

DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2013.03.009

# IEEE 802.11p 物理层 OFDM 调制器的设计

张家波,刘兴迪,杨 庆

(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

**摘 要:** IEEE 802.11p 是关于车载自组织网络的协议,其物理层是 IEEE 802.11a 标准的扩展。整个 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)发送端的设计是基于 FPGA 技术,使用 Verilog HDL 硬件描述语言来编写底层代码。给出了基于 IEEE 802.11p 标准的 OFDM 调制系统的设计与仿真验证。仿真结果证明,该设计在精度和资源方面都能达到期望的结果,并且设计简单、高效,完全能够达到 802.11p 的 OFDM 系统设计要求。

**关键词:** IEEE 802.11p; OFDM; 调制器; FPGA

**中图分类号:** TN911

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-825X(2013)03-0329-05

## Design of OFDM modulator for the physical layer of IEEE 802.11p standard

ZHANG Jiabo, LIU Xingdi, YANG Qing

(Key Lab of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China)

**Abstract:** This paper presents design and simulation verification of an orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system customized for vehicular ad-hoc networks, based on the IEEE 802.11p standard specifications. This standard uses a physical layer (PHY) that is based on the widely spread IEEE 802.11a standard. The OFDM transceiver design presented in this paper is based on field programmable gate array (FPGA) technology and the Verilog HDL hardware description language that is used to write the underlying code. Simulation results show that this design has achieved the expected purpose both in precision and resource, with simplicity and high efficiency and can meet the design demand of 802.11p-OFDM systems.

**Key words:** IEEE 802.11p; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); modulator; field programmable gate array (FPGA)

## 0 引 言

近年来,汽车产业得到了快速发展,在它给人们的交通带来方便的同时也显现出了一些问题,例如交通安全和交通堵塞等。基于无线通信技术的车联网技术为解决这些问题提供了有效途径。车联网系统主要是指车与车(vehicle-to-vehicle, V2V)以及车与路面基础设施(vehicle-to-infrastructure, V2I)之间的无线通信,它可以大大提高交通的安全性。以后车联网会有更多的应用,例如,对实时数据的交通管

理以及使车辆对交通拥塞快速地做出反应等。

车联网是基于 IEEE 802.11p 无线局域网标准的。802.11p 标准是由 802.11a 扩充而来<sup>[1-2]</sup>,针对其高速移动的使用环境对 802.11a 的物理层和 MAC(media access control)层做了很多修改。802.11p 物理层的核心技术仍然是使用 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)调制技术。

本文在研究 802.11p 的物理层参数的基础上,提出了其 OFDM 发送端基带设计的总体框架和详细流程。使用 Verilog HDL 硬件描述语言,在 Quar-

收稿日期:2012-12-20 修订日期:2013-05-02 通讯作者:刘兴迪 lxd6221@163.com

基金项目:国家自然科学基金(61171111);国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ20022404);国家重大科技专项(2013ZX03001004-003)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(61171111); The National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (2012YQ20022404); The National Key Scientific and Technological Project of China (2013ZX03001004-003)

tus II 开发环境中设计综合和验证,结果证明该设计符合 802.11p 的要求。

## 1 802.11p 物理层参数

802.11p 在物理层上对 802.11a 上的修改主要是将工作频带变为 5.850 ~ 5.925 GHz, 75 MHz 被划分为 7 个 10 MHz 的信道, 频率最低的 5 MHz 作安全空白。其中, 一个信道作为控制信道, 而其他 6 个作为服务信道。这样, 信号的带宽由 802.11a 的 20 MHz 变为 10 MHz, 物理层的参数在时域上变为 802.11a 的 2 倍<sup>[3]</sup>。信号带宽的减小可以降低多普勒扩展的影响, 保护间隔的增大可以减小多径效应引起的码间干扰。802.11p 物理层的主要参数如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 802.11p 物理层的主要参数  
Tab. 1 Main characteristic values of IEEE 802.11P

