

基于跨层信息的低功耗无线传感器网络 MAC 协议*

周军海⁺, 林亚平, 周四望, 胡玉鹏

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

Cross Layer Based Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Network

ZHOU Jun-Hai⁺, LIN Ya-Ping, ZHOU Si-Wang, HU Yu-Peng

(School of Information Science and Technology, Hu`nan University, Changsha 410082, China)

+ Corresponding author: E-mail: rj_zjh@hnu.edu.cn, http://www.hnu.edu.cn

Zhou JH, Lin YP, Zhou SW, Hu YP. Cross layer based energy-efficient MAC protocol for wireless sensor network. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (1)): 69-76 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12008.htm>

Abstract: The MAC (medium access control) protocol of traditional wireless sensor network has a problem with the high energy consumption of nodes. This paper proposes a CLEE-MAC (cross layer based energy-efficient MAC) protocol using the thought of cross-layer design, based on adaptive S-MAC (sensor MAC) protocol. The CLEE-MAC protocol changes the format of control packets of S-MAC protocol with the information coming from a routing layer. It makes the most and reduces the overhearing listening, and at the same time, simplifies the control overhead of multi-hop transmission, improves the utilization of nodes energy, and reduces the delay of data transmission.

Key words: media access control; energy-efficient; cross-layer design; wireless sensor network

摘要: 针对传统无线传感器网络 MAC (medium access control) 协议节点能耗高的问题, 采用跨层设计的思想, 在自适应 S-MAC (sensor MAC) 协议的基础上, 提出了 CLEE-MAC (cross layer based energy-efficient MAC) 协议. 该协议通过利用路由层的信息, 改变自适应 S-MAC 协议的控制包格式, 充分利用并减少了串音监听, 同时简化多跳传输的控制开销, 提高了节点能量的利用率, 并降低了数据传输的时延.

关键词: 媒体访问控制; 低功耗; 跨层设计; 无线传感器网络

随着传感器技术、无线通信和嵌入式技术的飞速发展, 孕育出无线传感器网络 (wireless sensor network, 简称 WSN), 并以其低功耗、低成本、分布式和自组织的特点带来了信息感知的巨大变革.

无线传感器网络的硬件资源十分有限, 且工作环境通常是一些资源受限的地方, 因此在设计过程中如何降低节点能耗是无线传感器网络首要考虑的问题, 其中, 传感器节点中耗能最大的部分: 无线通信模块由数据链路层的 MAC (medium access control) 协议直接控制^[1], 因此设计一个低功耗的 MAC 协议具有重要的意义.

许多传统无线网络的 MAC 协议, 如 IEEE 802.11, 要求节点的无线射频模块始终保持监听媒质的状态, 而大多数的传感器网络应用中, 如果没有感知事件发生时节点会长时间处于空闲状态. 在这段时期, 数据通信量通常

* 基金项目: 国家自然科学基金 (61173038, 60973127); 中央高校基本科研业务费专项资金 (531107040195); 可信系统与网络国家重点实验室开放基金 (201103)

收稿时间: 2012-05-05; 定稿时间: 2012-08-17

非常低,没有必要让节点在所有的时间均保持监听状态.无线传感器节点的接收功率与监听功率较为接近,文献[2]的测量结果表明,无线网络的监听:接收:发送功率比值可达 1:1.05:1.4.传统的无线传感器网络的空闲监听可消耗 50%~100%的用于接收的能量^[3],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.

近几年提出了很多节能型 MAC 协议^[4-6],但单层优化的方法没有利用层间信息的交互,难以协调节能和网络性能之间的矛盾.本文在改进自适应 S-MAC(sensor MAC)协议^[3]的基础上,采用跨层设计的思想^[7-11],提出了 CLEE-MAC(cross layer based energy-efficient MAC)协议,该协议通过利用路由层的信息,改变自适应 S-MAC 协议的控制帧格式,充分利用并减少串音监听,简化了多跳传输的控制开销,提高了节点能量的利用率,并降低了数据传输的时延.

1 问题描述

文献[3,12]等通过实验证实了无线传感器网络无效能耗的四大来源:空闲监听、数据冲突、串听和控制开销,并在 IEEE 802.11MAC 协议基础上,提出了第一个完全针对无线传感器网络设计的 MAC 协议 S-MAC^[12],具有有效节能、可扩展性和冲突避免等优点.S-MAC 协议采用的主要应对机制为周期性监听和睡眠机制.

