



计算机工程
Computer Engineering
ISSN 1000-3428, CN 31-1289/TP

《计算机工程》网络首发论文

题目： 基于 TSCH 模式的工业无线芯片设计与实现
作者： 谢闯，杨志家，王剑
网络首发日期： 2018-02-02
引用格式： 谢闯，杨志家，王剑. 基于 TSCH 模式的工业无线芯片设计与实现. 计算机工程. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1289.TP.20180202.1043.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发纸质期刊已正式录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿的论文。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 TSCH 模式的工业无线芯片设计与实现

谢闯¹, 杨志家¹, 王剑¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016)

摘要: 无线芯片是工业物联网协议实现的硬件基础, 当前商业物联网无线芯片只能实现物联网协议的通信功能, 而时隙调度和同步等功能却依靠软件通过定时中断的方式实现, 因此增加了开发难度、限制了 WIA-PA 等工业无线协议的推广和普及。针对上述问题, 设计了一款支持 TSCH 模式物理层协议的面向物联网的系统级工业无线芯片 WIASoC2400。WIASoC2400 以 IEEE802.15.4e 协议的 TSCH 模式为基础, 基于 ARM Cortex-M3 内核, 并集成 2.4GHz WIA-PA 无线通信模块。此外, 针对工业无线网络中数据传输的安全性要求, 设计了符合 IEEE802.15.4-2006 协议 CCM* 模式安全规范的 AES-128 加解密安全模块。通过对芯片样片进行大量的仿真实验, 测试结果表明, WIASoC2400 能够满足 TSCH 模式下通信的时隙同步精度和跳频要求, 定时更精确、处理速度更快、实现更简单, 能够满足工业无线协议的实时性、稳定性和安全性需求。**关键词:** 工业物联网, 无线芯片, 时隙跳频 TSCH, MAC 层硬件状态机, AES-CCM* 加解密模块

Design and Implementation of TSCH-based Industrial Wireless Protocol SoC

Chuang Xie¹ Zhijia Yang¹ Jian Wang¹

(1. Lab. of Networked Control Systems, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

【Abstract】 Wireless chip is the hardware basis of the implementation of the industrial Internet of Things (IoT) protocol. Current commercial IoT wireless chips can only realize function of communication in IoT protocol. However, they implement functions of time-slot scheduling and synchronization by means of software time-interrupt, which would increase the difficulty of development and limit the popularization of industrial wireless protocols such as WIA-PA. To solve problems mentioned above, in this paper, an industrial wireless network protocol System-on-chip (SoC) for IoT, named WIASoC2400, is designed and implemented. Basing on the Time Slotted Channel Hopping (TSCH) mode in the IEEE802.15.4e standard, WIASoC2400 combines the ARM Cortex-M3 MCU and a 2.4GHz radio module. Besides, in order to meet the security requirements of data transmission in industrial wireless networks, a hardware security accelerator based on the AES-CCM* mode in IEEE802.15.4-2006 standard is designed. A series of simulations and experiments have been carried out on the SoC, and the results demonstrate that the SoC can satisfy requirements of synchronization accuracy and channel hopping in the TSCH mode, and work with more precise timing, faster processing and easier coding. So the WIASoC2400 can satisfy the requirements of real time, reliability and security for the industrial wireless network standard.

【Key words】 Industrial Internet of Things (IoT), Wireless SoC, Time Slotted Channel Hopping (TSCH), MAC Hardware FSM, AES-CCM* security accelerator

1 引言

工业物联网是智能制造的重要内容[1]。无线技术具有成本低、易安装、易维护、稳定性好、扩展性强等优点, 随着工业无线技术的发展, 工业物联网在过程自动化和工厂自动化领域得到了广泛应用[2][3][4]。

工业物联网的广泛应用离不开工业无线协议的制

定。目前, 被国际认可的工业无线协议主要包括 WirelessHART[5]、ISA100.11a[6]、WIA-PA[7] 以及 IEEE802.15.4e[8]等。这四种标准均采用时隙与跳频的思想, 能够有效克服环境干扰, 满足工业生产要求, 被广泛推广和接受[9][10]。时隙跳频 (TSCH) 模式在工业无线协议中得到了具体体现与应用[11]。

基金项目: 国家科技重大专项 (03 专项) 新一代宽带无线移动通信网 高实时 WIA-PA 网络片上系统 (SoC) 研发与示范应用 2015ZX03003010; 中国科学院重点实验室: 网络化控制系统 (Lab. of Networked Control Systems)

