

Design and Implementation of a 6LoWPAN Gateway

WANG Xiaonan^{1,2*}, QIAN Huaran¹, TANG Zhenmin¹

1. School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu Jiangsu, 215500, China;
2. School of Computer Engineering and Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China

Abstract : This paper proposes a 6LoWPAN gateway and expounds the hardware and software design of the gateway. In a small-scale experimental platform the performance parameters of the gateway, including packet reception rate, average delay time and average consuming-energy, are compared and analyzed. The experimental data demonstrate that the gateway can perform the connection between a wireless network and an IPv6 network very well and can ensure the continuity of the communication between them.

Key words : sensor network; gateway; adaption layer; protocol

EEACC : 6150P; 6230

6LoWPAN 网关的设计与实现

王晓喃^{1,2*}, 钱焕延¹, 唐振民¹

(1. 常熟理工学院计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500; 2. 南京理工大学计算机工程与技术学院, 南京 210094)

摘 要 : 本文提出了一种基于 6LoWPAN 的传感器网关, 并对网关中的硬件与软件设计进行了详细的论述与讨论。在小型实验平台上对本网关的数据包接收率、平均延迟时间以及平均消耗能量等性能参数进行了比较分析。实验数据表明, 本网关能很好地实现无线传感器网络与 IPv6 网络的互联并保证其连续性。

关键词 : 传感器网络; 网关; 适配层; 协议

中图分类号 : TP393.03

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2009)05-0717-05

无线传感器网络 (WSN) 已经成为当前国际上备受关注的、知识高度集成的前沿热点研究领域之一。就无线传感器网络而言, 它必须和一个外部网络连接在一起, 使外部网络可以监测和控制无线传感器网络才具有更真实的意义。无论从地理范围还是从网络规模来讲, Internet 互联网都是最大的一种网络, 并且 IPv6 的很多良好特性使得某些无线传感器网络的应用成为可能, 因此实现无线传感器网络和 (IPv6) Internet 网络互联具有重大意义。但是, WSN 中的节点受自身硬件资源以及部署环境中网络基础设施等条件的限制, 因此 WSN 直接接入传统网络 (如以太网, 无线局域网等) 是不切实际的。

在这种情况下, 本文提出了一种将 WSN 接入承载 IPv6 以太网的方法, 此方法有效地降低了传感器网络接入以太网的成本, 并提高了转发效率。

1 网关的设计

1.1 网关概述

当 WSN 接入承载 IPv6 的以太网来实现传感器节点与 IPv6 节点之间的全 IP 互联方式时, 传感器节点必须实现 IPv6 协议。但是在硬件资源受限的传感器节点上实现完整的 IPv6 网络协议是不可能的, 必须借助网络接入设备 (网关) 来实现传感器网络与 IPv6 网络的互联, 如图 1 所示。鉴于 WSN 中传输的数据量相对较少, 本系统在传感器节点上使用精简网络协议, 此外, 系统中的传感器网络是基于 6LoWPAN 的, 所以链路层采用 IEEE802.15.4 帧格式。这样, WSN 接入承载 IPv6 的以太网的网关就必须完成以下两个任务: 精简 IPv6 网络协议与完整 IPv6 网络协议之间的转换; 以太网帧与 IEEE802.15.4 帧的转换。

收稿日期: 2008-12-22 修改日期: 2009-01-30

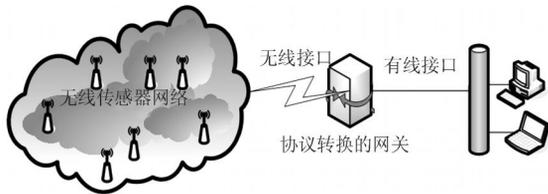


图1 网关示意图

1.2 网关的硬件设计

本系统中的网关采用如下配置：

1) MCU (Micro Controller Unit) : S3C2410 处理器, ARM920T 内核, 32 位处理器, 203 MHz; 64 MB Nand Flash 存储器; 64 MB SDRAM; 1 个 LCD 控制器(支持 STN 和 TFT 带有触摸屏的液晶显示器); SDRAM 控制器; 3 个通道的 UART; 4 个通道的 DMA; 4 个具有 PWM 功能的计时器和 1 个内部时钟; 8 通道的 10 位 ADC; 触摸屏接口; 1 个 USB 主机接口, 1 个 USB 设备接口; 2 个 SPI 接口; SD 接口和 MMC 卡接口; 117 位通用 I/O 口和 24 位外部中断源。