S-MAC 协议将时间周期划分为帧 T_{frame} ,帧内分监听阶段 T_{listen} 和休眠阶段 T_{sleep} ,即 $T_{frame}=T_{listen}+T_{sleep}$. T_{listen} 的值根据物理层和 MAC 层的参数,如无线带宽和竞争窗口的大小等来设置一般是固定的.协议周期划分如图 1 所示.

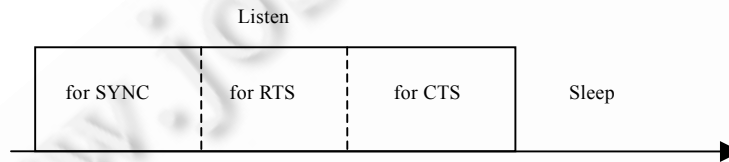


Fig.1 Periods partition of S-MAC protocol

图 1 S-MAC 协议周期划分

监听阶段又划分为(SYNC)同步时期和(RTS/CTS)数据包时期,通过 SYNC 信号来解决节点间的时钟漂移及同步邻居节点的调度计划,使相邻各节点具有相同的监听与休眠周期.当节点有数据要发送时,通过 RTS 包与接收者进行联系,接收节点收到 RTS 包后回应 CTS 包来通知发送节点进行数据传送,发送节点利用休眠阶段进行数据包的发送.其余节点在收到 RTS 包或 CTS 包时获知自己没有收发任务则在休眠阶段时关掉无线射频以节省能量.S-MAC 协议采用 RTS/CTS/DATA/ACK 机制发送数据,有收发任务的节点在发送数据期间不会进入休眠阶段.在节省能耗的同时,该机制由于采用周期睡眠增加了端到端的传输延迟.最初的 S-MAC 协议在每个调度周期一个数据包仅被向前传输 1 跳,中间的转发节点必须等待下一个周期节点醒来才能接收数据包.

为了在节能的同时降低时延,S-MAC 协议的提出者在文献[3]中对最初的 S-MAC 协议做了进一步改进,由于一般情况下,整个调度周期长度 T_{frame} 远大于监听间隔 T_{listen} ,定义占空比为监听间隔与整个帧长度的比值: $D=T_{listen}/T_{frame}$, D 通常小于 10%.因为休眠的间隔 T_{sleep} 根据不同的应用要求可以进行变化,这可导致占空比发生改变.改进的 Adaptive S-MAC 协议(以下称为自适应 S-MAC 协议)通过采用自适应侦听的方式,在一个周期内可完成 2 跳的数据传递.通信过程如图 2 所示:设通信路径为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$, C 不是 A 的邻居节点,当节点 A, B 通过 RTS/CTS/DATA/ACK 的通信过程完成第 1 跳数据传递后,节点 C 根据所收到节点 B 的 CTS 包中 duration 字段值来设置它的网络分配矢量 NAV 计时器,从而可被唤醒进行自适应的监听,使得节点 B 与节点 C 在下一个监听/休眠周期到来之前可再次通过 RTS/CTS/DATA/ACK 的通信过程完成第 2 跳的数据传递.

自适应的 S-MAC 协议在自适应监听阶段 $T_{adpListen}$,不仅节点 C 被唤醒,与 A, B 相邻的其余节点在一个短的周期内都会被不必要地强制唤醒,这样不仅导致能量浪费,而且可能导致网络竞争的加剧,容易造成数据的丢失

和增加传输延迟.利用跨层信息^[13-15],A,B 的邻居节点可利用路由层的信息判断自己是否为下一跳节点,从而避免不必要的强制唤醒,减少了能量损耗,但时延没有得到任何改善.