作者简介: 谢闯 (1979-), 男, 学士, 主研方向为计算机科学与技术; 杨志家 (1968-), 研究员、博士生导师, 主研方向为嵌入式系统; 王剑 (1980-), 男, 博士, 主研方向为机械电子工程

E-mail: xiechuang@sia.ac.cn

工业无线协议的实现和推广依赖于无线芯片。当前，市场上的主流芯片主要由国际知名半导体公司提供，如TI公司的CC2420[12]、CC2530[13]、CC2538[14]等，NXP公司的JN516x[15]、MKW2xD[16]等，Silicon Lab公司的EM35x系列[17]，ST公司的STM32W108[18]以及Linear Technology公司的LTC5800-WHM系列[19]等。除WirelessHART协议专用芯片LTC5800-WHM外，其他芯片普遍缺乏支持TSCH模式的MAC层硬件加速模块，只能依靠处理器加定时器中断方式来实现时隙收发状态机，增加了开发难度，限制了WirelessHART、ISA100.11a以及WIA-PA等工业无线协议的推广和使用。因此，开发支持TSCH模式的工业无线协议芯片，对于无线协议的实现与推广、工业物联网的发展都具有非常重要的意义[20][21][22]。

本文以IEEE802.15.4e协议中的TSCH模式为基础，设计了具有支持TSCH模式MAC层硬件状态机的系统级无线芯片WIASoC2400。WIASoC2400以IEEE802.15.4e协议的TSCH模式为基础，基于ARM Cortex-M3内核，并集成2.4GHz无线通信模块。此外，为了满足工业无线网络中数据传输的安全性要求，芯片内还设计了符合IEEE802.15.4-2006协议中CCM* (Extension of counter with CBC-MAC, CCM*)模式安全规范的AES-128加解密安全模块。通过对WIASoC2400各模块进行仿真实验以及TSCH模式无线网络实验，结果表明，WIASoC2400能够满足WIA-PA无线协议要求，具有实际可用性。该芯片有利于WIA-PA无线协议的实现与推广，以及工业物联网的发展与普及都具有重要的意义和推动作用。

2 IEEE802.15.4e TSCH 模式

IEEE802.15.4e协议于2012年提出，对IEEE802.15.4-2006协议的MAC层进行改进，使之更加适合工业无线网络的需要。时隙跳频(Time Slotted Channel Hopping, TSCH)是IEEE802.15.4e多种模式中的一种，通过时隙同步机制来实现低功耗，通过信道跳频机制来实现高可靠[23]。

2.1 时隙帧 (slotframe)

IEEE802.15.4e协议中的TSCH模式将时间划分成时隙，根据应用需要，一定数目的时隙构成时隙帧。每个时隙对应一个绝对时隙数(Absolute Slot Number, ASN)，表示从网络形成开始经过了多少时隙，每个时隙ASN加1。每个时隙帧又对应一个时隙周期，时隙周期随着时隙帧的重复出现而递增[24]。时隙、时隙帧和时隙周期的概念如图1所示。TSCH模式下，每个时隙的默认时间为10ms，在时隙内实现节点同步、数据包发送(接收)以

及确认帧(ACK)的接收(发送)。节点在活跃时隙内的工作流程如图2所示。

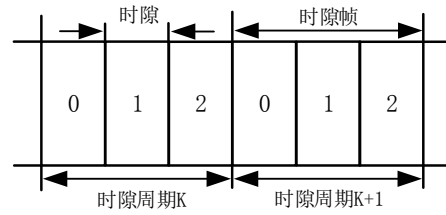


图1 含有三个时隙的时隙帧

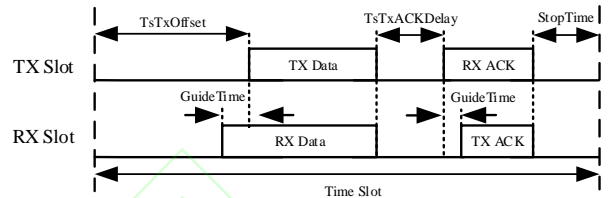


图2 发送和接收时隙

2.2 信道跳频 (channel hopping)

