

基于 OFDM 的电力线通信信道的研究与实现

秦天凯^{1,2}, 宋强国², 乔树山², 王之光¹, 杨 芳¹, 高清运¹

(1 南开大学 电子信息与光学工程学院, 天津 300350; 2 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 作为一种新兴的通信方式, 电力线通信已经逐渐进入人们的生活. 为了实现更强的可靠性和更高的数据速率, 分析电力线的信道特性已成为电力线通信芯片设计中不可忽略的一环. 在分析噪声与衰减等传统信道特性的基础上增加了载波频偏这一新的特性, 完成了整个信道的 RTL 级仿真和 FPGA 验证, 并给出了 DC 综合结果.

关键词: 电力线通信; 信道特性; 载波频偏; 仿真结果

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)03-0001-04

Research and Implementation of Powerline Communication Channel Based on OFDM

QIN Tian-kai^{1,2}, SONG Qiang-guo², QIAO Shu-shan², WANG Zhi-guang¹,
YANG Fang¹, GAO Qing-yun¹

(1 College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2 Institute of Microelectronics of Chinese Academy Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: As an emerging way of communication, in recent years, power line communication has gradually entered people's life. In order to implement better reliability and higher data rate, analyzing the features of power line channel has already played an important role in the design of power line communication chip. Based on the analysis of traditional channel characteristics such as noise and attenuation, carrier frequency offset as a new feature is appended in this paper. The RTL simulation of the whole channel is completed, and the results of DC synthesis are finally gotten.

Key words: power line communication; channel characteristics; carrier frequency offset; results of simulation

1 引言

随着电力线通信技术的发展, 其行业前景已被业界所认可, 随之而来, 越来越多的研究单位开始致力于电力线通信芯片的设计与研究. 作为一种通信芯片, 可靠性和数据传输速率是人们关注的重点, 所以, 不可避免的, 对电力线信道特性的研究就成了电力线通信芯片设计中十分重要的一步. 在传统的 OFDM 电力线信道研究中^[1-4], 人们关注更多的是信道中常见的噪声和衰减特性, 而忽略了对载波信号产生影响的载波频偏特性. 本文在分析传统的噪声与衰减特性的基础上, 着重分析了载波频偏对 OFDM 系统性能的影响, 介绍了信道特性的 Matlab

算法模型, 模拟实现了 OFDM 电力线通信信道的信道特性, 在 FPGA 上进行了功能验证, 并最终得出了 DC 综合结果.

2 信道的特性分析与实现

本文将 OFDM 电力线的信道模型划分为六个小的模块来进行分析与设计, 其中, 背景噪声模块、频域单音模块、时域脉冲模块属于信道的噪声特性; 衰减模块、多径效应模块属于信道的衰减特性; 载波频偏模块同时具有噪声特性和衰减特性.

在对这六个小模块进行分析实现时, 具体操作步骤如下: (1) 写出模块的算法模型进行算法级验证; (2) 根据算法模型写出与之对应的可综合的

Verilog 代码;(3)运用 XILINX 公司的 ISE Design Suite 软件将此 Verilog 代码转换成可被 FPGA 接受的 bit 流文件;(4)将得到的 bit 流文件下载到 XILINX 公司的 FPGA 板 Spartan6 上进行 FPGA 级的功能验证;(5)运用逻辑分析仪将 FPGA 板上输出的 1 001 点 32 bit 位宽的数据采集出来导入 Matlab 中观察 FPGA 验证结果。

2.1 背景噪声模块

背景噪声在信道环境中是一直存在的,相比其它的噪声而言,其值相对比较稳定,只在一个很小的范围内随机变化^[5],所以在 Matlab 算法模型及 FPGA 实现时只需给其一个特定的信噪比 SNR,根据信号能量求出在该信噪比下的噪声系数,然后再将此噪声系数乘以一个 $(-2:2)$ 范围内的随机值后加载到 OFDM 信号上即可.验证此模块时使用的输入信号恒为 73,信噪比 SNR 为 30 db,计算出与之对应的噪声系数为 2.3,通过逻辑分析仪将 FPGA 中的数据采集出来后导入 Matlab 中观察得到的背景噪声数据的时域图形,结果如图 1 所示。