| 参数                      | 取值                                    |
|-------------------------|---------------------------------------|
| $N_{SD}$ : 数据子载波数       | 48                                    |
| $N_{SP}$ : 导频子载波数       | 4                                     |
| $N_{SP}$ : 子载波总数        | $52(N_{SD} + N_{SP})$                 |
| IFFT/FFT 点数             | 64                                    |
| $T_{FFT}$ : IFFT/FFT 周期 | $6.4 \mu s$                           |
| $T_{GI}$ : 保护间隔长度       | $1.6 \mu s$                           |
| $T_{SYM}$ : OFDM 符号长度   | $8.0 \mu s(T_{GI} + T_{FFT})$         |
| $T_{G2}$ : 长训练序列保护间隔    | $3.2 \mu s(T_{FFT}/2)$                |
| $T_{SHORT}$ : 短训练序列长度   | $16 \mu s(10 \times T_{FFT}/4)$       |
| $T_{LONG}$ : 长训练序列长度    | $16 \mu s(T_{G2} + 2 \times T_{FFT})$ |
| $T_{PREAMBLE}$ : 训练序列长度 | $32 \mu s(T_{SHORT} + T_{LONG})$      |
| 数据速率 (Mbit/s)           | 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27          |
| 调制方式                    | BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM              |
| 卷积编码                    | 约束长度为 7                               |
| 编码效率                    | $1/2, 2/3, 1/4$                       |
| 信道带宽                    | 10 MHz                                |

从表 1 可以看出, 802.11p 的调制方式、编码方式以及帧的结构与 802.11a 都非常相似, 只是与时间有关的参数变为 802.11a 的 2 倍, 相应数据速率变为 802.11a 的一半。数据速率由调制方式和编码效率决定, 三者对应关系可以参考文献 [3]。

## 2 802.11p 基带调制器设计

### 2.1 系统总体设计

802.11p 的物理层协议数据单元 (physical protocol data unit, PPDU) 帧结构主要包括 3 部分, 即训练序列; SIGNAL 域和 DATA 域。其中, 训练序列包括 10 个重复的短训练序列和 2 个重复的长训练序列; SIGNAL 域主要包含数据长度和数据速率的信息; 而 DATA 域中的 PSDU 是 MAC 层所要传输的数据, 这部分数据才是有效载荷数据<sup>[3]</sup>。

根据 802.11p 的物理层参数和帧结构, 我们设计 802.11p 的发送端基带设计如图 1 所示。

基带数据处理流程可以分成 3 个部分并行处理, 即训练符号生成模块; SIGNAL 域符号和 DATA 域符号的形成过程。其中, 训练符号是确定的数据, 将其存储在 ROM 中, 当 SIGNAL 域和 DATA 域符号形成后将其按照帧格式进行读出, 与 SIGNAL 域和 DATA 域符号合并成完整的发送端数据帧。

### 2.2 关键模块设计

#### 2.2.1 时钟生成模块

由于 802.11p 的信号带宽为 10 MHz, 因此, 使用 10 MHz 时钟作为整个基带处理器的系统时钟 (SYS\_CLK)。对于 DATA 域而言, 由于该设计采用的是 16QAM 调制, 因此, 星座映射模块输入端的时钟为 40 MHz (CB\_CLK); 编码效率为  $3/4$ , 因此, 在编码前数据输入时钟为 30 MHz (DIN\_CLK); MAC 层

