发送 CBR 数据,三个节点都从第 10 s 开始发送数据。

图 4(c) 的场景中五个节点成 X 状分布,节点 3 与其他四个节点相距 200 m,节点 2、4 从第 10 s 开始通过节点 3 分别向节点 5、1 发送 CBR 数据。

骨干层网络是拓扑稀疏的网络,图 4 的 3 种场景分别模拟在一个稀疏拓扑中可能出现的 3 种典型情况。由于是稀疏网络,可能几个节点之间的通信只存在一条路径(图 4(a)),没有多路径可选;也可

能存在一个连通两部分节点的关键节点(图4(b)、图(c)),因此实验二测试这3种典型场景下网络负载变化时,休眠对GBN-MAC协议性能的影响。

图5是3个场景分别取不同的分组发送间隔时GBN-MAC与不休眠的GBN-MAC在时延、吞吐量和每字节能耗上的性能比较。

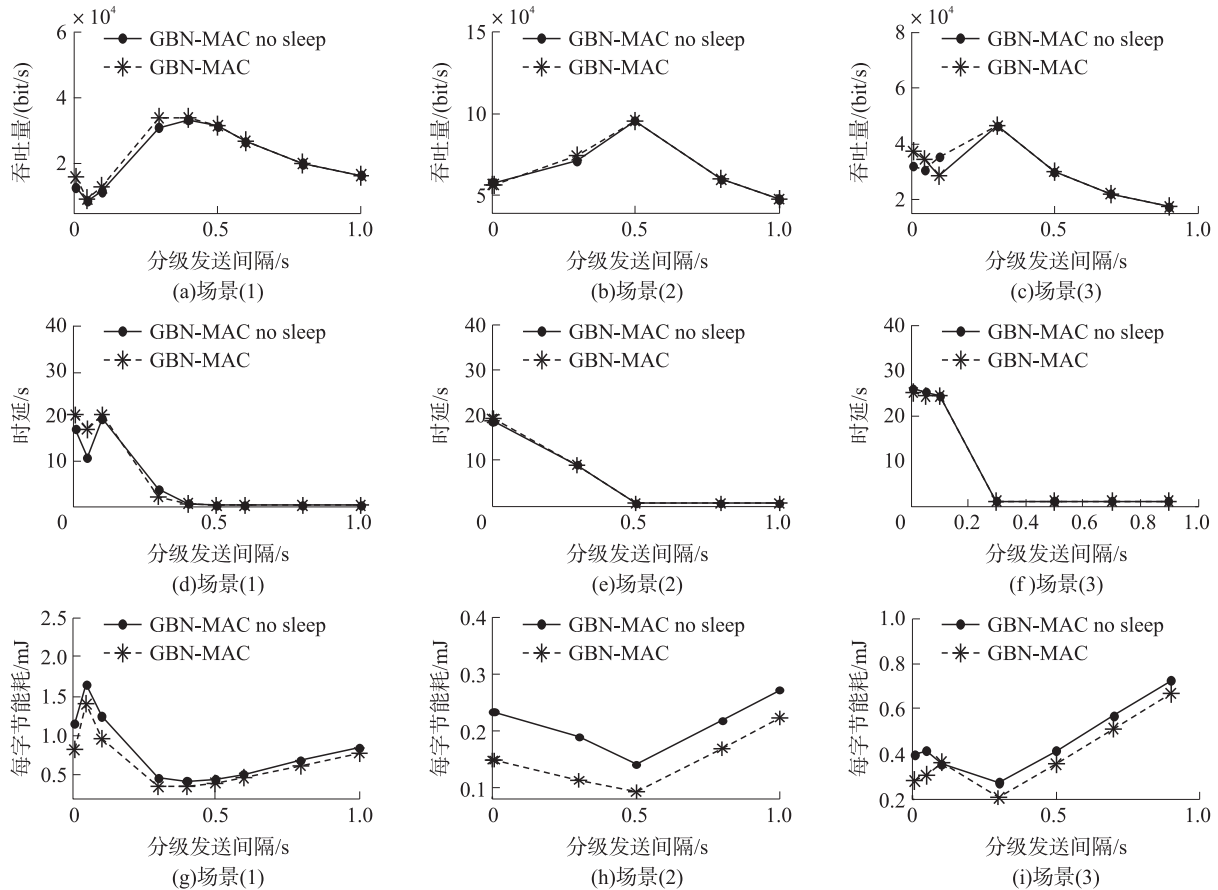


图5 GBN-MAC 实验二仿真结果

从图5(a)~图5(f)可以看出,当网络负载较轻时,GBN-MAC中使用的基于RTS和分片数据帧的休眠几乎不影响网络的吞吐量和时延的性能。当分组发送间隔的减小网络负载变重时,GBN-MAC的休眠只使得时延和吞吐量的性能略有下降。可以说,在不同的网络负载下,GBN-MAC中的休眠几乎没有影响网络的时延和吞吐量的性能,然而从图5(h)~图5(i)可以看出,GBN-MAC能明显降低成功收发每字节的平均能耗,场景1、场景2、场景3的每字节能耗由于休眠分别下降了16.3%、31.8%和15.7%。

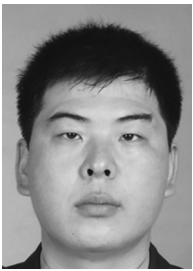
4 结束语

本文设计的GBN-MAC协议能够在基本保持网络时延和吞吐量的情况下明显降低能量消耗,可以较好地满足骨干层对网络时延和吞吐量的要求。为了更好的节约能耗,下一步需要考虑在骨干层的MAC协议中增加与物理层的交互,使用发射功率控制能耗。在骨干层MAC协议中增加功率控制还需要考虑跨层的影响。

参考文献:

- [1] 蹇强,龚正虎,朱培栋,等. 无线传感器网络MAC协议研究进展[J]. 软件学报,2008,19(2):389-403.
- [2] 崔海霞,黎文楼,丁志文. 无线传感器网络中基于能量效率的分布式MAC协议[J]. 传感技术学报,2010,1(1):104-109.
- [3] Sun Y J, Du S, Gurewitz O, et al. DW-MAC: A Low Latency, Energy Efficient Demand-Wakeup Mac Protocol for Wireless Sensor Networks [C]//Jia XH, ed. Proc. of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM Press,2008. 53-62.
- [4] 唐震洲,施晓秋,金可仲. PA-MAC:一种被动的异步低占空比无线传感器网络MAC协议[J]. 传感技术学报,2011,3(3):423-428.
