

文章编号: 2095-4980(2018)02-312-05

轻量级 WSN 分层协议栈的设计与实现

顾 剑, 李文钧

(杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 传统无线网络协议栈存在硬件兼容性弱、内存和 CPU 占用率高、函数接口复杂等问题, 采用此类协议栈将提高项目开发的软硬件成本。设计一种轻量级分层协议栈, 通过协议栈架构的分层设计、底层的开放式设计、函数的可重入设计等, 使其具有低系统资源占用率、高可移植性和多网卡协同工作的特点。采用 IAR EW8051, KEIL MDK, STM32CUBE 等作为软件平台, 进行协议栈程序的开发与测试。测试结果表明, 该协议栈代码量小, 可应用于 CC1100, CC2500, SI4463, SX1278 等无线芯片, 且能有效应对复杂环境下的信号干扰, 提升点对多通信效果, 有较高的实用价值。

关键词: 无线传感器网络; 分层协议栈; 轻量级; 多网卡

中图分类号: TN925

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0312

Design and implementation of lightweight layered protocol stack for WSN

GU Jian, LI Wenjun

(School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310000, China)

Abstract: Traditional wireless network protocol stacks have some problems, such as weak hardware compatibility, high memory and CPU usage, complex function interface and so on. Using such stacks will increase the cost of software and hardware for project development. In this paper, a lightweight layered protocol stack is designed through the hierarchical design of protocol stack architecture, the open design of hardware layer, the re-entrant design of function. It has the characteristics of low system resource occupancy, high portability and multi-card cooperation. IAR EW8051, KEIL MDK, STM32CUBE are utilized as software platforms to develop and test protocol stack. The test results show that this protocol stack can be applied to wireless chips such as CC1100, CC2500, SI4463 and SX1278, and it can effectively deal with signal interference in complex environment and enhance the effect of point-to-multipoint communication, which has high practical value.

Keywords: Wireless Sensor Networks(WSN); layered protocol stack; lightweight; multi-card

随着物联网的发展, 无线传感器网络(WSN)被广泛应用于工业生产、环境监测、智能家居等领域。WSN 是以传感器和无线通信设备为中心, 集成数据采集、处理、传输、控制等多功能的综合智能信息系统^[1]。WSN 协议栈(protocol stack)用于规定网络数据的交互过程。目前主流的无线网络协议栈, 如 WIFI, Bluetooth, ZigBee 等, 只适用于特定频率(仅支持 2.4 GHz)与符合特殊标准的设备, 硬件要求高, 兼容性低^[2]。在农业智能监控系统等领域, 需要布置大量的传感器终端, 若采用此类协议栈, 将会极大增加监控系统的硬件成本^[3]。而基于低端无线芯片进行开发, 又往往没有独立的通信协议栈。直接在物理层上实现业务功能, 会导致代码耦合度过高, 增加功能修改和问题定位的难度, 延长项目开发周期, 增加软件开发成本。因而, 设计一个独立的轻量级且可移植性高的 WSN 协议栈具有较高的实际应用价值。

在本文中, 提出了一种适用于无线传感器网络的轻量级分层协议栈——简易无线网络协议栈(Easy Wireless Network Protocol, EWNP)的设计方案, 并且对所提出协议栈的可移植性、通信效果增益、多网卡功能等, 进行测试与分析。

1 EWNP 协议栈分层模型

对协议栈进行分层设计,使每层完成相应功能,下层为上层提供服务,从而把复杂的通信过程分成多个独立的、比较容易解决的子问题^[4]。参考 TCP/IP 协议模型,将 EWNP 协议栈划分为 4 层结构,自下而上依次为硬件层、网络层、传输层和应用层^[5]。硬件层实现无线芯片的射频收发功能;网络层将数据包发送给最终的目标地址;传输层处理传输过程中数据丢包、错包、乱序等问题,保证无线通信的可靠性;应用层用于项目中业务功能的实现。EWNP 在宏观架构上对协议栈进行功能精简,减少层与层之间的冗余接口,从而降低协议栈内耗,使其更符合无线传感器网络系统资源紧张的特点。

2 EWNP 协议栈分层设计与实现

2.1 精简帧结构

WSN 通信的实质是对数据的封装、传输和解析。EWNP 帧结构如图 1 所示,应用层的有效数据经层层封装,通过硬件层发送数据,整个过程仅增加 14 个字节。各字段作用在下文结合各层功能进行介绍。WIFI,Bluetooth,ZigBee 数据帧的首部字节数依次为 34,17,15(或 31)。相较而言,EWNP 对无线网络带宽的占用较少。

application	type (1)	user data (n+1)				
transport	control (1)	subpackage (1)	ack (1)	application data (n+1)		
network	srcAddr (2)	relayAddr (2)	destAddr (2)	length (1)	check (1)	transport data (n+4)
physical	head (1)	network data (n+12)				end (1)