IEEE802.15.4e协议中的TSCH模式支持在2.4GHz频段上的16个信道(channel 11 - channel 26)进行跳频传输，可以降低信道干扰和多径效应的影响，提高数据传输的成功率和链路的稳定性。由于支持多信道，不同组节点可以在相同时隙、不同信道上进行通信，从而提高网络容量和带宽。

在时隙同步的前提下，信道是由ASN和ChannelOffset两个参数确定的。协议中规定的信道计算方法如式(1)所示。

$$channel = F[(ASN + ChannelOffset) \% N_{channels}] \quad (1)$$

其中，F表示可用信道列表，ASN为绝对时隙数，ChannelOffset代表当前时隙的信道偏移量，Nchannels则为可用信道列表F中的信道数目。信道列表F可以根据实际应用环境和信道质量来确定，信道偏移量ChannelOffset保证不同组节点在相同时隙可以在不同信道上进行通信。

3 WIASoC2400 设计

WIASoC2400是一款基于ARM Cortex-M3内核、集成2.4GHz无线通信模块的32位系统级芯片。该芯片采用QFN56封装，集成了32KB RAM和256KB Flash，系统时钟最高频率可达32MHz。具有GPIO、UART、SPI、DMA、定时器等通用模块，可以作为通用处理器使用。同时，集成了挂载在系统总线上的2.4GHz IEEE802.15.4无线通信模块，可以满足工业无线传感器网络的数据处理和通信要求。WIASoC2400的整体结构框图如图3所示。相比于其他常用的无线芯片，WIASoC2400的优势为设计了支持TSCH模式的MAC层硬件状态机和符合CCM*模式

安全规范的AES-128硬件加/解密安全模块。

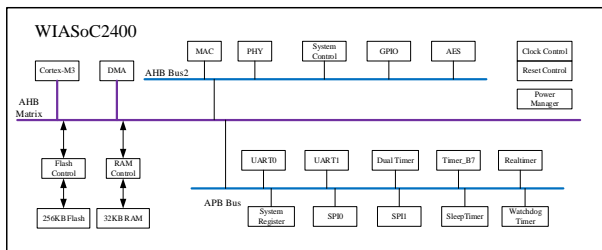


图3 WIAsoC2400 整体框图

3.1 MAC 层硬件状态机

WIAsoC2400 中设计了 WIA_MAC 模块来提供 2.4GHz 无线介质访问控制接口，接收处理器命令，向射频和基带电路传送工作配置参数，控制射频的开启与关闭，完成数据的发送与接收。WIA_MAC 模块框图如图 4 所示。WIA_MAC 模块中最为关键的部分就是通信控制器 (communication controller) 部分，而 MAC 硬件状态机则是通信控制器的一部分。通信控制器总体框图如图 5 所示。

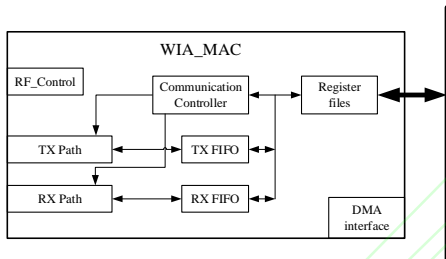


图4 WIA_MAC 模块框图

WIA_MAC 模块包含 DMA 接口、寄存器、接收/发送数据缓存、发送机、接收机、物理层控制、通信序列控制等模块。DMA 接口负责与片上存储器模块进行交互，实现协议引擎与存储器之间的数据传输。寄存器模块 (Register file) 包含寄存器列表，映射到系统总线地址空间上。CPU 可通过寄存器模块设置整个协议引擎的控制和配置信息，读取状态和中断信息。接收数据缓冲区 (RX_Buffer) 用于缓存刚刚收到的数据帧数据负载信息；发送数据缓冲区 (TX_Buffer) 用于缓存当前 slot 要

发送的数据帧数据负载。发送机模块 (TX) 控制数据帧发送，根据待发数据帧的类型、地址描述等信息构建完整数据帧，自动插入 PHY 头、MAC 头和 CRC。接收机模块 (RX) 负责数据帧接收，能够识别接收数据帧的类型和优先级等特征信息，自动删除 CRC，只将数据负载存储到接收缓冲区中。物理层控制模块 (phy_ctrl) 接收来自控制状态机物理层操作指示信号，生成物理层控制信号，给出有效信道标号，控制物理层的收发操作。通信序列控制器 (sequencer) 接收处理器的数据帧传输请求，启动数据帧传输，在传输过程中控制接收机和发送机的开启和关闭，实现不同的数据帧传输序列。