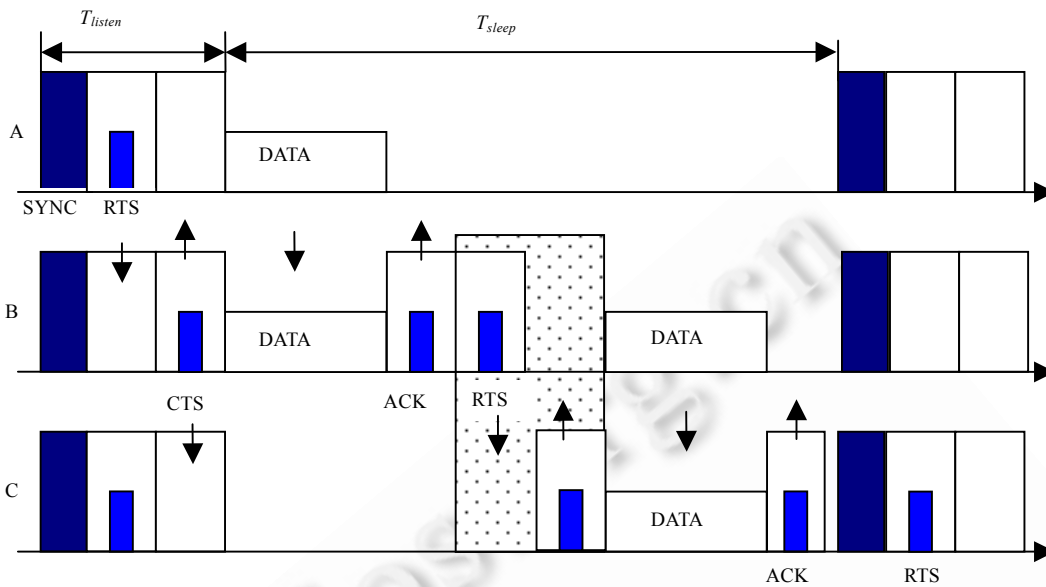


Fig.2 Communication processes of adaptive S-MAC protocol

图 2 自适应 S-MAC 协议通信过程

2 基于跨层信息的低功耗 MAC 协议

针对自适应 S-MAC 协议中存在的能量浪费及时延较大的问题,本文提出基于跨层信息的低功耗 MAC 协议(CLEE-MAC 协议).本协议基于跨层设计的思想,利用路由层的信息,对自适应 S-MAC 协议的 RTS/CTS/ACK 的控制包格式进行改进,使相关邻居节点提前得知通信路径,避免强制唤醒,并利用串听信息减少控制包的数量,进一步降低能耗与时延.

2.1 协议执行过程

CLEE-MAC 协议的执行情况如图 3 所示,数据的通信路径与图 2 相同,当节点 A 将数据发送给节点 B 后,节点 C 的 NAV 计数器所设的值趋于 0,由于从节点 B 的 CTS 包中已知自己为下一跳节点,因而在节点 B 发送 ACK 包前自动唤醒,接收节点 B 的 ACK 包以获知前一跳已完成传输,可进行下一跳的传输,从而直接给节点 B 发送 CTS 包进行下一跳的数据传输,进一步降低能耗与时延.

2.2 协议控制包格式

CLEE-MAC 协议对自适应 S-MAC 协议的 RTS/CTS/ACK 控制包格式进行调整,在 RTS 包中增加了一个 6Byte 的最终目的节点地址 Final Add 字段,图 4(a)为 CLEE-MAC 中的 RTS 包格式,这样收到 RTS 消息的节点可根据接收节点地址 RA 字段,判断自己是否在此次数据传递的路径上,同时 RA 所标识的接收节点可利用目的节点地址 Final Add 字段信息从路由层中获取得到下一跳节点的地址,放入到 CTS 包中新增的 6Byte 的下一跳节点地址 Next Add 字段中,如图 4(b)所示.这样处于接收节点通信范围内的节点可根据所收到 CTS 包中的 Next Add 字段信息判断自己是否是下一跳节点,从而在自适应监听阶段只有下一跳节点被强制唤醒,解决了自适应 S-MAC 协议中与收发节点相邻而无收发任务的其余节点被不必要地强制唤醒问题.

