

低丢包率无线传感器网络 S-MAC 协议的研究

周祥云¹ 钱 慧¹ 余 轮^{1,2}

(福州大学物理与信息工程学院 福州 350002)¹ (福州大学数字媒体研究院 福州 350002)²

摘 要 针对 S-MAC 协议的层间丢包问题,利用缓存队列原理提出了一种简化通信数据分组格式的 S-MAC 协议优化改进方案。结合 TinyOS 的主动消息机制在 Mica2 节点上实现了改进的 S-MAC 协议,并对 MAC 层的丢包率进行了测试。实验测试结果表明,优化改进后 S-MAC 协议较标准 S-MAC 协议在 MAC 层的丢包率上有明显的降低,提高了网络性能。

关键词 无线传感器网络, S-MAC 协议, 丢包率, 缓存队列, TinyOS

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Improvement of Less Packet Loss S-MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

ZHOU Xiang-yun¹ QIAN Hui¹ YU Lun^{1,2}

(Institute of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)¹

(Institute of Digital Media Research, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)²

Abstract According to the packet loss problem in S-MAC protocol, this paper proposed an optimized scheme which based on the cache queue principle and simplified the format of group data for S-MAC protocol. Combined with the Active Message(AM) mechanism of TinyOS, the S-MAC protocol has been implemented on the Mica2 motes, and it has tested the packet loss ratio of MAC layer. The result demonstrates that the improved S-MAC protocol has significantly reduced than the original S-MAC protocol in the packet loss ratio and enhances the network throughput.

Keywords WSN, S-MAC protocol, Packet loss ratio, Cache queue, TinyOS

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由传感器技术、无线通信技术和嵌入式系统设计技术等深层次融合而形成的网络技术。介质访问控制(Medium Access Control, MAC^[1])协议的设计则是无线传感器网络的研究重点之一。MAC 协议设计的目标是在保证介质访问公平性的同时,提高网络吞吐量并尽量保证减小网络时延。一般来说,MAC 层协议分为 3 种,一种是以 S-MAC^[2](Sensor MAC)协议为代表的竞争类协议,一种是以 TRAMA^[3](Traffic Adaptive Medium Access)为代表的分配类协议以及兼顾前两种特性的混合 MAC 协议。其中, S-MAC 协议以其实现方式简单、灵活的特性成为目前在实际无线传感器网络中应用最为广泛的 MAC 协议。相对于其他两种 MAC 层协议,由于数据碰撞而导致的丢包问题是竞争类 S-MAC 层协议需要首要考虑的技术问题之一。莫路锋^[3]等提出了一种轻量级自适应修复与调整策略(SAR²),该方法基于对接收信号强度指示(RSSI)对数据包进行分类处理;蒋禧^[4]等提出一种基于能量优先的拥塞缓解机制(PECR)。节点首先周期性地检测缓冲区队列占用率来确定当前拥塞度,当拥塞发生时,节点依据拥塞度和剩余能量两项属性,尝试在拥塞节点周围建立临时最佳路

径进行分流调节^[1]。

2 无线传感器网络的 S-MAC 协议

S-MAC(Sensor MAC)协议是一种专门针对无线传感器网络的竞争类协议。该协议在 IEEE 802.11 MAC^[5]协议和 PAMAS(Power Aware Multiple Access with Signal)^[6]协议的基础上,针对能量损耗方面加以改进。不但可以较好地解决网络中数据传输的节能问题,而且兼顾了网络的可扩展性,具备冲突避免的功能。

2.1 S-MAC 协议的工作机制

S-MAC 协议的工作机制主要包含以下几个方面^[2,7]:

周期性侦听和睡眠机制: S-MAC 协议中,节点协同进行周期性侦听和睡眠状态的切换,以确保每个节点能同步进行侦听和睡眠调度。周期性侦听和睡眠的时间之和为一个调度周期,如图 1 所示。

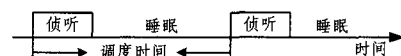


图 1 S-MAC 协议周期性侦听和睡眠

冲突和串音避免机制: 为了减少冲突和避免串音, S-MAC 协议采用了与 IEEE 802.11 MAC 协议相类似的物理和虚拟载波侦听机制,以及 RTS/CTS 的握手交互机制。