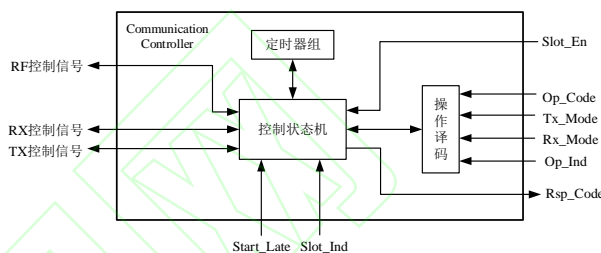


图5 通信控制器框图

通信控制器总体框图如图5所示，包括定时器组、操作译码和控制状态机等模块。MAC硬件状态机采用定时器组实现。定时器组共包括12个定时器，计时单位为1us，如图6所示。定时器组对TSMC模式时隙内各阶段定时，生成的定时溢出信号传递给控制状态机。然后控制状态机根据定时器溢出信号，来控制本定时器的停止和下一个定时器的启动，控制射频打开或关闭，直到本时隙数据发送或接收完成。由于定时器组和控制状态机的存在，所以在数据发送和接收的过程中并不需要处理器的具体参与，处理器只需要根据TSMC协议规定和实际应用来配置定时器组各定时器计数值，启动收发。减少了处理器中断次数，定时更加准确。

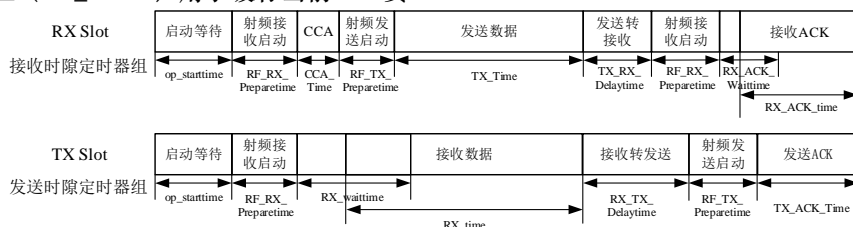


图6 MAC 硬件状态机定时器组

3.2 AES-CCM*加解密安全模块

CCM* (Extension of counter with CBC-MAC, CCM*) 模式是 IEEE802.15.4 和 IEEE802.15.4e 协议中规定的加解密算法，在无线协议中应用广泛。WIAsoC2400

中设计了基于 CCM* 模式的安全接口模块，如图 7 所示。纯硬件实现 MIC (Message Integrity Code, MIC) 认证和检查，数据加密与解密，也单纯支持 ECB、CBC、CFB、OFB 和 CTR 等分组密码模式加解密。

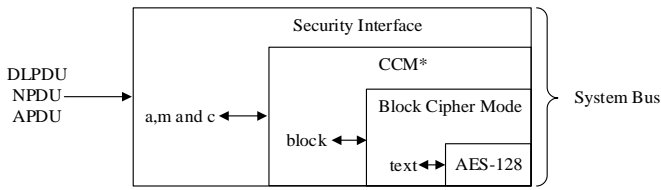


图7 WIASoC2400安全接口模块框图

安全接口层提供数据链路层、应用层数据接口和配置寄存器，CCM*层完成CCM*模式加解密和MIC计算，块密码模式层可以完成分组密码工作模式的选择，而AES-128则是128位AES加解密模块，完成加解密运算。相比于无线芯片中安全模块常见的软硬件结合或者使用专用安全指令集的方式，WIASoC2400安全模块完全由硬件方式实现。使用时，只需要在安全接口载入待处理的数据帧，寄存器配置相关参数，然后，处理器启动操作。当操作完成之后，会产生中断，通知处理器进行处理。处理速度更快、计算效率更高。

AES-CCM*加解密安全模块模块结构如图8所示。其中，状态机 fsm 是 AES 加解密的核心，与系统总线的接口电路完成明文输入和密文输出；encryption 子模块完成加密操作，并产生中断；decryption 子模块完成解密操作，并产生中断；key_expand 完成密钥编排，包括密钥的扩展和轮密钥的选取；sbox 通过查表，实现 SubBytes 操作；invsbox 是通过查表，实现 InvSubBytes 操作。

