

Increasing ZigBee Network Lifetime with Adaptive S-MAC

Gong-qi Lin, Hong-guang Fu

School of Software, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China
e-mail lgqv2007@163.com

Abstract: The ZigBee standard builds on the assumption that infrastructure nodes have a constant power supply. ZigBee therefore does not provide any power-saving mechanisms for routing nodes, which limits the lifetime of battery-powered ZigBee networks to some extent. Based on the problem of power energy for ZigBee network, the idea to improve the ZigBee protocol stack was proposed based on the adaptive S-MAC. According this idea, short-range wireless communications platform with the CC2520 RF chip was built, and on this platform energy was tested using energy model, which was proposed by Adam Dunkels. Test results showed that improved ZigBee nodes to reduce power consumption up to 30% -50%, significantly improved the battery life.

Keywords: zigbee; adaptive s-mac; low power; cc2520; energy model

采用自适应 S-MAC 提高 ZigBee 网络寿命

林恭祺, 符红光

电子科技大学 软件学院, 成都, 610054
E-mail lgqv2007@163.com

【摘要】 ZigBee 标准建立在每个基本节点都有固定功率的基础之上, 没有为路由节点提供任何节省功耗的机制, 这在一定程度上限制了 ZigBee 设备的电池使用寿命。针对 ZigBee 网络中 MAC 协议的功耗问题, 提出基于自适应 S-MAC 的 ZigBee 协议栈改进方案。在此基础上, 成功组建基于射频芯片 CC2520 的短距离无线通信平台, 并在此平台上根据 Adam Dunkels 等提出的功耗测试模型进行测试, 结果显示改进的 ZigBee 节点功耗降低达 30%-50%, 大大提高了电池使用寿命。

【关键词】 ZigBee; 自适应 S-MAC; 低功耗; CC2520; 功耗模型

1 引言

近年无线传感器网络飞速发展, 大量无线终端诞生。这些以传感器和远程控制为代表的无线应用不需要较高的传输带宽, 而需要较低的传输延时和极低的功率消耗, 使用户能拥有较长的电池寿命和较多的器件阵列。ZigBee 协议的出现正好解决了这一问题。ZigBee 是最近提出的一种近距离、低功耗、低成本的双向无线通信技术, 主要适用自动控制和远程控制领域[1], 是为了满足小型廉价设备的无线联网和控制而制定的。而 ZigBee 技术的功耗问题主要体现在媒体控制层 MAC, 主要表现为空闲监听、控制分组等问题。在无线网络中 MAC 的功耗管理方面, 目前有许多广泛的研究[2][3][4][5][6][7][8]。

Wei Ye[6]等人提出的传感器媒体访问控制(S-MAC, Sensor-Medium Access control), 是一种专

门为无线传感器网络而设计的 MAC 协议。他们的设计目标是减少能量消耗, 通过利用时间表和竞争方案的结合, S-MAC 能达到良好的可测量性和冲突避免。随后, 他们又提出了自适应 S-MAC[9], 改善了节点传输的延迟状况。

本文对分析了著名的自适应 S-MAC 协议[9], 并将其主要机制运用在 ZigBee 协议栈 MAC 协议中, 改进了 ZigBee 的 MAC 层功耗管理机制。在基于低功耗的 CC2520 芯片组建的短距离无线通信平台上, 利用功耗模型进行测试, 效果良好, 功耗降低达 30%-50%。

2 自适应 S-MAC 的原理

WeiYe 等人在 2004 年提出的自适应 S-MAC[9]避免了前面介绍的几种能量浪费, 空闲监听、冲突、串音等, 是一种减少节点能量消耗的较好方案。

2.1 周期性监听和睡眠

在许多传感网络应用中，节点在没有传感事件发生的时候有很长一段空闲时间。在数据传输率很低的情况下，没必要所有的节点都处于监听状态。S-MAC 采用了周期性睡眠的方法，减少了监听时间。在睡眠期间，节点关掉收发器，并用定时器在稍后唤醒它。节点将静默长度记录到一个名为网络分配向量(NAV, Network Allocation Vector)的变量中[10]，然后为它设置一个定时器。每次定时器启动时，节点减少 NAV 的值，直到它为零为止。

2.2 冲突避免

节点在发送数据前将进行载波侦听，如果竞争失败它将重新进入睡眠直到信道空闲。在发送节点确认可以发送数据后，它将向接收节点发送一个 RTS 数据包，接收者收到 RTS 以后将发送 CTS 应答，然后开始数据包传送，在接到 ACK 确认后，结束本次通信。