2) 射频芯片: CC2420 为 2.4 GHz IEEE802.15.4 标准的射频收发器; 以 0.18 μm CMOS 工艺制成, 性能稳定且功耗极低; 支持数据传输率高达 250 kbit/s; 内部含有 368 bit 的 RAM, 被分为 3 个 bank, 其中, bank0 大小为 128 个字节的, 用于存放待发送的数据, bank1 大小为 128 个字节, 用于存放 CC2420 接收到的数据, bank2 大小为 112 个字节, 用于存储 CC2420 的 16 位网络地址、64 位 IEEE 地址及密钥等一些信息; 内部有 50 个寄存器, 其中状态和配置寄存器 33 个, 用于设置 CC2420 的工作模式, 命令寄存器 15 个, 对不同的命令寄存器写入特定格式的命令字, 就会执行相应的动作, 其余 2 个是用来访问 TXFIFO 和 RXFIFO 的 8 位数据寄存器, 可以通过这两个寄存器读写 TXFIFO 和 RXFIFO 中的数据。

3) 以太网接口: CS8900A 是低功耗、性能优越的 16 位以太网控制器; 符合 IEEE802.3 以太网标准, 并带有 ISA 接口; 片内包含 4 kbyte RAM; 适用于 I/O 操作模式, 存储器操作模式和 DMA 操作模式; 带有传送、接收低通滤波的 10Base-T 连接端口; 支持 10Base2、10Base5 和 10Base-F 的 AUI 自动重发; 最大电流消耗为 55mA (5V 电源); 全双工操作; 支持外部 EEPROM。

网关的硬件接口图如图 2 所示。

CS8900A 由 S3C2410 的 nGCS3 信号选通。S3C2410 通过 SBHE、nIOW 和 nIOR 等控制信号线实现对 CS8900A 的工作方式控制和读写操作。当

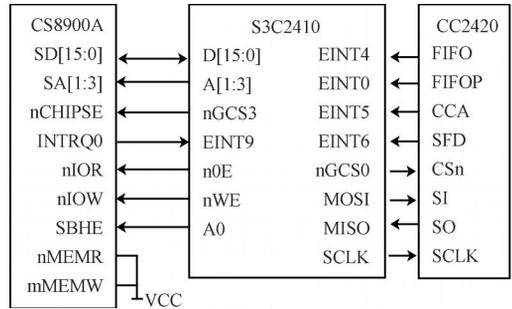


图2 网关硬件接口图

CS8900A 有硬件复位或软件复位时, 它将默认成为 8 位工作模式。因此, 要使 CS8900A 工作于 16 位模式, 必须在访问之前提供给总线高位使能管脚 (SBHE) 一个由高到低、再由低到高变化的电平信号。S3C2410 通过 CS8900A 的 INTRQ0 端产生中断信号实现数据的接收, 接收的数据为以太网帧(如表 1 所示)。CS8900A 与 S3C2410 之间的数据传输采用的是默认的 I/O 模式, 因此, 读写管脚 nMEMW 和 nMEMR 被置高, 以关闭 Memory 方式。在此模式下, 用 3 根地址线就可以实现对所有寄存器的访问, 即管脚 SA1、SA2 和 SA3 对应接到 S3C2410 的地址线 A1、A2 和 A3 上即可。

表1 以太网帧格式

前同步码	帧起始标志符	目的地址	源地址	类型	帧实体	帧校验序列
7B(值为 0XAA)	1B(值为 0XAB)	6B	6B	2B	(46-1500) B	4B

CC2420 通过 4 线 SPI 总线 (SI, SO, SCLK, CSn) 设置芯片的工作模式, 并实现读/写缓存数据及状态寄存器等操作, CC2420 通过控制 FIFO 和 FIFOP 管脚接口状态来设置发射/接收缓存器。CC2420 为 IEEE802.15.4 数据帧格式(如表 2 所示)提供了硬件支持, 发送或接收的数据帧被送入 RAM 中的 128 byte 缓存区进行相应的帧封装和帧拆除操作, 即硬件自动产生和去除同步帧, 以及当 MODEMCTRL0.AUTOCRC 控制位置位时, 帧校验序列自动产生 2 byte, 并由 CC2420 硬件自动插入帧中。S3C2410 需要 CC2420 发送数据时, 它首先通过写 TXFIFO 寄存器把需要发送的数据包按字节依次写入到发送缓存区 TXFIFO 中, 依次为数据帧的帧长度[1B]、帧控制字段[2B]、序列号[1B]、PAN 标识符[2B]、目标地址[2B]、源地址[2B]、有效载荷[(帧长度 - (2 + 1 + 2 + 2))]和帧校验序列[2B], 然后选通寄存器 STXON 或 STXONCCA, 等待信道空闲时从无线信道发送。当 CC2420 接收到数据包时, 把接收到的数据存入到接收缓存区