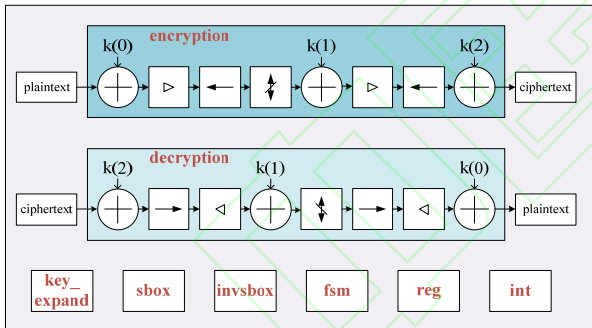


图8 AES-CCM*加解密安全模块结构框图

4 实验验证与分析

为方便芯片测试，设计了WIASoC2400评估板进行实验，测试芯片各模块性能。

4.1 无线模块指标测试

对无线模块接收灵敏度、输出功率、无线链路电流等关键技术指标进行测试，接收灵敏度测试连接如图9所示，发射功率测试连接如图10所示。

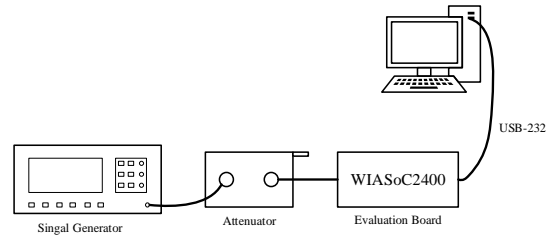


图9 接收灵敏度测试

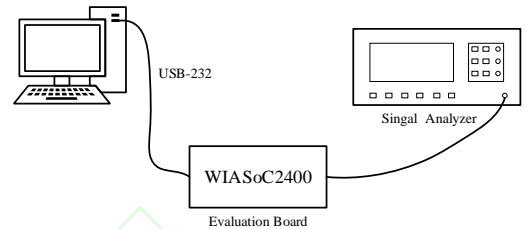


图10 发射功率测试

经过多组实验测试，WIASoC2400无线模块的接收灵敏度可达-96dBm，最大发射功率为2.87dBm，发射链路电流为22.3mA，接收链路电流为19.2mA，能够满足工业物联网应用的需求。

4.2 MAC 层硬件状态机测试

MAC硬件状态机是根据TSCH模式设计的，所以本设计以UC Berkeley大学开发的开源协议栈OpenWSN为参照进行实验。OpenWSN协议栈MAC层是基于TSCH模式实现的，调试算法支持星型拓扑调度方案、树型拓扑调度方案等[25]，能够很好地测试MAC层硬件状态机性能。实验中，分别以定时器状态机和MAC层硬件状态机两种方式实现OpenWSN协议栈，采用简单的树型拓扑结构，时隙内各阶段定时时间相同，数据帧长度为127个字节，确认帧内容和长度相同，对实验结果进行对比。实验连接如图10所示，实验中采用线性两跳的拓扑结构，节点B同节点A同步，节点C与节点B同步。在节点进行时隙通信的过程中，某些引脚发生信号跳变来指示相应状态，通过逻辑分析仪抓取信号，进行分析。

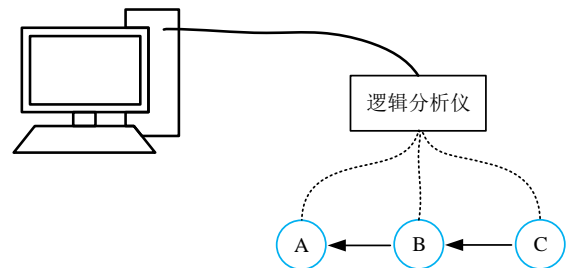


图11 MAC硬件状态机实验框图

4.2.1 时隙同步精度

TSCH模式是基于时隙来进行通信的，同步精度范围是影响数据正确收发关键[26]。时隙同步精度指的是测试节点与参考节点之间对应时隙的偏差值。分别测试了两种状态机模式下的时隙同步误差，数据处理结果如表1

所示。其中通用定时器软件状态机是指采用通用的定时器与软件状态机相配合的方式实现。

表1 同步精度实验数据

状态机模式	跳数	同步误差平均值/us	同步误差最大值/us
MAC层硬件状态机	第一跳	27.496	52.75
	第二跳	39.593	85.875
	两跳	28.478	64.125
普通定时器状态机	第一跳	38.840	63.958
	第二跳	55.605	116.125
	两跳	43.153	100.54