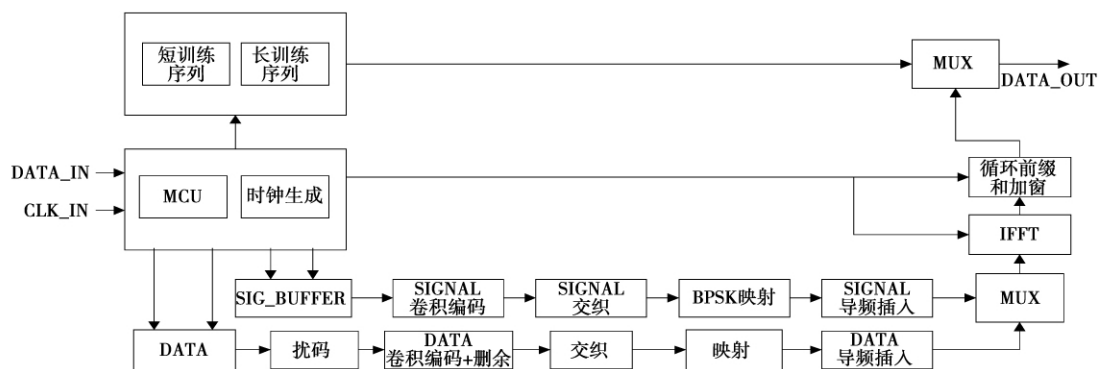


图 1 802.11p 发送端 OFDM 基带设计框图

Fig. 1 802.11p transmitter block diagram for the OFDM baseband

送往物理层的数据为字节格式,因此,MAC 层时钟大小为  $30 \text{ MHz}/8 = 3.75 \text{ MHz}$  (MAC\_CLK)。对于 SIGNAL 域而言:由于调制使用的是 BPSK 调制,因此,映射模块输入时钟为系统时钟,编码效率为  $1/2$ ,因此,编码输入时钟为  $5 \text{ MHz}$  (SIG\_CLK) [5]。

### 2.2.2 主控模块

主控模块 MCU 用来控制与协调子模块的工作,以保证整个处理器时序的精确同步,另外,还承担着与 MAC 层的握手 [6]。

MCU 的工作过程可以用状态机来描述,如图 2 所示。

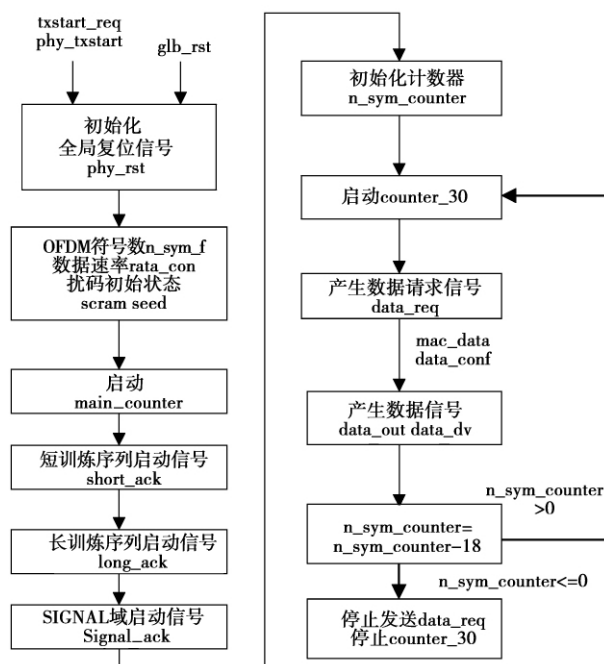


图 2 主控模块 MCU 状态机

Fig. 2 State machine of MCU block

系统启动时 glb\_rst 为低电平,完成系统时钟模块和 MCU 中控制信号的复位。当 MCU 收到请求信号 txstart\_req 后,发送复位信号 phy\_rst 进行各个模块(除系统工作时钟和 MCU 模块外)的初始化。同时输入 21 bits 的 phy\_txstart 信号,包含 PSDU 帧长,用 length(12 bits)表示;数据速率 rate\_con(6 bits)和发射功率(3 bits)。当 MCU 接收完 phy\_txstart 信号后,将 length、rate\_con 及加扰模块初始化信号 scram\_seed 送入相应模块输入端口。接下来启动主计数器 main\_counter,按照要求的时序依次输出短训练序列启动信号 short\_ack,长训练序列启动信号 long\_ack 和 SIGNAL 域启动信号 signal\_ack。