Fig.1 Frame structure design

图 1 帧结构设计

2.2 硬件层开放式框架与多网卡设计

硬件层对设备寄存器进行操作,实现底层射频通路,而不考虑收发数据的结构和意义。硬件层主要提供硬件初始化、无线收发、空闲信道评估(Clear Channel Assessment, CCA)、接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)等底层函数。无线芯片 CC1100 的载波频率 f_{carrier} 由晶体振荡器 f_{XOSC} 和 FREQ 寄存器控制^[6]:

$$f_{\text{carrier}} = \frac{f_{\text{XOSC}}}{2^{16}} \cdot \text{FREQ}[23:0] \quad (1)$$

信道空间 $\Delta f_{\text{channel}}$ 和滤波带宽 BW_{channel} 由 CHANBW、CHANSPC 和 CHAN 等寄存器控制:

$$\Delta f_{\text{channel}} = \frac{f_{\text{XOSC}}}{2^{18}} \cdot (256 + \text{CHANSPC_M}) \cdot 2^{\text{CHANSPC_E}} \cdot \text{CHAN} \quad (2)$$

$$BW_{\text{channel}} = \frac{f_{\text{XOSC}}}{8 \cdot (4 + \text{CHANBW_M}) \cdot 2^{\text{CHANBW_E}}} \quad (3)$$

无线通信数据率 R_{data} 是最关键的射频参数,由 DRATE 寄存器控制:

$$R_{\text{data}} = \frac{(256 + \text{DRATE_M}) \cdot 2^{\text{DRATE_E}}}{2^{28}} \cdot f_{\text{XOSC}} \quad (4)$$

由式(4)可知,对于给定数据率 R_{data} ,可采用以下算法找到合适的 DRATE 寄存器值:

$$\text{DRATE_E} = \log_2 \left(\frac{R_{\text{data}} \cdot 2^{20}}{f_{\text{XOSC}}} \right) \quad (5)$$

$$\text{DRATE_M} = \frac{R_{\text{data}} \cdot 2^{28}}{f_{\text{XOSC}} \cdot 2^{\text{DRATE_E}}} - 256 \quad (6)$$

EWNP 硬件层提供逻辑代码和函数框架。底层驱动的具体实现由开发者在协议栈提供的函数框架下根据相应无线设备进行完善,不依赖特定硬件,拥有更高的可移植性。在该层设计 Network_Card 结构体,封装网卡名、网卡状态、底层操作集、收发帧缓存等信息,每个注册的网卡都对应一个独立的 Network_Card 结构体变量。对关键函数做可重入设计,使用分离的栈空间,并通过关中断、信号量(即 P 和 V 操作)等方式保护全局变量,使函数可被多线程并发访问,从而支持多款无线芯片同时工作。

2.3 网络层流程优化

WSN 对网络层的核心需求是局域网内寻址。EWNP 通过多跳路由的方式实现,即中继节点在转发数据时只指定下一节点的地址,而不是指定到最终目标地址的全部路径^[7]。

EWNP 网络层发送流程如图 2 所示, 主要包含路由选择和网络层首部封装等步骤。路由选择是网络层核心功能。待发送和已接收数据均需进行目标地址、中继地址与本节点地址的匹配。对于不以本节点为最终目标的数据, 通过查询路由表设置下一跳中继地址。网络层首部封装是指发送过程中在网络帧首部添加一个固定格式的网络层帧头, 包括源地址、中继地址、目的地址、帧长和校验等信息。

网络层接收流程是对发送流程的逆处理。首先对接收数据进行地址匹配, 再进行循环冗余校验 (Cyclic Redundancy Check, CRC), 确保数据正确无误。在 TCP/IP 协议中, 网络层和传输层各有一个校验字段, 分别是网络层首部校验和传输层数据校验, 以减少对非本节点接收的大数据校验时间。由于 WSN 每次收发的数据量小, 这种设计失去意义。因此, EWNP 仅在网络层进行全帧数据校验, 精简协议栈工作流程。