通过表1中的实验数据可知，MAC硬件状态机的单跳和多跳同步精度误差都要小于普通定时器状态机误差，同步精度更高。因为MAC层硬件状态机的定时完全由硬件实现，计时单位为1us，不需要处理器参与，定时更加精确。同时，WIASoC2400 SFD信号是直接通过硬件读取，放入寄存器，而不像其他无线芯片需要通过定时器捕获中断来完成，从而可以保证时间戳的读取更加准确，实现更高精度的同步。

4.2.2 时隙收发过程

实验中，用逻辑分析仪抓取MAC层硬件状态机时隙工作流程如图13所示。多组实验数据统计处理后如表2所示。

表2 时隙工作时间

状态机模式	发送时隙		接收时隙	
	发送数据接收确认帧时间/ms	时隙长度/ms	接收数据发送确认帧时间/ms	时隙长度/ms
MAC层硬件状态机	7.8356	10.063	7.7529	10.04
定时器状态机	8.1816	10.06	7.9431	10.01

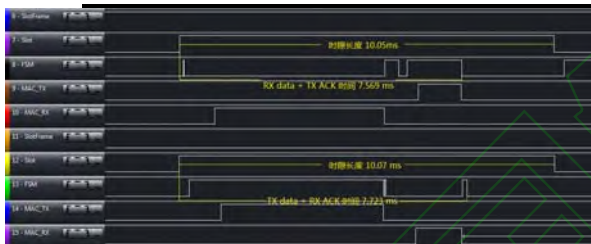


图12 MAC硬件状态机时隙工作流程图

从图12可知，MAC硬件状态机的接收、发送时隙与图2 TSCH模式发送和接收时隙一致，证明设计的TSCH模式硬件状态机是正确的，符合协议规定。从表2实验数据可知，MAC层硬件状态机的性能要稍优于普通定时器状态机。在时隙各阶段定时时间相同的条件下，使用MAC层硬件状态机要快0.2ms左右。时隙定时由纯硬件

定时器组完成，起到了一定的硬件加速作用。

4.2.3 两种状态机中断比较

表3给出了MAC层硬件状态机和普通定时器状态机实现OpenWSN协议栈时，需要的中断数目。无线传感器网络的一个重要特征就是能量受限[27]，从表中可以看出，在使用MAC硬件状态机之后，定时器中断数目减少了4个，只需要保留一个时隙中断。定时中断数目减少，降低了处理器处理中断的负担，提高了处理器效率；可有效减少中断嵌套发生的概率，降低了协议开发的难度，降低了系统整体的能耗。其他符合TSCH模式的协议也具有相似的结果。

表3 中断数目比较

状态机类型	定时器中断数目	发送中断数目	接收中断数目	中断总数目
MAC层硬件状态机	5	1	1	7
普通定时器状态机	1	1	1	3

4.3 AES-CCM*安全模块测试

对安全接口模块进行了仿真和实验，仿真测试是在Synopsys VCS环境中完成，实验连接框图如图13所示。在仿真实验中，安全接口模块运行在32MHz时钟之下，参考IEEE802.15.4-2006附录B和C中的例子进行仿真，仿真实验运行时间如表4所示；在实验中，利用逻辑分析仪对信号进行分析。实验的时钟条件和例子与仿真实验完

全相同，实验结果如表5所示。

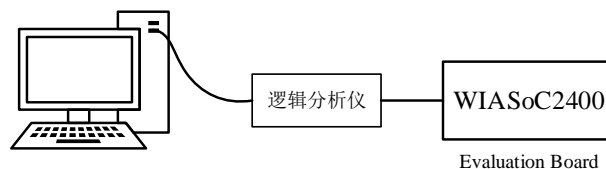


图13 安全接口模块实验连接图

表4 安全模块仿真结果

帧类型	额外认证数据 长度l(a) / bytes	明文信息长 度l(m) / bytes	认证域长 度M / bytes	密文长度 l(c) / bytes	加解密 方式	操作时间 /us
信标帧64位 认证码	26	0	8	8	加密	8.268
	26	0	8	8	解密	8.2056
数据帧4字 节数据加密	26	4	0	4	加密	4.1496
	26	4	0	4	解密	4.1496
命令帧1字 节数据加密 64位认证码	29	1	8	9	加密	13.26
	29	1	8	9	解密	13.1976

