

基于 OFDM 技术的电力线通信系统建模与仿真

陈宜文 许斌 郝建华 张子博

(装备学院 北京 101416)

摘要: 正交频分复用(OFDM)技术是电力线通信常用的调制技术之一;电力线通信的信道条件复杂,信道特征是电力线通信的重点模块,两者都是电力线通信研究的重要组成部分。在深入研究 OFDM 基本原理和电力线信道特性的基础上,在 OFDM 原有的发射与接收模型中,加入了电力线的信道特性,从而建立了相对完整的电力线通信系统模型,并利用 MATLAB 对该模型进行仿真,仿真结果体现了电力线信道特性以及 OFDM 技术应用于电力线通信的优越性。

关键词: 正交频分复用;电力线通信系统;MATLAB

中图分类号: TN914.51 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Modeling and simulation of power line communication system based on OFDM technology

Chen Yiwen Xu Bin Hao Jianhua Zhang Zibo

(Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technique is one of the most useful modulation methods of power line communication. The channel conditions of power line communication is complex, and power line channel characteristics is the key of the power line communication, both of which are important parts of power line communication research. Based on the research of OFDM basic principle and characteristics of power line channel, this paper added the power line channel characteristics into the emission and receiving modules of OFDM model, and built a complete model of power line communication system. The simulation results got by MATLAB showed the power line channel characteristics and the advantages of OFDM technology applied in power line communication.

Keywords: OFDM; power line communication system; MATLAB

1 引言

电力线通信(power line communication, PLC)是指利用已有的电力线网络进行信号传输的通信方式,具有传输距离远、通道可靠性高、电网建设同步等优点。但电力线不是专用的通信信道,所以其信道特性较为恶劣,具体表现在:噪声电平高、阻抗变化大、多径延迟效应等。

正交频分复用(OFDM)技术最早应用于无线通信,具有良好的抗多径效应和抗干扰能力,是电力线通信最为常用的调制技术之一。介绍了 OFDM 技术的基本原理,建立了 OFDM 发射与接收模型,而后在信道中加入了电力线噪声和多径效应,构建了一个相对完整的基于 OFDM 调制技术的电力线通信系统的数学模型并进行仿真与分析。

构建的电力线通信系统如图 1 所示。

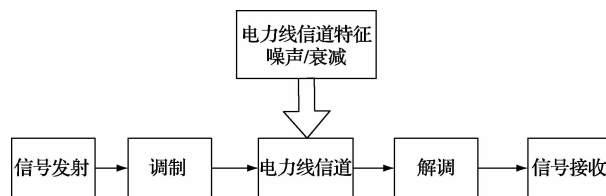


图 1 电力线通信系统

2 OFDM 调制技术

正交频分复用(OFDM)属于多载波调制,它的基本原理是:将串行数据编码后转换为 N 路并行数据传输。 N 路子信道的信号在频率上等间隔且相互正交,既提高了频带利用率,又能在接收时利用载波之间的正交性,无失真

地恢复发送信息。

根据以上原理,系统中有 N 个子信道,每个子信道上的子载波为:

$$x_k(t) = B_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k), k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

则 N 路子信号之和为:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} B_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (2)$$

上式的复数形式为:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \vec{B}_k e^{j2\pi f_k t + \varphi_k} \quad (3)$$