RXFIFO,同时改变 FIFOP 引脚的状态,处理器通过 FIFOP 的引脚中断读 RXFIFO 寄存器依次读取整个数据包。

表 2 IEEE802.15.4 数据帧格式

同步帧		PHY 头帧		MAC 帧			
前导	帧起始	帧长度	帧序列	序列控制	地址	帧实体	帧校验
序列	分隔符	帧长度	控制	号	地址	实体	序列
4B	1B	1B	2B	1B	6B	nB	2B

1.3 网关的软件设计

6LoWPAN 网关的软件结构框架如图 3 所示。



图 3 软件结构框架

其中,硬件抽象层实现小节 1.2 中所描述的在硬件层面的数据发送和接收等功能以及以太网帧与 IEEE802.15.4 帧之间的转换;适配层实现 IPv6 数据包分片以及分片重组等功能;应用层主要实现精简 IPv6 网络协议与完整 IPv6 网络协议之间的转换等功能。

1.3.1 硬件抽象层的设计

本系统中,硬件抽象层包括无线接口硬件抽象层与有线接口硬件抽象层,它们实现的功能分别为:

(1) 无线接口硬件抽象层:从无线接口接收 IEEE802.15.4 数据帧,并将帧实体提交给适配层处理;从适配层接收帧实体数据,并用 IEEE802.15.4 帧头对帧实体进行封装,通过无线接口发送出去,这里,IEEE802.15.4 帧头中的目的地址为目的传感器节点的 16 bit 短地址,源地址为网关的 16 bit 短地址。

(2) 有线接口硬件抽象层:从有线接口接收以太网数据帧,并将帧实体提交给应用层处理;从应用层接收帧实体数据,并用以太网帧头对帧实体进行封装,通过有线接口发送出去,这里,以太网帧头中的目的地址为下一跳的 MAC 地址,源地址为网关的 MAC 地址。

1.3.2 适配层的设计

在 6LoWPAN 中,由于 IPv6 数据包支持的最小值(1280byte)大于 IEEE802.15.4 帧所能包含的字节数(127byte),因此,在传感器网络中传输一个完整的 IPv6 数据包时必须对其进行分片处理,而此数据包在 IPv6 网络中传输时则可能无需进行分片,此外,IPv6 将分片重组信息放在扩展头部进行处理,而在 6LoWPAN 中的 IPv6 头部包含扩展头部势必带来不小的开销,因此本系统将 IPv6 分片信息

放在适配层。本系统设计了 2 种适配层头部:不分片报文头部与分片报文头部,其中,分片报文头部中又分为第一片报文头部与后继报文头部。

不分片报文头部格式:

2bit	1bit	5bit	IPv6 Packet
LF	Pro_Type	RSV	Payload

LF 链路分片(Link Fragment),其中 00 表示不分片,01 表示第一片,10 表示最后一片,11 表示中间分片,此处为 00;Pro_Type:指出 Payload 中 IPv6 头部是否为压缩类型,0 表示未压缩的 IPv6 头部,1 表示压缩头部;RSV:保留,全部设置为 0;Payload:适配层的负载部分,内容为 IPv6 数据包。为了节省空间,适配层并不设置地址字段,它可以通过硬件抽象层从帧头部获取地址信息。

分片报文的第一片报文头部格式:

2bit	1bit	13bit	IPv6 Packet
LF	Pro_Type	Identification	Payload

LF 链路分片(Link Fragment),此处为 01;Identification 此字段唯一标识一个被分片的 IPv6 数据包,该值在 IPv6 数据包的每个分片中的值都相同。

分片报文的后继报文头部格式:

2bit	1bit	13bit	1Byte	IPv6 Packet
LF	Pro_Type	Identification	F_Offset	Payload

LF 链路分片(Link Fragment),此处为 10 或 11;

F_Offset 指出分片报文偏移原始数据包开始处的位置,偏移的字节数是此字段值乘以 8。

本系统中,适配层实现如下功能:

(1) 适配层从应用层接收数据,并根据 IPv6 数据包的大小来确定是否需要分片,如果不需要分片,则用不分片报文头部对数据包进行封装,否则,对 IPv6 数据包进行分片,并分别用第一片报文头部与后继报文头部对其进行封装,最后将封装之后的数据(即帧实体数据)发送给无线接口硬件抽象层处理;

(2) 适配层从无线接口硬件抽象层获取数据,并分析适配层头部结构,如果是分片报文,适配层将等待其他报文的到来,并负责将同一个 IPv6 报文中的分片报文进行重组,最后将整个 IPv6 报文提交给应用层处理。