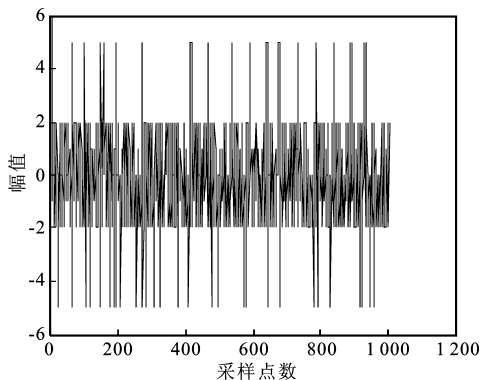


图 1 背景噪声数据图形

由图 1 可以看出,所加噪声在 $(-5:5)$ 之间随机变化,符合设计要求。

2.2 频域单音模块

频域单音,即在频域产生一些脉冲信号叠加到原始信号的频谱上.由于在电力线通信信道中传播的是 OFDM 符号的时域信号,所以此特性的算法模型及 FPGA 实现是在原始信号的基础上叠加某些特定频率的正弦或者是余弦信号,之后便可在频域得到这些特定频率信号的脉冲.图 2 为在配置输入信号恒为 73,单音脉冲个数为 2,单音脉冲幅度为 6,单音脉冲点分别为 100 kHz,300 kHz,采样频率为 1 200 kHz 时,由逻辑分析仪采集 FPGA 的输出得到的单音数据的频谱图形。

由图 2 可知,此模块的输出数据分别在频域

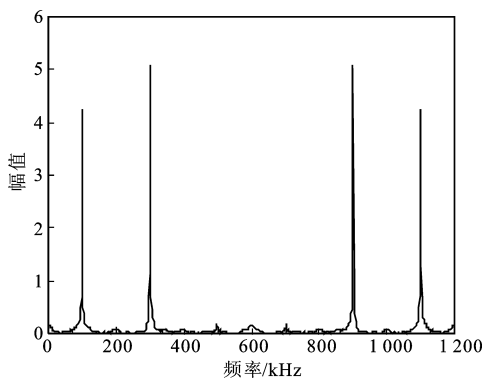


图 2 频域单音仿真图形

100 kHz 和 300 kHz 处产生了尖峰脉冲,但脉冲幅度为小于 6 的某一个值,这是因为原始数据在 Matlab 中经 FFT 处理时产生了不同程度的频谱泄露.这种频谱泄露是在 Matlab 处理数据时引起的,所以其并不影响此模块的功能,即此模块设计符合功能要求。

2.3 时域脉冲模块

时域脉冲,即随机的在原始时域信号上叠加一些脉冲信号,在算法模型及 FPGA 实现时只需在原始信号上叠加一些特定幅度,特定宽度和特定时间间隔的脉冲信号即可.图 3 为在配置输入信号恒为 1,脉冲幅度为 10,宽度为 168 ns,脉冲间隔为 1 680 ns 时由逻辑分析仪采集 FPGA 输出得到的时域脉冲的时域数据图形。

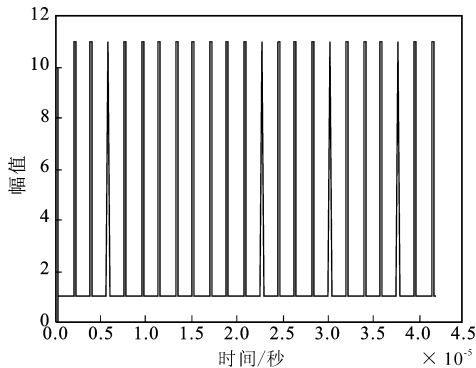


图 3 时域脉冲仿真图形

2.4 衰减模块

信号经过信道时会存在一定的能量衰减,在 Matlab 算法模型及 FPGA 实现时就是将 OFDM 信号乘以一个衰减倍数即可.由于电力线环境的复杂性,所以其衰减倍数在硬件上必须要随时可配置.图 4 为输入信号为 100,衰减为 20 db 时由逻辑分析仪采集 FPGA 的输出得到的衰减后的数据图形。