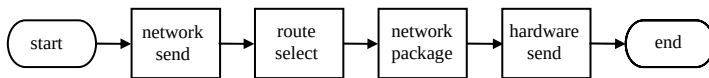


Fig.2 Network layer sending processes
图 2 网络层发送流程

2.4 传输层通信效率与可靠性设计

传输层对应用层屏蔽具体的通信细节, 提供可靠的收发接口函数。如图 3 所示, EWNP 传输层发送流程可分为数据包、信道冲突检测、确认 (ACKnowledgement, ACK) 反馈、错误重传等步骤^[8-9]。传输层发送时, 需将传输控制、分包信息和确认回复等字段填充到传输帧首部。接收过程则对这些字段进行读取分析。无线芯片单次发送数据量有限, 例如 CC1100 的先入先出队列 (First Input First Output, FIFO) 只有 64 字节, 即单次最多只能发送 64 个字节的数据。当发送数据长度大于单次最大传输单元 (Maximum Transmission Unit, MTU) 时要对数据进行分包处理。分包信息存于一个字节中, 分包号和总包号各占 4 位, 最多可分 16 包。EWNP 提供 MTU 独立设置接口, 可以根据芯片特性进行最优化设置。

发送端发送完一帧数据, 并在设定周期内接收到正确 ACK 响应, 则认为该帧数据发送成功。EWNP 提供 ACK 有效载荷填充接口。ACK 一般仅作接收确认使用, 这就造成网络资源浪费。设计 ACK 有效载荷填充功能, 将一些及时性较低的数据或命令填充到对应 ACK 消息链表中, 发送端通过 ACK 带回数据, 并在下一次主动发送中添加对 ACK 的反馈信息。这种设计使一次通信达到双向数据传输效果, 提高了对网络资源的利用率。

防碰撞机制和错误重传功能的实现极大增强了数据传输的可靠性。调用硬件层 CCA 接口检测信道状态, 若信道空闲则调用网络层发送接口发送数据。当信道忙时, 则根据随机退避算法来避免无线通信的竞争和冲突。

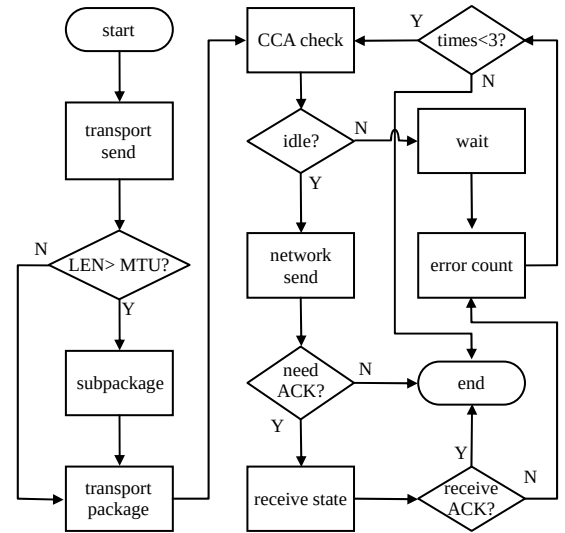


Fig.3 Transport layer sending process
图 3 传输层发送流程

$$T_{\text{delay}} = \text{Jiffies} + \frac{L_{\text{data}}}{R_{\text{data}}} + \text{Random}() \% 5 \quad (7)$$

式中: T_{delay} 是一个无符号整形数据, 表示 CCA 下次检测时间点; Jiffies 表示系统当前实时时钟 (Real-Time Clock, RTC); L_{data} 和 R_{data} 为数据长度 (单位: Byte) 和传输速率 (单位: kByte/s); $\text{Random}()$ 为随机数产生函数。

2.5 应用层数据维护与组网功能

应用层是 EWNP 协议栈的最高层, 提供数据维护功能。待发送和已接收的有效数据, 分别存储在该层的发送数据链表和接收数据链表中等待处理。可根据节点状态对数据进行增、删、改等操作。

将组网功能置于应用层可简化 EWNP 的帧结构和数据处理流程。节点入网请求时, 首先进行信道扫描。轮流切换信道并广播入网请求帧, 只有比该节点高一阶度的设备才会反馈 ACK 消息。根据消息中包含的 RSSI 值和子节点数进行信道质量计算。

$$\text{Chan_Val} = \frac{\text{RSSI}}{-100} \times 0.7 + \frac{\text{Nod_Num}}{256} \times 0.3 \quad (8)$$

式中: Chan_Val 为信道质量指标, 优先选择数值较小的节点入网; Nod_Num 表示子节点数; RSSI 表示接收信号实际强度, 单位是 dBm。根据硬件检测的 RSSI_dec 值, 计算 RSSI :

$$\text{RSSI} = \frac{(\text{RSSI_dec} - 256)}{2} - \text{RSSI_offset}, \text{ while } \text{RSSI_dec} > 128 \quad (9)$$

$$RSSI = \frac{RSSI_dec}{2} - RSSI_offset, \text{ while } RSSI_dec \leq 128 \quad (10)$$