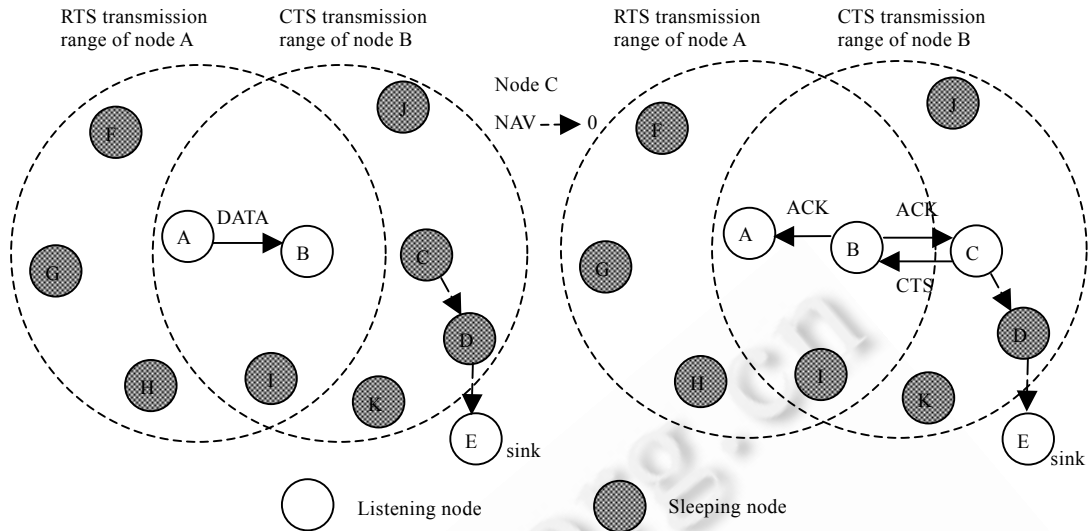


Fig.3 Executive instance of CLEE-MAC protocol
图3 CLEE-MAC 协议执行情况

为减少控制包的数量,进一步降低能耗和时延,CLEE-MAC 协议对自适应 S-MAC 协议的 ACK 控制包进行了改进,如图 4(c)所示,新增了一个 Next Add 字段和一个 Final Add 字段,从而使得 CLEE-MAC 协议中 RTS 包和 ACK 包的格式相似,两者的类型按照 IEEE802.11MAC 协议包格式中 Frame Control 字段的 Subtype 子字段标准的规定进行区分.因为 CLEE-MAC 协议中的 ACK 包兼有 RTS 包的功能,所以 ACK 包的 Duration 字段值设为发送此 ACK 包至下一个 ACK 包被接收所需的时间.

Frame Control	Duration	RA	TA	Final Add	CRC
---------------	----------	----	----	-----------	-----

(a) CLEE-MAC 协议的 RTS 包格式

Frame Control	Duration	RA	Next Add	CRC
---------------	----------	----	----------	-----

(b) CLEE-MAC 协议的 CTS 包格式

Frame Control	Duration	RA	Next Add	Final Add	CRC
---------------	----------	----	----------	-----------	-----

(c) CLEE-MAC 协议的 ACK 包格式

Fig.4 Control packet formats of RTS/CTS/ACK packets of CLEE-MAC protocol
图4 CLEE-MAC RTS/CTS/ACK 控制包格式

2.3 协议数据传输过程

CLEE-MAC 协议的数据传输仍以上述的通信路径为例,其通信过程如图 5 所示,因为节点 B 的 CTS 包中包含了下一跳的地址 C,所以节点 C 从该 CTS 包的 Duration 字段可知节点 B 发送完 ACK 包的时间,节点 C 用此 CTS 包中 Duration 字段值减去 ACK 包发送所需时间和一个微小的增量来配置 NAV,从而可在节点 B 发送 ACK 包之前提前唤醒,使得 ACK 包既有前一跳的包确认功能,又有下一跳的请求发送的功能.

节点 C 收到此 ACK 包后,知道前一跳已成功完成,同时 B 也已做好了下一跳的发送准备,因此节点 C 给节点 B 直接发送 CTS 包来提前进行第 2 跳的数据传输,从而减少了节点 B 发送和节点 C 接收一个 RTS 包的能耗及相应的时延.同时在每一个周期开始的同步阶段,可根据上一周期进行 2 跳数据传输所需的实际时间来自适应地调整各节点的 T_{frame} 的值,从而进一步地降低 CLEE-MAC 协议数据传输的时延.