接下来 MCU 用一个模 30 的计数器来产生 data\_req 信号,请求 MAC 层返回一个 OFDM 符号所需

的 18 Bytes 数据,同时用计数器 n\_sym\_counter(PSDU 包含的字节数 length)减去 18。由于 MAC 层时钟为  $3.75 \text{ MHz}$ ,因此,OFDM 符号间隔正好为  $8 \mu\text{s}$ 。当计数器小于或等于 0 时,发送结束,请求信号 data\_req 复位。

### 2.2.3 SIGNAL 信号生成模块

当主控模块发出 SIGNAL 域启动信号 signal\_ack 时,SIGNAL 域首先经过 SIG\_BUFFER 模块,生成 24 bits 的 SIGNAL 域信号,包括 rate(4 bits)、length(12 bits)、保留位(1 bit)、奇偶校验位(1 bit)和尾比特(6 bits)。其中,rate 和 length 分别表示主控模块发出的数据速率和数据长度。另外,此模块还实现了并串变换,形成 24 bits 数据以  $5 \text{ MHz}$  时钟进行串行输出。

### 2.2.4 DATA 域信号生成模块

本设计采用的是 16QAM 调制,编码效率为  $3/4$  [7],得到数据速率为  $18 \text{ Mbit/s}$ ,每个 OFDM 符号的数据为 144 bits,即 18 Bytes。在设计中,假设从 MAC 层传来 100 Bytes 的数据,这些数据存放在 ROM 里,在收到主控模块 MCU 发出的数据请求信号 data\_req 之后,将数据输入确认信号(DATA\_CONF)拉高 18 时钟,读取一个 OFDM 符号数据。

从 ROM 里读出的数据要按照帧结构,添加 service 字段、尾比特和填充比特以形成完整的 DATA 域数据。这一过程利用一个 8 位宽的双口 RAM 配合计数器来完成,将地址 0 和 1 里的 8 位数据填充 0,作为 16 bits 的 service 字段 [8]。然后,从地址 2 开始写入从 ROM 里读出的数据,一直到地址 length + 1 (这里 length 为 100),尾部填上 6 bits 的“0”当作尾比特位,后面添加 42 bits 的填充比特(PAD)位(全部为“0”) [9]。填充比特的计算公式为

$$N_{\text{PAD}} = N_{\text{DPS}} \times (\text{ceil}(16 + 8 \times \text{length} + 6) / N_{\text{DPS}}) - (16 + 8 \times \text{length} + 6)$$

上式中 ceil 为取不小于该值的最小整数;  $N_{\text{DPS}}$  为一个 OFDM 符号的数据比特数目,本设计为 144。因此,经过组装后的 DATA 域数据为 864 bits 数据,共 6 个 OFDM 符号。

### 2.2.5 IFFT 模块

在该设计中,IFFT 是通过 Altera 公司的 FFT V11.0 IP 核来实现的,它与个人编写的 IFFT 模块相比,占用的资源更少,还可根据需求配置参数,提高了系统开发的灵活性。

在用 IFFT 核实现时,为了减小变换后的数据误

差,要对 IFFT 输入数据进行适当放大。通过多次对 IFFT IP 核计算结果和 MATLAB 计算结果进行比较,最后,确定将 IFFT 模块输入数据放大比例确定为 64 倍。这可以在 IFFT 模块前通过乘法器左移 6 位实现。由于 16QAM 变换后的复数数据是 8 位,我们将 IFFT 核的输入和输出位数设为 16 位。

#### 2.2.6 添加循环前缀模块

为了最大程度的消除符号干扰(inter symbol interference, ISI)和信道间干扰(inter channel interference, ICI), 802.11p 规定符号间间隔为  $1.6 \mu\text{s}$ ,并在保护间隔内添加循环前缀。硬件实现时,将一个 OFDM 符号的前 48 个数据被存入 RAM 中,后 16 个数据一边存入 RAM 中,一边直接输出,然后,再将 RAM 中的 64 个数据依次读出<sup>[10-12]</sup>。在实际实现时,使用 2 块宽度为 16 bits,深度为 64 的 RAM 进行乒乓帧操作,当前一帧数据从第 1 个 RAM 输出时,后一帧数据存入第 2 个 RAM,两者轮流进行读写操作,使数据实时连续处理,大大减少延时。