由图可见,输入幅度为 100 的信号经过 20 db

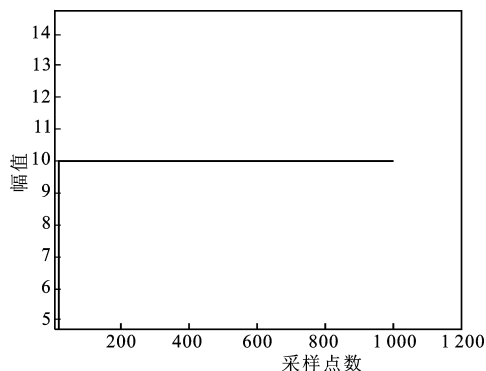


图4 衰减模块仿真图形

的衰减后其幅度缩小了 10 倍,满足设计要求。

2.5 多径效应模块

在电力线信道模块中,由于多径效应的存在,信号经不同的路径传播后各分量到达接收端的时间不同,信号能量大小不同,之后再按各自相位相互叠加而造成干扰,会使原来的信号失真或产生错误。在 Matlab 算法模型及 FPGA 实现时,假设有 N 条路径存在,那么只需将原输入信号分别延迟 $1:N$ 拍,根据不同路径的延迟选择不同的延迟信号后乘以不同的衰减倍数再相互叠加即可。图 5 为配置路径个数为 4,衰减分别为 10 db,5 db,2 db,1 db,延迟分别为 0 ns(主径),42 ns,84 ns,168 ns 时多径模块的 Modelsim 仿真图形。其中模块的时钟为 24 MHz。

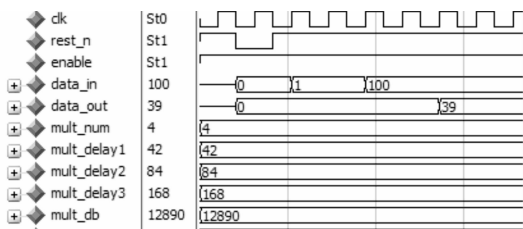


图5 多径模块仿真图形

由图可知,经过 189 ns 后输出数据 data_out 为四条路径的叠加,满足设计要求。

2.6 载波频偏模块

载波频偏,即 OFDM 信号在信道中传输时由于多普勒效应等原因而引起的子载波频率发生偏移的现象^[6]。载波频偏会破坏各子载波之间的正交性从而使通信发生错误。为了更好地分析载波频偏对 OFDM 系统的影响,现做出 OFDM 系统框图如图 6 所示。

根据图 6 所示的原理,假设原始输入序列为 $\{a_0, \dots, a_{N-1}\}$,此序列信号经过 N 点 IFFT 变换得到,

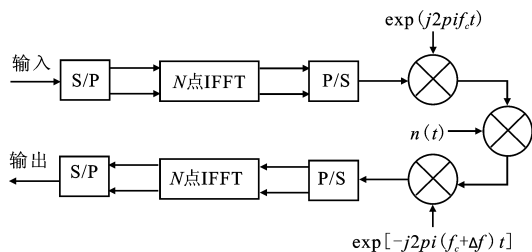


图6 OFDM 系统框图

$$X_K = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_i \exp\left(\frac{j2\pi i k}{N}\right) \quad (1)$$

序列 $\{X_0, \dots, X_{N-1}\}$ 为时域信号序列。将此时域信号经过如图 6 所示的上下变频后得到,

$$X_K = X_K \exp(-j2\pi \Delta f t) + n(t) \quad (2)$$

式中, $n(t)$ 为信道所加噪声, Δf 为载波频率的偏移量。根据抽样定理在 $t = \frac{kT}{N}$ 时刻对此信号进行抽样并进行 FFT 变换可得最后的输出数据为,

$$\begin{aligned} a_i = & \frac{1}{N} a_i \frac{\sin(\pi \Delta f T)}{\sin(\frac{\pi \Delta f T}{N})} \exp(j\pi \Delta f T \frac{N-1}{N}) + \\ & \sum_{l=0}^{N-1} a_l \frac{\sin(\pi \Delta f T)}{N \sin(\frac{\pi(l-m+\Delta f T)}{N})} \times \\ & \exp(j\pi \Delta f T \frac{N-1}{N}) \exp(-j\pi \frac{l-m}{N}) + I_{n_k} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $l \neq m$, 第一项为原始信号 a_i 的输出量;第二项为载波频偏引起的子载波间干扰;第三项 I_{n_k} 表示信道噪声所带来的影响。