由式(3)可以看出 OFDM 可通过 IDFT/DFT 变换对或 IFFT/FFT 变换对来实现,OFDM 通信系统原理如图 2 所示。

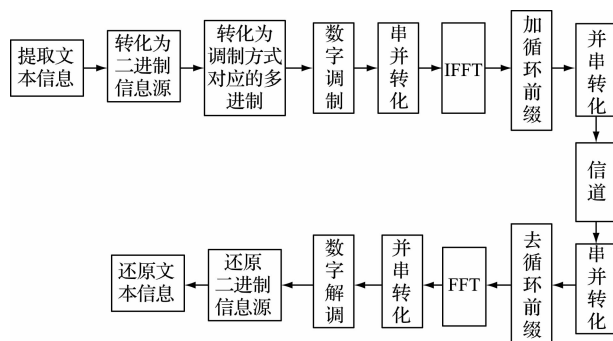


图 2 OFDM 通信系统的原理

3 电力线通信信道特性分析与建模

基于电力线网络中噪声干扰强,信号衰减严重,具有因阻抗不匹配引起的多径效应等信道特点,从电力线噪声和多径效应两个方面,对电力线信道特性进行分析。

3.1 电力线通信的噪声特性及建模仿真

电力线信道中常见的五类噪声^[4]分别是:有色背景噪声、工频同步噪声、工频异步噪声、窄带噪声和随机脉冲噪声。

1) 有色背景噪声叠加工频异步噪声

有色背景噪声的来源有 2 个:1)线路中的电阻、导线等元件中的分子热运动产生的热噪声;2)带有小型电机的电力线设备(如电吹风、电磁炉、搅拌机)运行时产生的谐波噪声。工频异步噪声来自于电力线中带有显示功能的电气设备,如电视机屏幕、电脑显示器等,这些设备的显示器在进行连续的逐行扫描时就会产生工频异步噪声。

由于工频异步噪声的周期很小,以至于其周期性可以忽略不计,该噪声可以直接使用有色背景噪声来模拟,因此将两类噪声共同归于背景噪声,叠加建模。有色背景噪声的建模主要采用高斯白噪声通过整形滤波器的方法,其模型如图 3 所示。

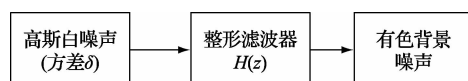


图 3 有色背景噪声建模

仿真结果为:

由图 4 可以看出,由有色背景噪声和工频异步噪声叠加的背景噪声在时域中幅度随时间基本没有变化,也没有呈现周期性;图 5 显示:在频域中,该噪声的频谱比较平滑,并在整个频带范围内都有明显分布,频谱值不高,且随频率增大而减小,在低频处有较大频谱的出现。