- [5] Sun Y J, Gurewitz O, Johnson D B. RI-MAC: A Receiver Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks [C]//Abdelzaher T, ed. Proc. of the 6th ACM Conf. on Embedded Network Sensor Systems. New York: ACM Press,2008. 1-14.
- [6] Akyi Idiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40

- (8):102-105.
- [7] Tijs V D, Koen L. An Adaptive Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proceeding of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, 2003:171-180.
- [8] Liu Bing, Yang Yun, Zhang Huimin. An Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks[J]. Radio Engineering of China, 2007(3):121-145.
- [9] 单洪, 马涛. 层次传感器网络的交错同步休眠调度方法研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(7):980-984.
- [10] Tian Haitao, Tan Minsheng, Chen Wei. A Low Power MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Network Security Technology & Application, 2010(1):136-138.
- [11] Kim J, Lin X J, Shroff N B, et al. Minimizing Delay and Maximizing Lifetime for Wireless Sensor Networks with Anycast[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2009, 18(2):515-528.
- [12] Lai S W, Ravindran B. On Distributed Time-Dependent Shortest Paths over Duty-Cycled Wireless Sensor Networks[C]//Mandyam G, ed. Proc. of the 29th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington: IEEE Press, 2010. 1-9.



马 涛(1979-),男,博士,讲师,主要研究无线网络安全、网络模拟,bbmtao@sina.com;



单 洪(1965-),男,博士,博士生导师,主要研究无线网络安全技术、协议分析与设计。