1.3.3 应用层的设计

本系统对 IPv6 报头进行如下精简:由于传感器节点的报文处理比较简单,故不实现扩展头部。另

外,IPv6 报文头部的 Version、Traffic Class 和 Flow Label 域一般情况下都是常数,而 Payload Length 的值可以通过底层 MAC 帧中的长度域计算出来,因此可以对 Version、Traffic Class、Flow Label、Payload Length 以及 Next Header 域进行压缩。本系统为 IPv6 报文引入一个控制域,在控制域后是 IPv6 头部和 IPv6 报文载荷,具体的报文格式如图 4 所示,控制域定义了 IPv6 报文头部各个域的格式,具体内容如图 5 所示。

字节数:1	可变
头部控制	IPv6 头部和 IPv6 报文载荷

图 4 精简的 IPv6 报文格式

1bit	2bit	1bit	1bit	3bit
Version, Traffic Class, Flow Label	Next Header	S_Addr	D_Addr	RSV

图 5 IPv6 头部控制域

IPv6 头部控制域中每个比特位的具体含义如下:

Version、Traffic Class、Flow Label:0 上述三个字段在报文中仍然存在,没有压缩;1 报文中存在上述三个字段,并且默认值为 Version = 6, Traffic Class = 0, Flow Label = 0;

Next Header:

00 没有压缩,即在 Payload 中存在 Next Header 域;01 在 Payload 中不存在 Next Header 域,并且 IPv6 载荷是 ICMPv6 报文;10 在 Payload 中不存在 Next Header 域,并且 IPv6 载荷是 UDPv6 报文;11 预留,(因为无线传感器网络一般不实现 TCP);

S_Addr:

0 没有压缩,即在报文中是 128 比特;1 压缩地址,即 16 位短地址;

D_Addr:

0 没有压缩,即在报文中是 128 比特;1 压缩地址,即 16 bit 短地址。

本系统中,应用层软件具有如下功能:

(1) 应用层从有线接口硬件抽象层接收数据,并对 IPv6 报头进行精简,最后将精简的 IPv6 报文发送给适配层处理;

(2) 应用层从适配层获取数据,对精简的 IPv6 报头进行恢复,最后将完整的 IPv6 报文发送给有线接口硬件抽象层进行处理。

2 性能分析

我们设置了小型的实验平台来测试网关是否能

实现传感器节点与 IPv6 节点的正确通信。实验平台中包括 30 个传感器节点,每个传感器节点由 ATMEGAL128 微控制器与 CC2420 射频芯片组成,传感器节点与网关在初始状态下的电池能量都为 2 J。通过在 IPv6 节点上向传感器节点(IPv6 地址为 3fe8:1:1:1:1:1:1:1220/112)发送 Ping 报文来测试传感器节点的可达性,实验结果如图 6 所示。实验中数据源的传输速率设置在 128bit/s 至 1 024 bit/s 之间,传感器的带宽设置为 19.2 kbit/s。实验对网关的数据包接收率、平均延迟时间以及平均消耗能量等性能进行了分析,其中,数据包接收率指接收方接收到的数据包总数与发送方发送的数据包总数的比值,平均延迟时间是指发送方发送数据包时刻到接收方接收到数据包时刻之间的时间间隔平均值,平均消耗能量指网关在每个轮回中消耗能量的平均值(轮回指网关从初始化到稳定接收传送数据的一个工作周期),分析结果如图 7 所示。实验采用如下参数测试平均消耗能量:两个距离 r 米的传感器节点传输 k 比特数据所消耗的能量可用如下公式计算:

$$E_T(k, r) = k(E_{Tx} + r^2)$$

$$E_R(k) = kE_{Rx}$$

其中, $E_T(k, r)$ 为源节点发送 k bit 数据所消耗的总能量, E_{Tx} 为发送 1 bit 所消耗的能量,本实验

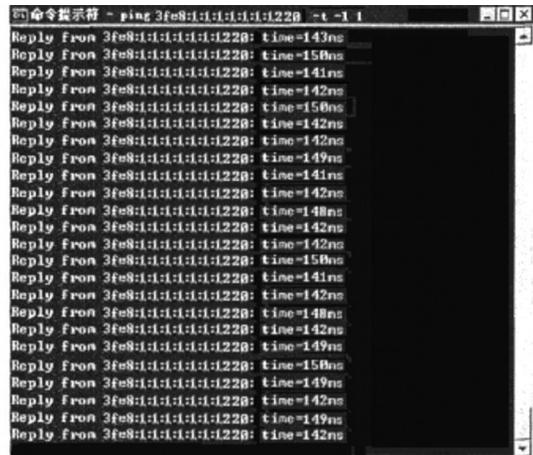
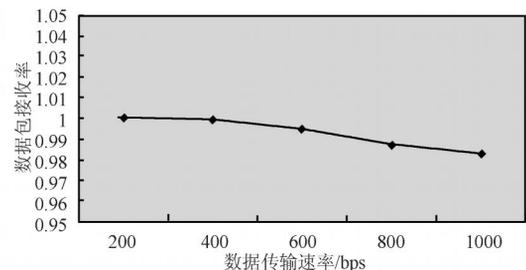
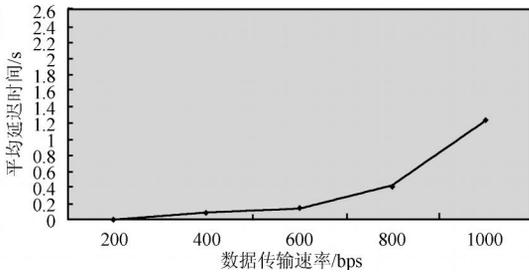


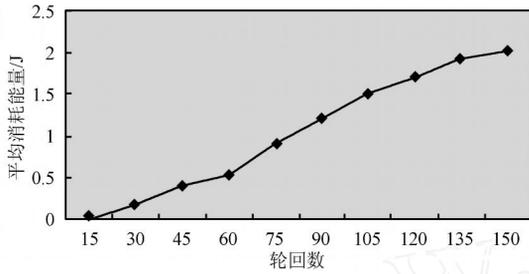
图 6 传感器节点与 IPv6 节点互通实验



(a) 数据包接收率



(b) 平均延迟时间



(c) 平均消耗能量

图 7 性能分析

设定此值为 50 nJ/bit, 为信号放大器的放大倍数, 此值设定为 10 pJ/b/m²; $E_r(k)$ 为目的节点接收 k bit 数据所耗费的能量, E_x 为接收 1 bit 所消耗的能量, 此值设定为 50 nJ/bit。

3 结论

本文提出了一种基于 6LoWPAN 的传感器网关设计方案, 并对网关的硬件与软件设计进行了详细的论述与讨论。最后, 在小型的试验平台上对本网关的数据包接收率、平均延迟时间以及平均消耗能量等性能参数进行了比较分析。实验数据表明, 本网关能很好地实现无线传感器网络与 IPv6 网络的互联并确保其连续性。

参考文献:

- [1] Akkaya K, Younis M. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks, Ad Hoc Networks, 2005, 3(3), 325-349.
- [2] AI Karaki J N, Kamal A E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey, IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6), 6-28.
- [3] ShijinDai L, Jing Xiaorong. Research and Analysis on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems, Hong Kong, China, 2005.
- [4] Wang X, Berger T. Self-Organizing Redundancy Cellular Architecture for Wire-Less Sensor Networks[C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, It haea, NY, USA, March 2005.
- [5] Dunkels A, Voigt T, Alonso J, Making TCP/ IP Viable for Wireless Sensor Networks [C]// Proeedings of EuroPan Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN, 04), Berlin, Germany January 2004.
- [6] IETF Draft, 6LoWPAN: Overview, Assumptions, Problem Statement and Goal draft-ietf-6lowPan-Problem-08 [Z]. txt, March 2007.
- [7] IETF Draft, Transmission of IPv6 Packets over IEEE802. 15. 4 Networks, Draft-Ietf-6lowPan-format-11 [Z]. txt, March 2007.
- [8] Olivier B, Florenee M, Laurent M. Modeling and Analysis of Wireless Sensor Networks[J]. France Telecom R&M/ Verimag. December 2006.
- [9] Olvezky P C, Thorvaldsen S. Formal Modeling and Analysis of the OGDC Wireless Sensor Network Algorithm in Real-Time Mode[C]// Proceedings of the 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium 2006 (IPDPS2006), Rjode-sIsland, Greeee, 25-29 April 2006.
- [10] Kim H H, hong C S. A Routing Scheme for Supporting Network Mobility of Sensor Network Based on 6LoWPAN[C]// APNOMS 2007, LNCS 4773, 155-164. 2007.



王晓喃(1973-),女,博士后,主要从事下一代网络协议与通信模型研究;



唐振民(1961-),男,教授,博士生导师,从事智能机器人系统技术和图象处理与目标识别技术。



钱焕延(1950-),男,博士生导师,主要从事下一代网络协议与通信模型研究;