2.3 自适应监听

自适应监听的实现思路是让无意中收到邻居传输(理想情况下是 RTS 或 CTS)的节点在传输末尾醒来一会儿。这样，如果此节点就是下一跳的节点，它的邻居就可以立刻将数据传给它，如果不是，则不接收任何的信息，它会回到休眠状态直到下次预定的监听时间才醒来。

3 基于自适应 S-MAC 的 ZigBee 协议栈的改进

3.1 ZigBee 协议栈的描述

ZigBee 协议栈有四层，分别是应用层 (APL), 网络层 (NWK)，媒体访问控制层 (MAC) 和物理层 (PHY)。

表 1. ZigBee 协议栈

APL (应用层)
NWK (网络层)
MAC (媒体访问控制层)
PHY (物理层)

严格来说，只有网络层和应用层是属于 ZigBee 协议的，物理层和媒体访问控制层是继承了 IEEE802.15.4 标准协议。ZigBee 支持多种拓扑结构和两种设备节点：全功能设备 (FFD) 和半功能设备 (FFD)。当前的 RFD 不能直接发送包，必须先通过 FFD 建立连接，才能进行传送，而 FFD 是一直处于通电状态，这样电池的消耗量就非常大。

3.2 ZigBee 协议栈的功耗问题

由于 ZigBee 标准协议栈的 MAC 层协议使用的是 802.15.4 的标准，而在此标准中的 MAC 协议层是一直处于工作状态。ZigBee 节点的状态可以归结为以下 4 种：发射、接收、空闲监听和睡眠，而 MAC 层上的能量损耗主要集中在这几个方面：空闲侦听 (idle listening)，碰撞冲突 (collision)，串扰 (overhearing)，控制信息开销 (control packet overhead)。在没有数据接收或发送的情况下，能量消耗巨大，测试证明空闲监听消耗了接收所需能量的 50% - 100%，研究者 Stemm 和 Katz 测量到空闲、接收和发送之比为 1:1.05:1.4[12]，而冲突、串扰和控制信息开销也在一定程度上损耗了很大能量。下面就三种 MAC 协议进行了仿真实验，并进行比较。

3.3 ZigBee 协议栈的改进

3.3.1 MAC 层调度机制

基于 S-MAC 的思想，在协议栈的 MAC 层引入睡眠/监听机制，通过时序调度表来控制 MAC 层协议工作。时序调度表如下：

```
typedef struct SchedTable
{
    int RxStatus;
    int TxStatus;
    int numPeriods;
    int numNodes;
    int syncNode;
    int chkSched;
};
```

时序调度表里包含发送状态和接收状态，当处于监听阶段的时候，先检测收发器处于的状态，一旦有数据请求，就进入相应的接收状态。同时包含了周期数 numPeriods，用于记录当前的周期。在发送数据之后继续检测状态位，一旦检测到没有数据要接收或发送，就将状态位置 0x00，进入睡眠，设置定时器。

在 ZigBee 网络中，一旦与协调器建立连接，加入网络后，终端节点之间也可以相互通信，这样就能实现邻接节点的同步。邻接节点之间只需要发送信标帧，通知邻接节点，他们在相同的时间监听，又同时进行休眠。由于通过 ZigBee 协议的网络层，可以获知邻接节点的信息，并且存在邻居表中，这样我们就不需要在 MAC 层再定义一个邻居表，直接使用网络层的邻居表即可。

3.3.2 MAC 层状态转换的实现

MAC 层的状态变量有两个，一个用来标记 MAC 层的工作状态，另一个用来标记射频电路的工作状态。MAC 层的工作状态有如下几种：空闲、睡眠、监听、发送、退避、等待 CTS、等待 DATA、等待 ACK、等待冗余 CTS、等待冗余数据等。射频电路的工作状态有睡眠、空闲、发送、接收。初始时都设置为空闲状态。程序为每个状态设置一个定时器，依靠定时器来中断实现状态转换，在内部有 handle 处理函数在定时器超后来处理相应的事件。MAC 协议状态转换示意图如下：

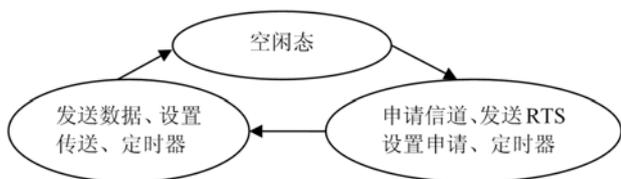


图 3-1. MAC 协议状态转换

4 基于自适应 S-MAC 的 ZigBee 网络的设计与实现

4.1 ZigBee 网络总体设计方案

本方案设计了一个网状网络，如图 4-1 所示，参考 ZigBee 联盟的标准设计了 ZigBee 网络方案 [13][14][15]。在 Linux 操作系统下移植了经改进的 TI(Texas Instruments)提供的协议栈，在此基础上构建短距离无线通信平台。该网络由一个网络协调者和若干网络终端设备构成，除了协调者和终端设备之间可以通信外，设备节点在加入网络后，也可以互相通信。网络协调器负责网络的管理工作，而终端设备一方面采集模拟数据，同时把这些模拟数据通过无线网络发送给协调器，或者已经知道地址的其他终端设备。下面将采用基于射频芯片 CC2520 的短距离无线通信平台作为实例进行性能测试和分析。