### 3 系统仿真与验证

在验证了设计中要用到的各个模块功能正确

后,在 Quartus II 11.0sp1 软件开发环境中采用自顶向下的设计思想,依据图 1 来完成整个基于 802.11p 的 OFDM 基带系统设计。在设计中使用 Verilog HDL 硬件描述语言来完成各个模块的设计输入。硬件开发环境是 DE2-115 开发板, FPGA 芯片为 ALTERA 公司的 Cyclone IV EP4CE115F29C7。

在设计时采用系统内部时钟 50 MHz 作为输入时钟,利用锁相环产生设计中所需要的各个时钟。并充分利用 IP 核里的现有模块,例如 PLL, RAM, FIFO、计数器和 IFFT 等,以提高系统设计的简便可靠性,并缩短开发时间,节省硬件资源。

在对整个系统编译无误后,调用 Mentor 公司的 Modelsim 仿真软件进行功能仿真,仿真结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,帧的形成过程与我们设计的完全相符, SIGNAL 域符号在插入导频后与 DATA 域的 6 个符号组装在一起,然后,进行 IFFT 变换及添加循环前缀操作。然后与延迟后的长短训练序列组装成帧。其中, ofdm\_re 为输出的 OFDM 符号的实部; ofdm\_im 为输出的 OFDM 符号的虚部; ofdm\_dv 为输出有效信号。

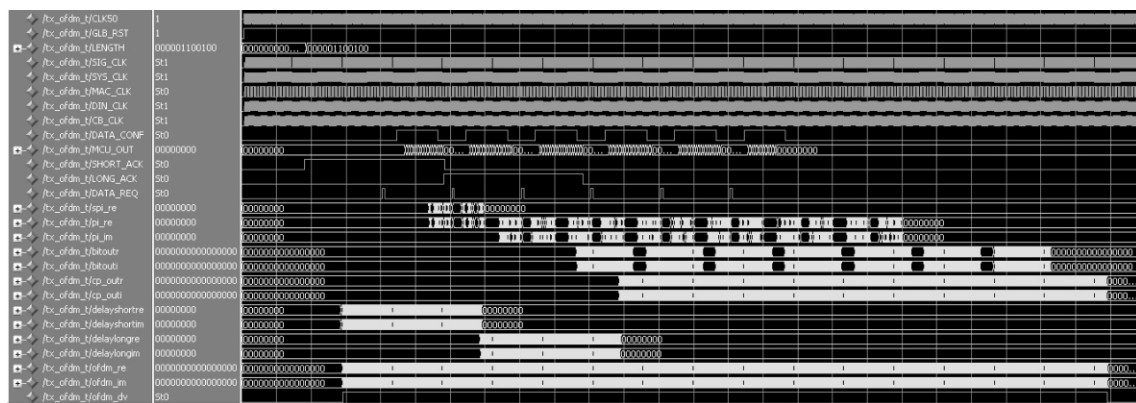


图 3 基于 802.11p 的 OFDM 基带调制仿真图

Fig. 3 Simulation of IEEE 802.11p OFDM baseband

### 4 结束语

本文在研究 802.11p 标准的物理层参数以及帧结构的基础上,利用 FPGA 来设计整个 OFDM 基带调制系统。在设计中采用了自顶向下设计思想,并把系统划分为很多子模块,以提高系统的可靠性和可维护性。在设计中尽量使用现有的 IP 核来简化设计,提高设计进度,减少资源开销。通过仿真验证,该设计完全达到了 802.11p 标准所要求的功能。