式(9)和式(10)中, $RSSI_offset$ 表示偏差值, 单位为 dBm。加入 WSN 网络后, 子节点定时向父节点发送心跳包, 表示网络在线。若连续 10 个心跳周期内, 父节点没有接收到子节点的心跳包, 则认为子节点“死亡”, 生成警告消息。此外, 开发者可根据项目需求在该层进行业务相关的高层协议开发。

3 EWNP 协议栈测试与分析

3.1 轻量化与可移植性测试

使用 TI 公司生产的低功耗无线通信处理器 CC1110 及其调试下载器 SmartRF04EB 作为硬件平台。CC1110 集成高性能射频收发器 CC1100 和增强型 8051 处理器, 拥有 32 kB flash 和 4 kB RAM。无线传输速率最高可达 500 kBaud, 在 1.2 kBaud 速率下的灵敏度可达 -110 dBm。工作频率范围是 300~348 MHz, 391~464 MHz 和 782~928 MHz。WIN7 环境下, 用 IAR EW8051 V1.2 作为软件开发平台, 用 XCOM V2.0 作为串口调试工具。

经 IAR EW8051 编译调试, EWNP 总代码量约为 8 kB, 并在 CC1110 处理器上运行效果良好。基于 EWNP 硬件层的开放式设计, 作者成功将其移植到 CC2500, SI4463, SX1278 等无线芯片并测试通过。结果表明, EWNP 达到了预期的轻量化设计目标, 具有较高的硬件兼容性和可移植性。

3.2 通信增益效果测试

点对点 and 点对多通信是无线传感器网络的基础。实验组调用 EWNP 协议栈的接口函数进行通信, 对照组则直接调用硬件层函数收发数据。测试 10 s 内实验组和对照组的有效传输帧数。射频参数及测试条件见表 1。

表 1 射频参数及测试条件
Table1 RF parameters and test conditions

base band	modulation	data rate	data length	frequency offset	channel space	receive filter bandwidth	transmission distance	transmission power	testing time
433 MHz	GFSK	38.4 kBaud	64 Byte	20 kHz	200 kHz	100 kHz	10 m	10 dBm	10 s

点对点通信时, 单一信道内总是只有一个设备在发送数据, 是无信号干扰的理想通信方式。实验组(test group)与对照组(control group)点对点测试结果如表 2 所示。每组的接收帧数与发送帧数相同, 说明 2 组都没有出现丢包、错包现象。对照组 10 s 内接收帧数为 554 帧, 每帧数据长度为 64 字节, 相当于 28.4 kBaud 的实际传输速率(射频参数中 38.4 kBaud 传输速率仅指无线通信时的数据率, 不包括接口调用等程序运行耗时)。

实验组接收端 10 s 内接收帧数为 342 帧, 同时发出 342 帧 ACK 消息。ACK 消息中填充 18 字节有效载荷, 总长度为 32 字节。故实验组的实际数据传输速率为 26.3 kBaud, 略小于对照组数据率。说明在近距离无干扰的通信环境下, EWNP 协议栈的通信增益效果不明显, 且由于 ACK 反馈和协议处理产生的内部开销, 导致有效数据的传输速率有所下降。

表 2 点对点测试结果

Table2 Point to point test results

point to point	number of sender send	number of receiver receive
control group	554	554
test group	342	342

点对多通信时, 同一时间内可能有多个设备发送数据, 造成信号相互干扰的通信环境。实验组与对照组的点对多测试结果如表 3 所示。对照组中每个发送端在 10 s 内的发送帧数与其点对点通信时帧数相同, 为 554 帧, 而该组接收端正确接收的数据仅 66 帧。相较于对照组点对点通信效率的降幅达 88.1%。这表明在多点同时发送的条件下, 该组数据接收陷入紊乱状态, 丢包、错包率较高。

表 3 点对多测试结果

Table3 Point to multipoint test results

point to multipoint	state of transmission	number of sender1 send	number of sender2 send	number of sender3 send	number of receiver receive
control group	SUCCESS	554	554	554	66
	SUCCESS	94	74	127	295
test group	ACK_ERROR	2	4	1	—
	ACK_TIMEOUT	25	18	24	—
	CCA_ERROR	42	43	33	—