本文受国家自然科学基金(60672146)资助。

周祥云(1988—),男,硕士生,主要从事无线传感器网络方面的研究, E-mail:zhou2090@126.com;钱 慧 博士生;余 轮 教授,博士生导师。

消息传递机制:如果在发送较长的数据包时由于几个比特的错误造成重传,会造成较大的时延和能量损耗。但是,如果只是简单地将长数据包分段,则又会因为 RTS/CTS 的频繁使用造成过多的控制开销。为了解决这个问题,S-MAC 协议提出了“消息传递”机制,把较长的数据包分成若干个 DATA,并将它们一次传递,但只用一个 RTS/CTS 控制分组作为交互。

流量自适应侦听机制:无线传感器网络往往采用多跳的通信方式,而节点的周期性睡眠会导致通信延迟的累加。为了减少通信延迟的累加效应,S-MAC 协议采用了一种流量自适应侦听机制。

2.2 S-MAC 协议的丢包问题

根据 S-MAC 协议规定,MAC 层调用发送分组命令的流程如图 2 所示。

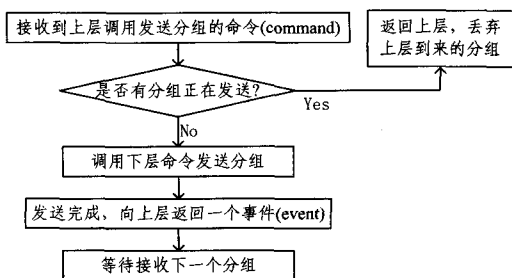


图 2 S-MAC 调用发送分组命令流程图

当 MAC 层接收到上层调用发送分组的命令时,首先判断本层是否有分组正在发送,如果没有就调用下层的命令进行发送,发送完毕后立即向上层回复一个事件(event),等待接收下一个分组,说明本次业务处理完成,上层可以继续处理其他业务;如果本层有分组正在发送,则丢弃上层到来的分组,这就造成了层间丢包。由于 S-MAC 协议中对 MAC 层的缓存空间没有明确的规定,如果没有设置缓存空间或者所设置的空间过小,那么当节点正在调用下层命令发送分组时,对于上层到来的分组只能丢弃,这就造成了大量的层间丢包,同时也会造成数据大量的重传。这会大大地增加节点的能量功耗和降低系统的通信效率,因此降低 MAC 层间的丢包率是非常重要的。

一般情况下,在上层单播分组不间断达到时,系统对 MAC 层缓存队列的要求最高;通信数据分组格式的复杂程度决定了通信量,也影响着 MAC 层间的丢包率。本文针对 S-MAC 协议的层间丢包问题提出优化方案,该方案能很好地降低 MAC 层间丢包率,减少了大量数据的重传,进而降低了节点功耗和提高了通信效率。

3 无线传感器网络 S-MAC 协议的优化改进

对无线传感器网络 S-MAC 协议的改进主要从 MAC 层的缓存队列和数据分组格式方面进行分析和改进。

3.1 缓存队列

假设数据分组到达参数 λ 符合泊松分布,每个分组服务时间服从参数为 μ 的负指数分布。根据相关排队理论^[8],此过程满足 $M/M/1/N$ 模型,从而得到丢包概率 $L=M/N$,其中 M 为平均队列长度, N 为缓存队列长度。

$$M = \rho(1 - \pi_1) + \frac{\rho^2}{(1 - \rho)^2} \pi_0 [1 - N\rho^{N-1} + (N-1)\rho^N] \quad (1)$$

式中, ρ 为通信强度, $\rho = \lambda/\mu$,且 $\lambda = \frac{\text{发送数据总量}}{\text{数据传输时间}}$, $\mu = \frac{\text{单个分组数据量}}{\text{服务时间}}$, $\pi_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \rho^i}$, $\pi_1 = \frac{\rho}{1 + \sum_{i=1}^N \rho^i}$ 。本文选择以单