表5 安全模块硬件实验结果

帧类型	额外认证数据 长度l(a) / bytes	明文信息长 度l(m) / bytes	认证域长 度M / bytes	密文长度 l(c) / bytes	加解密 方式	操作时间 /us
信标帧64位 认证码	26	0	8	8	加密	14.97656
	26	0	8	8	解密	18.26563
数据帧4字 节数据加密	26	4	0	4	加密	10.97656
	26	4	0	4	解密	16.47656
命令帧1字 节数据加密 64位认证码	29	1	8	9	加密	20.17188
	29	1	8	9	解密	23.38867

通过表4仿真结果和表5实验结果可知,完成IEEE802.15.4-2006协议中规定例子的仿真时间不会超过14us,实验时间不会超过24us。实验时间明显要高于仿真时间,加密过程多6us左右,解密过程多10us左右。但是仿真与实验二者的整体趋势是一致的,即根据协议中的例子,数据帧加解密时间最短,信标帧次之,时间最长的是命令帧。实验时间明显高于仿真实验,这是因为仿真实验环境理想,而在具体实验中加解密过程通过调用库函数实现,代码并非最优,造成运行时间的增加;进出中断也会耗费一定时间、引脚信号跳变也需要时间。随着代码的优化,安全模块的加解密时间可以进一步降低。

4.4 通用模块测试

WIASoC2400是一款基于Cortex-M3内核的通用处理器,除MAC层硬件状态机和安全模块之外,还包括GPIO、UART、SPI、定时器等通用模块。对通用模块进行实验,实验结果表明通用模块功能正常,能够完成定

时、串口数据通信等功能。

4.5 与商业芯片的性能对比

目前商用的2.4G无线系统级芯片很少,物联网设备一般采用单片机与2.4G射频芯片共同实现。还有一些厂商将单片机与2.4G射频模块联合封装成为一颗系统级芯片。WIASoC2400较以上两种方案具有以下优势。

表6 WIASoC2400与其它方案对比

	WIASoC2400	其它方案
无线模块数据交换带宽	采用AHB总线与处理器连接,理论带宽可以达到256Mbit/s	采用SPI总线与处理器连接,理论带宽最大8Mbit/s
加解密性能	具有高速的加解密性能,128字节加/解密运算最快可达到37.2us@32MHz	加解密性能较弱,普遍需要200us或更长时间
工作/休眠模	按IEEE802.15.4工	按通用处理器的

式	作模式设计工作、休眠模式,达到最大能耗优化	工作方式设计工作、休眠模式,无法保证能耗优化
无线协议加速	可针对时隙和非时隙两类无线协议进行硬件加速,最大限度降低处理器运算量	无协议加速模块,协议实现依靠处理器软件实现

5 结论

本文设计并实现了具有支持 TSCH 模式 MAC 层硬件状态机的系统级工业无线芯片 WIASoC2400。除通用模块外,芯片内设计了支持 TSCH 模式的 MAC 层硬件状态机和符合 CCM*模式的硬件加解密安全模块。弥补了商业物联网无线芯片无法通过硬件来实现时隙调度和同步的不足。对样片进行大量的实验测试,结果表明,设计的 MAC 层硬件状态机符合协议规范,可实现高可靠、高实时的通信,协议开发难度降低。同时,硬件加解密安全模块计算速度更快、性能提升明显。然而,本文进行的实验都是在实验室干扰较弱的条件下完成的,具有一定的局限性。下一步将推广该芯片的示范应用,测试复杂工业环境下芯片的性能。另外,该芯片中缺少模数转换(Analog-to-digital Conversion, ADC)模块,限制了在某些工业场景的应用。对模数转换模块的集成也将是下一步工作的重点。