#### 参考文献:

- [1] IEEE Computer Society. IEEE Std 802.11p™-2010. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications—Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments [S]. New York, USA: IEEE, 2010.
- [2] IEEE Computer Society. IEEE Std 802.11a-1999. Sup-

- plement to IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band [S]. New York, USA: IEEE, 1999.
- [3] 罗志锋,徐洪刚,何山. 车路互联网的底层协议-802.11p 标准[J]. 电子质量, 2011(11): 45-50.  
LUO Zhifeng, XU Honggang, HE Shan. 802.11p Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems [J]. Electronics Quality, 2011(11): 45-50.
- [4] KIOKES G, ECONOMAKOS G, AMDITIS A, et al. Design and Implementation of an OFDM System for Vehicular Communications with FPGA Technologies [C] // 2011 6th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS). Athens: DTIS, 2011: 1-6.
- [5] MIZANI M, RAKHMATOV D. Multi-Clock Pipeline Structure for 802.11a WLAN Transceiver [C] // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seattle WA: IEEE Press, 2008: 1580-1583.
- [6] 史治国,洪少华,陈抗生. 基于 XILINX FPGA 的 OFDM 通信系统基带设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009: 1-99.  
SHI Zhiguo, HONG Shaohua, CHEN Kangsheng. Design of OFDM communication system Baseband Based on XILINX FPGA [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009: 1-99.
- [7] 唐建明,孙小霞,徐位凯. 基于编码的 OFDM 系统性能仿真 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2009, 21(3): 348-352.  
TANG Jianming, SUN Xiaoxia, XU Weikai. Performances simulation of coded OFDM systems [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2009, 21(3): 348-352.
- [8] 高仁璟,谭显松,王兢,等. 高速 802.16d OFDM 基带系统研究与 FPGA 设计 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2010, 22(4): 411-415.  
GAO Renjing, TAN Xiansong, WANG Jing, et al. High speed OFDM baseband systems in 802.16d and its FPGA design [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2010, 22(4): 411-415.
- [9] 郭继经,李晓飞,张国栋. IEEE802.11a 的 OFDM 基带调制的 FPGA 实现 [J]. 电视技术, 2010, 34(S1): 90-93.  
GUO Jijing, LI Xiaofei, ZHANG Guodong. Implementation of OFDM Baseband of IEEE802.11a Based on FPGA [J]. Video Engineering, 2010, 34(S1): 90-93.
- [10] 崔丽珍,樊晓冬,刘乃君,等. 基于 FPGA 的 OFDM 基带发送系统设计与实现 [J]. 电视技术, 2012, 36(21): 120-123.  
CUI Lizhen, FAN Xiaodong, LIU Naijun, et al. Design and Implementation of OFDM Baseband Sending System Based on FPGA [J]. Video Engineering, 2012, 36(21): 120-123.
- [11] HECHRI A, ABDELLATIF M. FPGA Implementation of an OFDM Baseband Transmitter [C] // 2011 International Conference on Communications, Computing and Control Applications (CCCA). Hammamet: CCCA, 2011: 1-4.
- [12] 刘松林,严家明,李超. 基于 FPGA 的 MIMO-OFDM 基带系统发射机的设计 [J]. 电子设计工程, 2012, 20(15): 110-112.  
LIU Songlin, YAN Jiaming, LI Chao. Design of MIMO-OFDM baseband system transmitter based on FPGA [J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(15): 110-112.

## 作者简介:



张家波 (1974-), 男, 湖北麻城人, 硕士, 重庆邮电大学移动通信技术重点实验室研究成员。主要研究方向为移动通信, 通信网及信令技术。E-mail: zhangjb@cqupt.edu.cn。



刘兴迪 (1988-), 男, 山东东明人, 硕士研究生。主要从事车联网物理层相关技术的研究。E-mail: lxd6221@163.com。

杨庆 (1988-), 男, 江苏人, 硕士研究生。主要研究方向为车载自组织网络物理层协议。E-mail: NEOYOUNG1988@gmail.com。

(编辑: 刘勇)