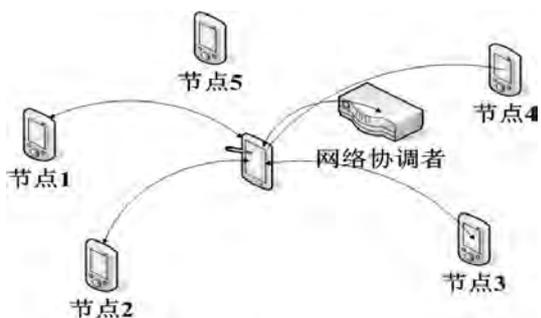


图 4-1. ZigBee 网络拓扑结构

4.2 基于射频芯片 CC2520 的短距离无线通信平台

CC2520 是 TI 公司的第二代 ZigBee/IEEE 802.15.4 RF 收发器，为帧处理，数据缓存，突发传输，数据加密，数据认证，清除信道评估，链路质量指示和帧定时信息提供广泛的硬件支持。这些特征减少了主控端负担。在典型的系统中，CC2520 将和微控制器和一些其他的被动元件一起使用。CC2520 芯片块图解如图 4-2 及实际设备如图 4-3 所示。

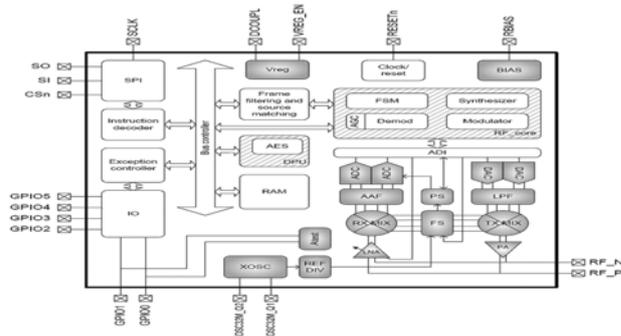


图 4-2. CC2520 芯片块图解

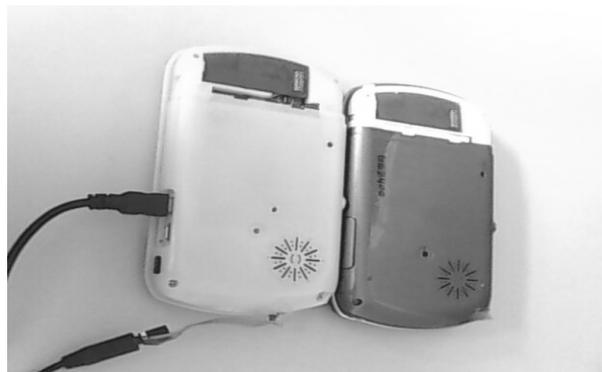


图 4-2 CC2520 芯片实物图

基于 CC2520 射频芯片的短距离无线通信平台是由一个协调器 (FFD) 和两个以上的终端设备 (RFD) 组成，在此平台上可以进行开发多种应用程序 (无线局域网文件传输等)。本应用平台将改进的 ZigBee 协议栈移植到带 MIPS 处理器和 Linux 操作系统的手持设备 (如图 4-2 的实物图所示) 上。此设备利用 CC2520 作为 RF 收发器，ZigBee 协议的物理层 (PHY) 及媒体访问控制层 (MAC) 通过查询和改变寄存器的值来控制 RF 收发器，进行设备通信。

4.3 测试和结果分析

4.3.1 前提条件:

提供相同的供电电压，相同的距离，相同的实验环境(温度等)，只改变测试数据包的大小。

4.3.2 功耗分析:

根据 Adam Dunkels 等提出的功耗测试模型[11]进行分析。

$$\frac{E}{V} = I_m t_m + I_l t_l + I_r t_r + I_c t_c + \sum_i I_{c_i} t_{c_i} \quad (1)$$