参考文献

- [1]于海斌,梁炜,曾鹏.智能无线传感器网络系统[M].2版.北京:北京科学出版社,2013.
- [2]Borges L M, Velez F J, Lebres A S. Survey on the Characterization and Classification of Wireless Sensor Network Applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4), 1860-1890.
- [3]Gungor V C, Hancke G P. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (10), 4258-4265.
- [4]Zhao G. Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey. Network Protocols & Algorithms, 2011, 3(3): 46-63.
- [5]WirelessHART Specification 75: TDMA Data-Link Layer[S]. HART Communication Foundation Std.2008.
- [6]ISA-100.11a-2011: Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications[S]. International Society of Automation (ISA) Std. 2011.
- [7]工业无线网络 WIA 规范,第 1 部分:用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范[S].中华人民共和国国家标准,2010.
- [8]Industrial wireless networks WIA specification. Part 1: WIA System architecture and communication specification for process automation (WIA-PA), China: CN-GB, 2010.
- [9]802.15.4e-2012: IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC Sublayer[S]. IEEE Std. 2012.
- [10]Wang Q, Jiang J. Comparative Examination on Architecture and Protocol of Industrial Wireless Sensor Network Standards[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 2197-2219.
- [11]Guglielmo D D, Anastasi G, Seghetti A. Chapter: From IEEE 802.15.4 to IEEE802.15.4e: A Step Towards the Internet of Things[M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [12]Domenico D G, Beshr A N, Simon D, et al. Analysis and Experimental Evaluation of IEEE802.15.4e TSCH CSMA-CA Algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2):1573-1588.
- [13]Texas Instrument. CC2420 Datasheet[OL]. 2005. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>.
- [14]Texas Instrument. CC2530 Datasheet[OL]. 2011. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/cc2530.pdf>.
- [15]Texas Instrument. CC2538 Datasheet[OL]. 2013. <http://www.ti.com/lit/ds/swrs096d/swrs096d.pdf>.
- [16]NXP Semiconductors. JN516x Datasheet[OL]. 2013. http://cache.nxp.com/documents/data_sheet/JN516X.pdf.
- [17]NXP Semiconductors. MKW2xD Reference Manual[OL]. 2016. <http://cache.nxp.com/assets/documents/data/en/reference-manuals/MKW2xDxxxRM.pdf>.
- [18]Silicon Lab. EM351/EM357 Datasheet[OL]. 2009. <http://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/EM35x.pdf>.
- [19]STMicroelectronics. STM32W108 Datasheet[OL]. 2009.

- <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/0d/ba/87/2b/76/71/41/26/CD00248316.pdf>.
- [19] Linear Technology. LTC5800-WHM Datasheet[OL]. 2013. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/5800whmfa.pdf>.
- [20] 王剑, 谢闯, 段茂强, 等. 第四十三讲符合 WIA-PA 标准的工业无线芯片关键技术研究[J]. 仪器仪表标准化与计量. 2014, (01): 18-23.
Wang J, Xie Ch, Duan M Q, et al. Chapter 43: Research on the Key Technologies of Industrial Wireless Chip Complied With WIA-PA[J]. Instrument Standardization and Metrology. 2014, (01): 18-23.
- [21] 杨志家, 王宏, 周侗. 第二十五章 面向工业测控应用的无线网络协议 SoC 解决方案[J]. 仪器仪表标准化与计量. 2011, (01): 28-30.
Yang Zh J, Wang H, Zhou T. Chapter 25: Industrial Wireless Network Protocol SoC Solution for the Industry Measurement and Control Applications[J]. Instrument Standardization and Metrology, 2011, (1): 28-30.
- [22] 谢书珊, 吴宁, 陈鑫. 无线传感网节点 SoC 芯片设计研究[J]. 现代雷达. 2014, (10): 74-78+82.
Xie Sh Sh, Wu N, Chen X. A Study on Wireless Sensor Network Node SoC Chip Design[J]. Modern Radar. 2014, (10): 74-78+82.
- [23] Watteyne T, Vilajosana X, Kerkez B, et al. OpenWSN: a standards-based low-power wireless development environment[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2012, 23(5): 480-493.
- [24] 孙婷婷. 基于 IEEE 802.15.4e 及节点空间分布的无线传感器网络研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
Wu T T. Research on Wireless Sensor Networks Based on IEEE802.15.4e and Nodes' Spatial Distribution[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [25] 闵明慧, 杨志家, 李中胜等. 工业物联网应用中多时隙帧调度算法研究[J]. 计算机工程. 2016, 42(11): 15-21+26.
Min M H, Yang Zh J, L Zh Sh, et al. Research on Multi-slot Frame Scheduling algorithm in Industrial IoT Applications[J]. Computer Engineering. 2016, 42(11): 15-21+26.
- [26] Chang T F, Watteyne T, Pister K, et al. Adaptive synchronization in multi-hop TSCH networks[J]. Computer Networks. 2015, 76(2): 165-176.
- [27] 梁英, 于海斌, 曾鹏. 无线传感器路由协议[J]. 信息与控制. 2005, 34(06): 325-330.
LIANG Ying, YU Hai-bin, ZENG Peng, Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J]. Information and Control. 2005, 34(06): 325-330.