由式(3)可以看出,由于载波频偏的存在,原始信号经过 OFDM 系统后相位发生了偏移,且当 $\Delta f T$ 不为整数即载波频偏不是整数倍频偏时,各个子载波之间会产生严重的子载波间干扰,会在一定程度上影响 OFDM 系统的性能。所以在电力线信道模型中对载波频偏特性进行分析显得尤为重要。

载波频偏,即在频域对原始信号进行搬移,在算法模型及 FPGA 实现时只需将原始信号乘以某一特定频率的正弦或者是余弦信号即可。图 7 为设置输入信号为频率是 300 kHz,幅值为 10 的正弦信号,配置载波偏移量为 40 kHz 时由逻辑分析仪采集 FPGA 的输出得到的此正弦信号经载波偏移后的频谱图形。

由图可知,原输入信号的频谱经过载波频偏特性之后分别左右搬移了 40 kHz。此模块的原始数据在经过 Matlab 处理时产生了频谱泄露,但其不影响

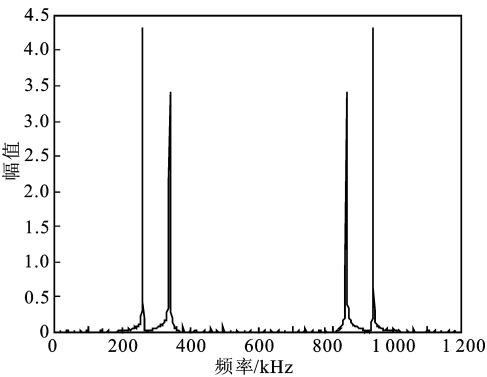


图 7 载波频偏仿真图形

模块功能,所以此模块符合设计要求.

3 信道设计综合结果

将上述六个模块的 verilog 代码组合在一起,形成了一个完整的包含了上述 6 种特性的信道模型. 根据 OFDM 电力线通信项目的设计要求,设置时钟约束为 24 MHz,将该设计模块在 SMIC-55 nm 工艺下使用 Synopsys 公司的 Design Compiler 软件进行综合,其综合结果如图 8、9 所示.

Number of ports:	41
Number of nets:	276
Number of cells:	5
Number of references:	5
Combinational area:	110385.278789
Noncombinational area:	25815.679800
Net Interconnect area:	undefined (Wire load has zero net area)
Total cell area:	136200.958589
Total area:	undefined

图 8 信道模块的总面积

由图 8 和图 9 可知,此信道模块消耗的总面积为 $136\ 200.96\ \mu\text{m}^2$,总功耗为 $856.35\ \mu\text{W}$,满足项目设计要求.

4 结束语

本文设计了基于 OFDM 电力线通信的完整信

Global Operating Voltage = 1.08	
Power-specific unit information :	
Voltage Units = 1V	
Capacitance Units = 1.000000pf	
Time Units = 1ns	
Dynamic Power Units = 1mW	(derived from V,C,T units)
Leakage Power Units = 1pW	
Cell Internal Power = 542.7527 uW	(63%)
Net Switching Power = 313.5956 uW	(37%)

Total Dynamic Power = 856.3483 uW	(100%)
Cell Leakage Power = 28.7457 uW	

图 9 信道模块的总功耗

道模型. 在原有电力线通信信道特性的基础上增加了载波频偏特性,给出了所有信道特性的算法模型和 FPGA 实现结果.

参考文献:

[1] 张有兵,何海波,吴昕,等. 低压电力线载波通信中信道模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2002, 30(5): 20-24.

[2] 张培玲. 低压高速电力线通信关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2014.

[3] 马英红. 基于低压电力线时变模型的 OFDM 信道估计的研究[D]. 河北:华北电力大学,2005.

[4] 张捷. 低压电力线载波通信信道特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.

[5] 马强,陈启美,李勃. 跻身未来的电力线通信[J]. 电力系统自动化,2003,27(4): 72-76.

[6] 秦升平,尹长川,郝建军,等. 一种新的 OFDM 系统载波频率偏移估计和跟踪方案[J]. 电子与信息学报, 2004,26(10):1569-1574.

作者简介:

秦天凯 男,(1990-),硕士研究生. 研究方向为集成电路设计. E-mail: 370620807@qq. com.

高清运 女,(1965-),副教授. 研究方向为集成电路设计.