其中 V 是供电电压, I_m 是当前的微处理器运行时的电流消耗, t_m 是微处理器的运行时间, I_l 和 t_l 是微处理器在低功耗模式下运行的电流消耗和时间, I_r 和 t_r 是发送模式下的通信电流和时间, I_c 和 t_c 是接收模式下的通信电流和时间。 t_{c_i} 和 I_{c_i} 是其他因素的运行时间和电流消耗, 比如说传感器和 LED 指示灯等。测试发送不同大小的数据包, 所花费的功耗, 所得数据经 MATLAB 模拟可得到如下比较图。

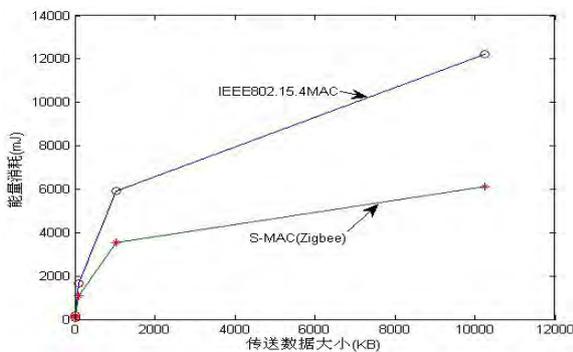


图 4-3. 基于 S-MAC 的 ZigBee 与基于 IEEE802.15.4 MAC 的 ZigBee 功耗曲线图

由图 4-3 的分析可知, 在数据包的大小逐步加大的时候, 发现基于 S-MAC 的功耗明显要比 802.15.4 标准的 MAC 功耗要小很多。由于硬件等相关因素的影响而达不到实验模拟的水平(50%-100%), 但还是有很大的提高, 大概在 30%-50%。

5 总结与展望

本文分析了著名的自适应 S-MAC 协议, 比较其不同于 IEEE802.11 协议的功耗管理, 自适应 S-MAC 的周期性监听和睡眠起到了很好的降低功耗的作用, 并且我们将其很好的运用到 ZigBee 协议栈中, 同时结合 CC2520 芯片的低功耗优势, 设计出了低功耗 MAC 应用软件。经测试使用, 相对于其他传感网络的应用, 本应用程序表现出了较好的性能。由于无线传感网络自身的特点, 设计一种普适的传感器网络 MAC 协议较为困难, 只有结合具体应用实际, 采用合理的工具和方法, 才能把传感器网络 MAC 协议设计得更符合市场需求。

致谢

感谢我的导师符红光老师给我的指导, 他孜孜不倦的教诲让我受益匪浅, 也感谢我的同学跟我一起讨论, 他们给了我很大的帮助, 使我的论文顺利完成。

References (参考文献)

- [1] William C Craig. ZigBee: "Wireless Control That Simply Works" [EB/OL] <http://www.ZigBee.org>, 2003-05.
- [2] A. El-Hoiydi, "Energy Efficient Medium Access Control for Wireless Sensor Networks," Ph.D. dissertation, Swiss Federal Institute of Technology(EPFL), 2005.
- [3] G. P. Halkes and K. G. Langendoen, "Crankshaft: An Energy-Efficient MAC-Protocol for Dense Wireless Sensor Networks", in Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks(EWSN 2007), 2007
- [4] S. Mählknecht and M. Bock, "CSMA-MPS: a minimum preamble sampling MAC protocol for low power wireless sensor networks," in Proceedings of 2004 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2004, pp.73-80
- [5] L. van Hoesel and P. Havinga, "A Lightweight Medium Access Protocol(LMAC) for Wireless Sensor Networks," in Proceedings of the 1st International Workshop on Networked Sensing Systems(INSS 2004), 2003
- [6] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in Proceedings of the Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM), vol. 3, 2002, pp.1567-1576
- [7] W. Ye, F. Silva, and J. Heidemann, "Ultra-Low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling," in Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems,2006, pp.321-334.
- [8] AKyildiz, "Wireless sensor networks: a survey," Computer Networks, vol.38, no.4, p.393, 2002
- [9] Wei Ye, J. Heidemann, D.Estrin. Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks. IEEE ACM Transactions on Networking. June 2004, 12(3):493-506.
- [10] Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specification, IEEE Std. 802.11-1999 edition.
- [11] Adam Dunkels, Fredrik Osterlind, Nicolas Tsiftes, Zhitao He, "Software-based On-line Energy Estimation for Sensor Nodes", ACM EmNets'07, Cork, Ireland, June 25-26, 2007
- [12] M. Stemm and R. H. Katz, "Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices," IEICE Trans. Comm., vol. E80-B, no. 8, pp. 1125-1131, Aug. 1997.
- [13] The ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org>
- [14] Freescale Semiconductor, <http://www.freescale.com>
- [15] ZigBee Alliance, ZigBee Specification v1.1, Nov.2006