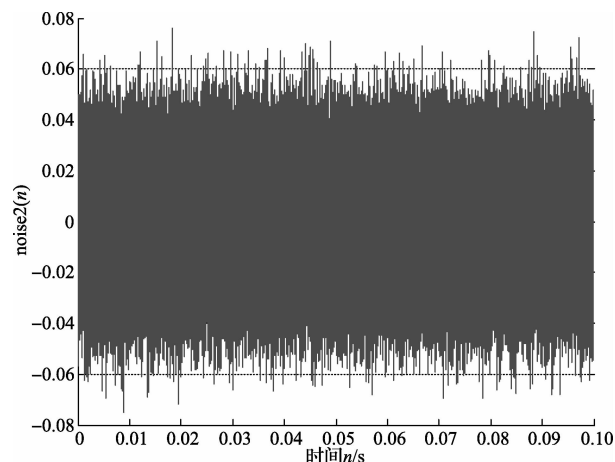


图 4 有色背景噪声叠加工频异步噪声时域波形

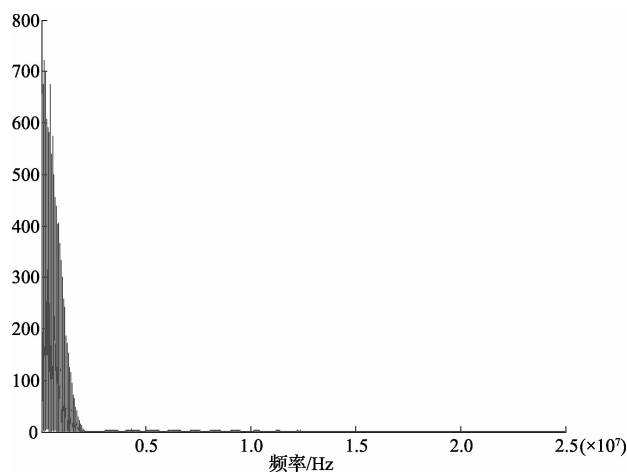


图 5 有色背景噪声叠加工频异步噪声频谱

2) 工频同步噪声叠加窄带噪声

工频同步噪声是指电力线网络中分布的大功率电气设备在运行时产生的与工频同步的周期性噪声,其频率是工频或工频的整数倍,一般是 50 Hz 或者 100 Hz。窄带噪

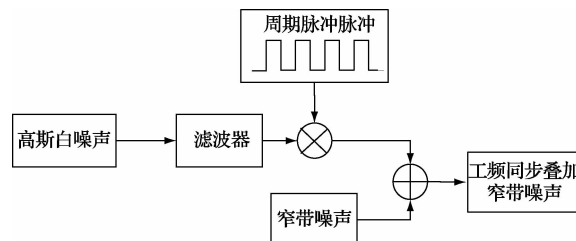


图 6 工频同步噪声叠加窄带噪声

声是由短波、中波广播中的无线信号在电力线信道中引起串扰而产生的窄频带噪声,如图6所示。

根据文献[4]中的实际测得的电力线噪声,可以发现该组噪声同时具有工频同步噪声特性和窄带噪声特性,所以是两者的叠加噪声。根据下图模型将两类噪声进行叠加。

仿真结果如图7和8所示。

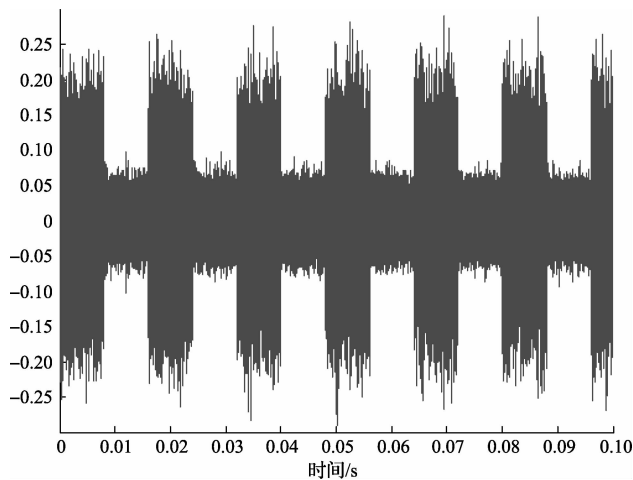


图7 窄带噪声叠加工频同步噪声时域波形

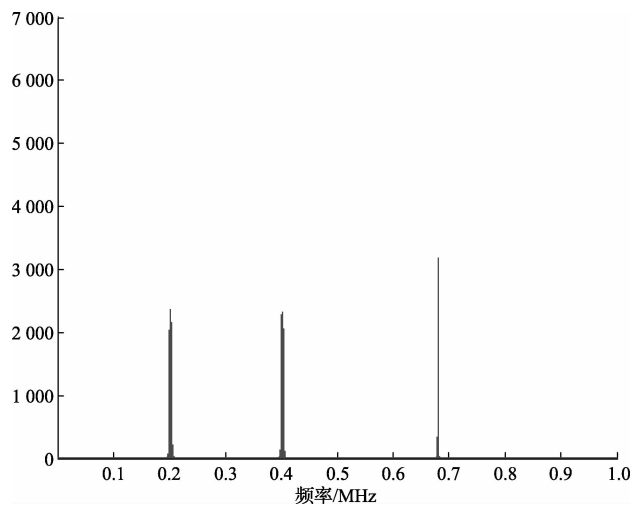


图8 窄带噪声叠加工频同步噪声频谱

图8窄带噪声叠加工频同步噪声频谱从仿真结果可以看出:在时域上,窄带噪声叠加工频同步噪声有明显的周期性;在频域上,噪声频谱在整个频带上都有分布,并且在0.2 Hz、0.4 Hz以及0.68 Hz的频点处有明显的窄带频谱。

3) 随机脉冲噪声

随机脉冲噪声主要由电子设备的开关或雷电的瞬间干扰产生,所以持续时间较短,且随机出现,如图9所示。就统计数据来看,在使用电器设备比较集中的19:00~24:00,随机脉冲噪声的出现次数较多。