播分组的丢包率是否低于 10% 作为计算缓存队列长度的标准。将 $L=10\%$ 和实际测试数据计算出的 λ 和 μ 代入上述公式中,可得 $N=5$,即本试验系统可选择缓存队列长度为 5。

3.2 自定义的数据分组格式

S-MAC 协议中规定的数据分组格式^[9]如图 3 所示。

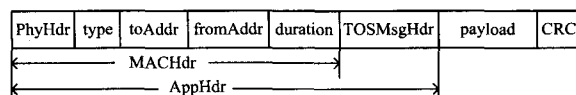


图 3 S-MAC 数据分组格式

其中 PhyHdr 表示物理层的分组头,MACHdr 表示 MAC 层的分组头,AppHdr 表示应用层的分组头。PhyHdr、MACHdr 和 AppHdr 之间实现了层层嵌套。字段 TOSMsgHdr 是针对主动消息机制而设定的主动消息数据包的头域,其格式如图 4 所示。

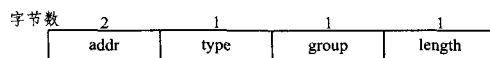


图 4 字段 TOSMsgHdr 的格式

针对 S-MAC 协议的数据分组格式进行了如下修改:由于实验系统的网络规模较小,在 MAC 层分组头 MACHdr 中定义的目的地址(toAddr)和 TOSMsgHdr 中定义的目的地址(addr)实际上是重复的,因此可以省略 addr;由于所有节点都为同一组号,因此没有必要定义组号(group);MAC 层以上各层对分组中的 CRC 字段做的是伪 CRC 校验,因此 CRC 也不必传输,简化后的数据分组格式如图 5 所示。

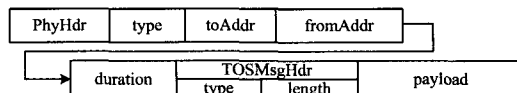


图 5 简化后的数据分组格式

简化后的通信数据分组格式相对于原来的数据分组格式减少了 5 个字节,即式(1)中的平均队列长度 M 降低了,所以丢包率 L 也随之减小。

4 S-MAC 协议在 TinyOS 上的实现和测试

实验系统节点采用 Crossbow 公司的 Mica2 传感器节点,结合 UC Berkeley 开发的开放源代码操作系统 TinyOS^[10]进行无线传感器网络 S-MAC 协议的测试,实验系统平台如图 6 所示。



图 6 实验系统平台

4.1 S-MAC 协议的测试分析

根据上述 S-MAC 协议的原理进行应用程序的移植^[11], 并将程序成功下载到 Mica2 节点中。该应用程序的功能是定时地采集温度传感器的数据, 当节点激活时红色 LED 灯亮, 搜寻邻居节点。当搜寻到邻居节点时, 发送数据, 否则就不发送。当数据发送成功时, 绿色的 LED 灯闪烁一次。当节点成功接收到一个数据包时, 黄色的 LED 灯闪烁一次。

仔细观察两个节点的通信过程, 记录实验结果如表 1 所列。

表 1 S-MAC 协议测试结果

状态	节点 1			节点 2		
	红	绿	黄	红	绿	黄
1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0
4	1	1	1	1	1	1
5	1	0	0	1	0	0
6	1	1	1	1	1	1
7	1	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0
10	1	1	1	1	1	1

注: 在上表中红色 LED 灯的“0”和“1”分别表示灯的灭与亮; 绿色和黄色 LED 灯的“0”和“1”分别表示灯没有闪烁与闪烁。

状态分析如下:

状态 1: 两个节点的开关均未打开; 状态 2: 只打开节点 1 的开关, 由于节点 1 没有探测到邻居节点的存在, 因此没有进行信息的收发; 状态 3: 打开节点 2 的瞬间, 这两个节点要进行同步; 状态 4—7: 两个节点被完成休眠周期同步后, 在同一个活动期内通信; 状态 8: 两个节点同时进入休眠期; 状态 9: 两个节点同时唤醒; 状态 10: 两个节点再次开始通信。