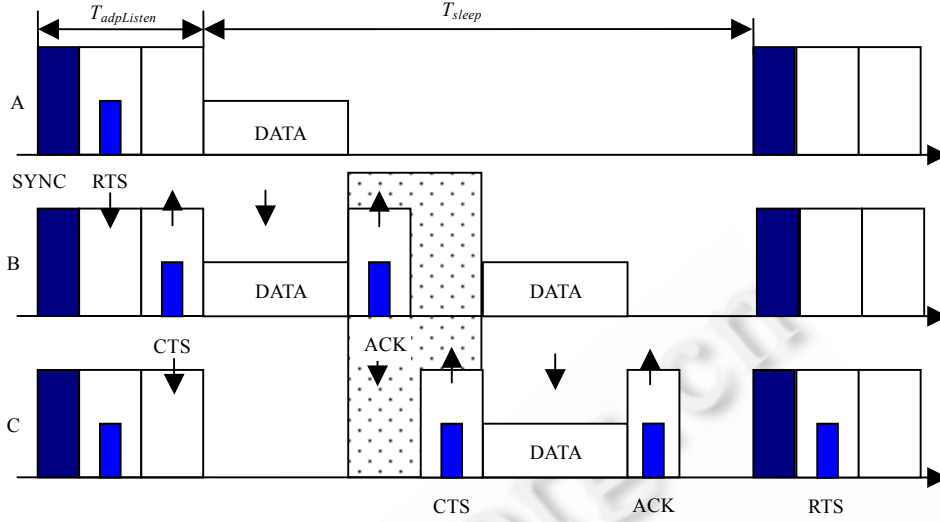


Fig.5 Communication processes of CLEE-MAC protocol

图 5 CLEE-MAC 协议通信过程

2.4 协议能量分析

CLEE-MAC 协议在一个周期帧内,参与收发任务的节点发送信息所消耗的能量为

$$E_{send} = P_{transmit} \times (T_{rts} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack}) \quad (1)$$

参与收发任务的节点接收信息所消耗的能量为

$$E_{receive} = P_{receive} \times (T_{rts} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack}) \quad (2)$$

其中, $P_{transmit}$ 是发送功率, $P_{receive}$ 是接收功率.

自适应 S-MAC 协议在一个周期帧内,参与收发任务的节点发送信息所消耗的能量为

$$E'_{send} = P_{transmit} \times (T_{rts} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack} + T_{rts} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack}) \quad (3)$$

参与收发任务的节点接收信息所消耗的能量为

$$E'_{receive} = P_{receive} \times (T_{rts} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack} + T_{rts} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack}) \quad (4)$$

自适应 S-MAC 协议中被“强制唤醒”的邻居节点所多消耗的能量为

$$E'_{neighbor} = \sum_{k=1}^n K \times P_{receive} \times T_{wakeup} \quad (5)$$

其中, K 表示发送 RTS 或 CTS 消息的节点通信范围内的邻居节点数目, K 的取值与节点通信半径及节点的分布密度有关,当路由采用贪婪算法时,其最大的取值为

$$K = \left(\frac{4\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \rho r^2 \quad (6)$$

其中, r 为节点的通信半径, ρ 为单位面积内的平均节点数量,即网络中节点的平均分布密度.

从式(1)~式(3)可推导出自适应 S-MAC 协议与 CLEE-MAC 协议在一个周期帧内所消耗的能量分别为

$$\left. \begin{aligned} E_{AS-MAC} &= E'_{send} + E'_{receive} + E'_{neighbor} \\ E_{CLEE-MAC} &= E_{send} + E_{receive} \\ E_{AS-MAC} &= E_{CLEE-MAC} + (P_{transmit} + P_{receive}) \times T_{rts} + E'_{neighbor} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

从式(7)可知,每一个周期帧内 CLEE-MAC 协议都可节省一个 RTS 包收发所消耗的能量,当数据包经过的路径较短及网络节点的密度较小时,两个协议消耗的能量相对接近;当数据包经过的路径较长及网络节点密度加大时, CLEE-MAC 协议可大量减少控制包的开销和被“强制唤醒”的邻居节点的能耗开销,节能收益十分显著.

3 仿真结果与分析

本文使用 NS-3 网络仿真软件进行协议的性能评估,主要参数如下:仿真区域 $1000 \times 1000 \text{m}^2$,通信周期 200ms,占空比 10%,带宽 100Kb/s,数据包长度 200Byte,发送功率 25mW,接收与空闲监听功率 18mW,发送范围是 25m.