实验组发送端发送状态分为 SUCCESS, ACK_ERROR, ACK_TIMEOUT 和 CCA_ERROR。SUCCESS 表示发送完成并接收到正确 ACK; ACK_ERROR 表示发送完成, 但接收到错误 ACK; ACK_TIMEOUT 表示发送完成, 但在设定时间内没有收到 ACK; CCA_ERROR 则表示信道忙, 取消发送。实验组 3 个发送端 10 s 内发送状态为 SUCCESS 的帧数分别是 94, 74 和 127 帧, 即发送端与接收端的有效传输帧数为 295 帧。相较于实验组点对点通信, 效率下降 13.7%, 同时是对照组点对多通信效率的 4.47 倍。这表明 EWNP 协议栈通过信道检测、随机

退避等防撞机制,有效避免了复杂通信环境下的信号干扰,降低了数据传输过程中的丢包率和错包率。

3.3 多网卡测试

使用 STM32CUBE 开发软件在 STM32F103 上搭载 FreeRTOS 嵌入式实时操作系统,并将 EWNP 协议栈移植到该系统。在系统初始化时注册 2 张网卡,即定义 2 个 Network_Card 结构体变量,分别用于 CC2500 和 SX1278 两款无线芯片。FreeRTOS 操作系统的多线程可并发调用 EWNP 接口函数,同时执行两款芯片的无线收发操作,表明协议栈具备多网卡功能。

CC2500 是一款 2.4 GHz 的高性能射频收发器,传输速度快,穿透能力弱,传输距离近。SX1278 是一款支持 LoRa 扩频技术的 433 MHz 无线芯片,传输速度慢,距离远,穿透、绕射能力强。多网卡功能可以结合两者的优点,作为无线传感器网络中继使用,具有较高的实用价值。

4 结论

测试结果表明,EWNP 分层协议栈达到了预期的轻量化设计目标,且硬件兼容性强,适用于绝大多数低端微处理器和无线芯片。该协议栈可以有效提高点对多通信效果,更能适应复杂的网络通信环境,满足构建无线传感器网络的需求。同时,EWNP 协议栈允许多网卡协同工作,使其能够结合不同无线芯片的功能特性,作为特殊的网络中继使用,拓展项目开发思路。综上所述,采用 EWNP 轻量级分层协议栈,可以组建低成本高性能的无线传感器网络,具有较高的实用价值和良好的应用前景。

参考文献:

- [1] KR A,KAMDAR N,VYAS D,et al. Design and implementation of a cross layered protocol stack for sensor networks in an indoor environment[C]// International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. Indore,India:IEEE, 2012:1-6.
- [2] LI Xue Zhu. Research on application of wireless sensor network in ecological monitoring[J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2013,7(3):374-380.
- [3] 李小龙,彭美平. ZigBee 传感器网络协议栈的研究与分析[J]. 电脑知识与技术, 2013,9(18):4220-4222. (LI Xiaolong, PENG Meiping. Research and analysis on the protocol stack of ZigBee sensor networks[J]. Computer Knowledge and Technology, 2013,9(18):4220-4222.)
- [4] 霍岐生,周开利,王颖,等. 无线传感器网络在蔬菜大棚中的应用[J]. 电子技术, 2012,39(3):49-50. (HUO Qisheng, ZHOU Kaili,WANG Ying,et al. The application of wireless sensor network in vegetable sheds[J]. Electronic Technology, 2012,39(3):49-50.)
- [5] THASKANI S,KUMAR K V,MURTHY G R. Energy efficient cross-layer design protocol by using token passing mechanism for WSN[C]// 2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics(ISCi). Kuala Lumpur,Malaysia:IEEE, 2011:572-575.
- [6] HASSAN A E,RASHED M Z,SHARAF A I. Lightweight TCP/IP architecture model for embedded systems using SysML[J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010,2(7):3093-3100.
- [7] BAO J,CHEN H B,OU R X,et al. Design of the wireless monitoring system based on CC1100 in greenhouse[J]. Advanced Materials Research, 2014,945-949:2709-2712.
- [8] 屈正庚. 一种无线多媒体传感器网络路径最优路由算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(6):943-947. (QU Zhengeng. A path optimal routing algorithm for wireless multimedia sensor network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(6):943-947.)
- [9] YASHASHWINI T,SUMATHI R,YASHASHWINI T,et al. A cross-layer protocol stack for congestion control in wireless sensor networks[J]. IJCA Special Issue on Advanced Computing and Communication Technologies for HPC Applications, 2012(1):26-31.

作者简介:



顾 剑(1991-),男,浙江省台州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为嵌入式软件开发.email:821010687@qq.com.

李文钧(1977-),男,杭州市人,博士,副教授,主要研究方向为集成电路设计与物联网技术.