由上述实验可知, 优化改进后的 S-MAC 协议的应用程序运行正常。

4.2 MAC 层间的丢包率测试

为测试带有 S-MAC 协议的节点在通信过程中的丢包率, 设置每个节点分别发送 200 个广播分组和 200 个单播分组, 通过带有 Spnooer 监听程序的节点监听这 3 个节点之间的通信情况。设置节点工作在带自适应载波侦听的模式下, 载波侦听的门限值 RADIO_BUSY_THRESHOLD 为默认值 0xb5。丢包率定义如下。

广播丢包率:

$$Ra_{Bcast} = \frac{NoTx_{Bcast} - \min(NoRx_{Bcast})}{NoTx_{Bcast}}$$

单播丢包率:

$$Ra_{Ucast} = \frac{NoTx_{Ucast} - \sum NoGxDataPkt}{NoTx_{Ucast}}$$

其中

$NoTx_{Bcast}$ 是发送广播分组个数;

$NoUx_{Bcast}$ 是发送单播分组个数;

$NoTx_{Bcast}$ 是接收广播分组个数;

$NoUx_{Bcast}$ 是接收单播分组个数;

$NoGxDataPkt$ 是目的节点交给上层的分组数。

标准的 S-MAC 协议与增加缓存队列和优化通信数据分

组格式的 S-MAC 协议的丢包率测试对比如表 2 所列。

表 2 丢包率对比测试结果

标准 S-MAC	改进后 S-MAC			
数据分组间隔	10s	20s	10s	20s
广播丢包数	57	49	22	16
广播丢包率	28.5%	24.5%	11%	8%
单播丢包数	33	24	17	11
单播丢包率	16.5%	12%	8.5%	5.5%

由表 2 的实验结果可知, 增加缓存队列以及简化通信数据分组格式之后, 在 2 种不同的分组到达间隔中, 广播分组的丢包率分别降低了 17.5%、16.5%, 单播分组的丢包率分别降低了 8%、6.5%。可知优化改进后的 S-MAC 较原始的 S-MAC 在丢包率上有明显的改善。同时可知在分组到达间隔越短时, 缓存队列的设置和数据通信格式的简化对丢包率的影响越为明显。

结束语 本文针对 S-MAC 协议的层间丢包问题, 利用缓存队列原理和优化 S-MAC 协议的通信数据分组格式的方法对 S-MAC 协议进行了优化改进。实验结果表明优化改进后的 S-MAC 协议能在 Mica2 节点上良好地运行, 并很好地降低了 MAC 层间的丢包率。MAC 层间丢包率大大降低, 可以大量减少数据的重传, 降低节点功耗, 提高通信效率, 这在无线传感器网络的现实应用中具有较大应用价值。

参考文献

- [1] Finkenzeller K. 射频识别技术(第 3 版)[M]. 吴晓峰, 陈大才, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006
- [2] Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks[A]//21st Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM) [C]. volume3, 2002: 1567-1576
- [3] 莫路锋, 郭振格, 惠维, 等. SAR²: 针对无线传感器网络丢包的自适应修复与调整策略[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(11): 52-54
- [4] 蒋禧. 无线传感器网络拥塞控制机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010
- [5] Gast M S. 802. 11 Wireless Networks: the Definitive Guide(802. 11 无线网络权威指南)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [6] Singh S, Raghavendra C. PAMAS: Power Aware Multi-Access protocol with Signaling for Ad-hoc Networks[J]. ACM Computer Communications Review, 1998, 28(3): 5-26
- [7] 黄志杰, 李峰, 高强. 无线多媒体传感器网络实时 MAC 协议[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 81-85
- [8] 唐应辉, 唐小我. 排队论—基础与分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 29-31
- [9] Ye Wei, Heidemann J, Estrin D. Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 2(3): 493-506
- [10] Gay, Levis, et al. The nesC Language: A Holistic Approach to Network Embedded Systems[C]//Proceedings of Programming Language Design and Implementation(PLDI) 2003. June 2003
- [11] 刘营, 于宏毅. 基于 TinyOS 的无线传感器网络应用程序开发技术[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(3)