仿真环境的 Sink 节点固定在区域的中央,4个源节点放置在 4个边角上.首先在仿真区域内随机部署 50 个节点,然后每次增加 10 个节点到 120 个节点.仿真结果如图 6 所示.

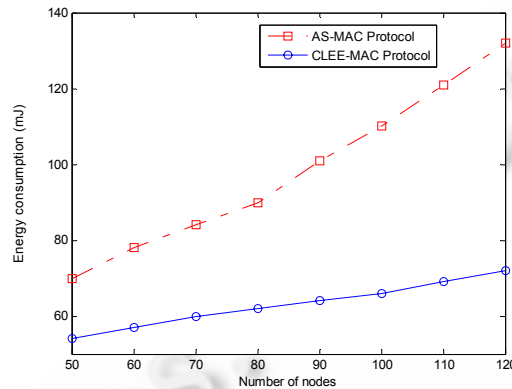


Fig.6 Comparison of energy consumption between different distributing densities

图 6 不同分布密度的能耗比较

当节点数为 50 时,由于自适应侦听阶段 AS-MAC 协议唤醒的邻居节点较少,2 个协议的总耗能相对接近,CLEE-MAC 协议的节能优势不明显;随着邻居节点数目的增多,CLEE-MAC 协议避免唤醒的节点数也在增多,能耗节省明显增加.

当网络通信量变化时,CLEE-MAC 协议与 AS-MAC 协议的耗能也会随之改变.实验 2 将区域内的节点数固定为 100 个,通过改变 4 个源节点发送消息的时间间隔来改变网络通信量,仿真时间为 500s.实验结果如图 7 所示.

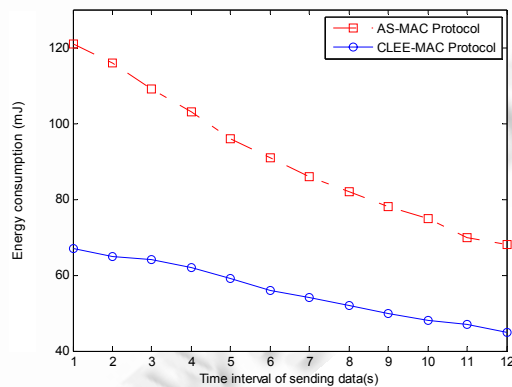


Fig.7 Comparison of energy consumption between different traffic

图 7 不同通信量下能耗的比较

由于 CLEE-MAC 协议每个周期帧均可节省收发一个 RTS 包的时间,而且只唤醒与通信相关的节点,因此通信量增加时 CLEE-MAC 协议的能耗增加较平缓;而 AS-MAC 协议在每个周期帧内均要唤醒与收发节点在同一个簇的相邻节点进行数据监听,网络通信流量越大,通信间隔时间越小,邻居节点被强制唤醒的次数就越多.

CLEE-MAC 协议在每个周期帧的同步阶段,根据前一周期的数据收发所需的实际时间可自适应地调整周期间隔,并在周期帧开始的同步阶段进行新调度周期的广播,从而进一步降低数据传输的延迟.CLEE-MAC 协议需要利用路由层的信息来获知下一跳的地址,使得层间的结构具有了一定的关联,同时也需微量的时间开销.实验仿真的结果如图 8 所示.

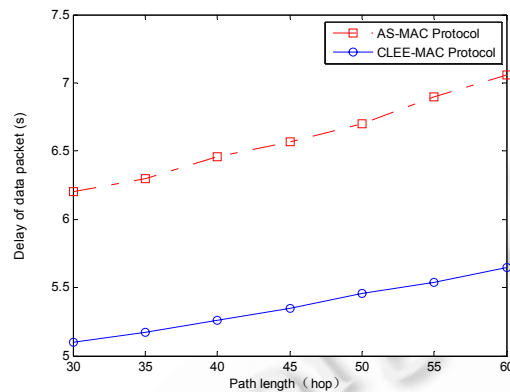


Fig.8 Comparison of data transmission delay between tow protocols

图 8 两种协议的数据传输延迟比较

传输延迟在 CLEE-MAC 协议和 AS-MAC 协议中都是随着路径跳数的增加而增加.然而传输延迟在 AS-MAC 协议中相对较大且增加的速度较快.

4 结束语

本文在自适应 S-MAC 协议的基础上,采用跨层设计的思想,提出了 CLEE-MAC 协议,该协议通过利用路由层的信息,改变了自适应 S-MAC 协议的控制帧格式,充分利用并减少了串音监听,同时简化了多跳传输的控制开销,提高了节点能量的利用率,并进一步降低了数据传输的时延.同时 CLEE-MAC 协议也有些不足,它使得各层之间的结构具有了一定的关联,且跨层信息查询也有微量的时间开销,但相对于数据收发时间而言,可忽略不计.自适应 S-MAC 协议中提到将在以后的研究中考虑一个周期帧内进行三跳数据传递的问题,这也是本文提出的 CLEE-MAC 协议未来的改进方向.

References:

- [1] Pang BM, Shi HS, Li YX. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor network. *Future Wireless Networks and Information Systems*, 2012,143:163–170.
- [2] Stem M, Katz RH. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices. *IEICE Trans. on Communication*, 1997,E80-B(8):1125–1131.
- [3] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinate adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2004,12(3):493–506. [doi:10.1109/TNET.2004.828953]
- [4] Tang L, Sun YJ, Gruewitz O, Johnson DB. PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks. In: Ni L, ed. *Proc. of the 30th IEEE INFOCOM*. Shanghai: IEEE Computer Society Press, 2011. 1305–1313.
- [5] Luo T, Motani M, Srinivasan V. Energy-Efficient strategies for cooperative multichannel MAC protocols. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2012,11(4):553–566.
- [6] Shahzad A, Shah GA, Khattak AU. QoS-Supported energy-efficient MAC (QEMAC) protocol based on IEEE 802.11e for Wireless Multimedia Sensor Networks. In: Fong S, ed. *Proc. of the 5th Information Science and Service Science*. Macao: IEEE Computer Society Press, 2011. 200–204.

- [7] Wang XG, Zhang XM, Cheng GL. Delay-Constrained and energy-efficient cross-layer routing in wireless sensor networks. Journal of Software, 2011,22(7):1626–1640 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3838.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03838]
- [8] Shan HG, Cheng HT, Zhuang WH. Cross-Layer cooperative MAC protocol in distributed wireless networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2011,10(8):2603–2615.
- [9] Zhou Y, Liu J, Zhai C, Zheng L. Two-Transmitter two-receiver cooperative mac protocol: Cross-Layer design and performance analysis. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2010,59(8):4116–4127.
- [10] Aguilar T, Syue JS, Gauthier V, Afifi H, Wang CL. CoopGeo: A beaconless geographic cross-layer protocol for cooperative wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2011,10(8):2554–2565.
- [11] Long ZH, Li JZ, Jiang GQ. Design of MAC protocol for wireless sensor networks based on cross-layer optimization. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012,133:1043–1050.
- [12] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In: Kerman P, ed. Proc. of the 21st IEEE INFOCOM. New York: IEEE Computer Society Press, 2002. 1567–1576.
- [13] Tang ZZ, Hu Q. An adaptive low latency cross-layer MAC protocol for wireless sensor networks. In: Qin ZG, ed. Proc. of the 8th Dependable, Autonomic and Secure Computing. Chengdu: IEEE Computer Society Press, 2009. 389–393.
- [14] Zheng GQ, Shun RY. MAC protocol based on routing message for cross layer WSN. Computer Engineering, 2009,35(17):117–119 (in Chinese with English abstract).
- [15] Wang HP, Zhang XB, Nait AF, Khokhar A. Cross-Layer optimized MAC to support multihop QoS routing for wireless sensor networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2010,59(5):2556–2563.

附中文参考文献:

- [7] 王辛果,张信明,陈国良.时延受限且能量高效的无线传感网络跨层路由.软件学报,2011,22(7):1626–1640. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3838.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03838]
- [14] 郑国强,孙若玉.基于路由信息的跨层 WSN MAC 协议.计算机工程,2009,35(17):117–119.



周军海(1974—),男,湖南衡阳人,博士生,讲师,主要研究领域为传感器网络,小波数据处理.



周四望(1971—),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究领域为网络中的信息处理,小波分析.



林亚平(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为通信网络,机器学习.



胡玉鹏(1981—),男,博士,副教授,主要研究领域为传感器网络,社区网络,物联网.