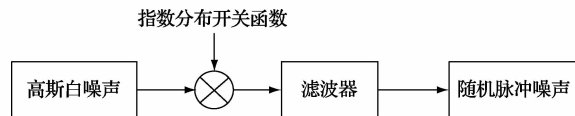


图9 随机噪声建模

随机脉冲噪声的模型要通过其主要参数的统计分析来设计,根据大量文献中的数据统计,可以发现指数分布符合随机脉冲噪声的脉冲强度、宽度、间隔等。噪声建模如图10所示。

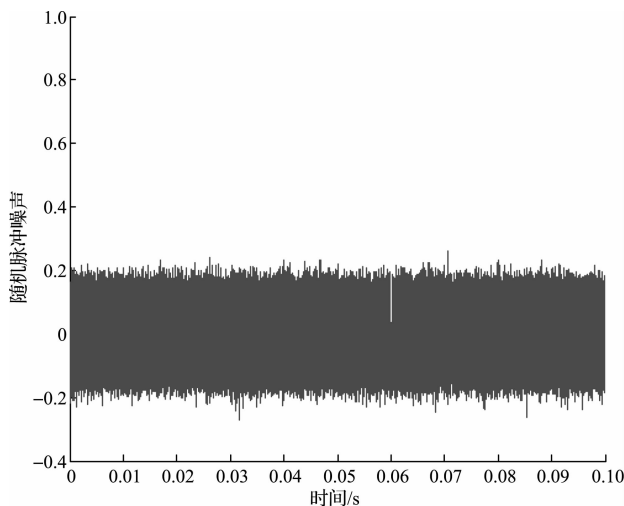


图10 脉冲噪声时域波形

利用MATLAB对上述模型仿真,得到随机脉冲噪声的仿真结果如图11所示。

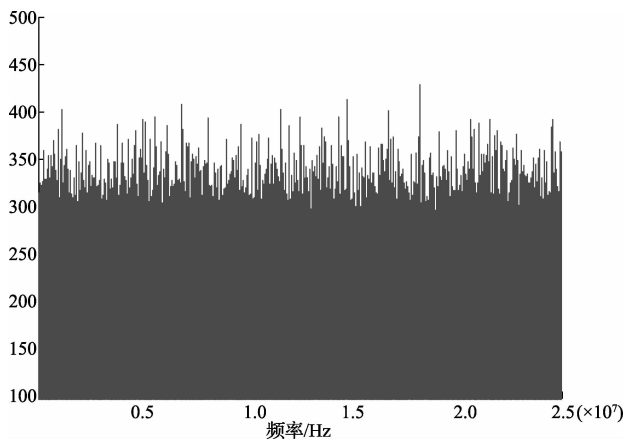


图11 脉冲噪声频谱

从图10和图11可以看出,由于随机脉冲噪声持续时间很短,所以能量较为集中,功率谱密度较大,频谱很宽。

3.2 电力线通信的多径效应及仿真

电力线信道中最主要的衰减是多径效应引起的。电力线通信的多径效应的根本原因是线路中的阻抗不匹配引起的电磁波反射,即信号反射。

电力线网络的拓扑结构比较复杂,传输线规格也不统一。因此,在不考虑拓扑结构和传输线规格的前提下,电力线多径模型可以用描述电力线网络复杂的传输函数来

表示。其幅频特性可表示为：

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0+a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \tag{4}$$

式中： i 路径编号，当路径的时延最短时 $i = 1$ ； g_i 为第 i 条路径的权重因子，由该路径的反射系数、传输系数共同决定，通常为复数； a_0, a_1 为衰减参数； k 为衰减因子中频率的指数（通常为 $0.5 \sim 1$ ）； d_i 为第 i 条路径的长度； v_p 为信号传播速度。

在电力线信道模型^[6]中， a_0 和 k 等于 0 和 1， $a_1 = 1.6 \times 10^{-10}$ ， $v_p = 3.0 \times 10^8$ ，则上式变为：

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-a_1 f d_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \tag{5}$$

实际测量的电力线信道的路径系数如表 1 所示。

表 1 电力线信道衰减系数和路径系数

i	g_i	d_i/m
1	0.016	80
2	0.031	91
3	0.091	103
4	-0.042	133
5	-0.032	142
6	-0.031	198
7	0.025	248
8	-0.025	292
9	0.061	331
10	-0.025	370
11	0.051	447
12	-0.042	510
13	0.032	630
14	-0.043	704
15	0.031	850
16	-0.017	950
17	0.014	1 050
18	-0.012	1 150

将这些系数代入电力线通信多径模型，得到多径信道的幅频和相频曲线如图 12 所示。

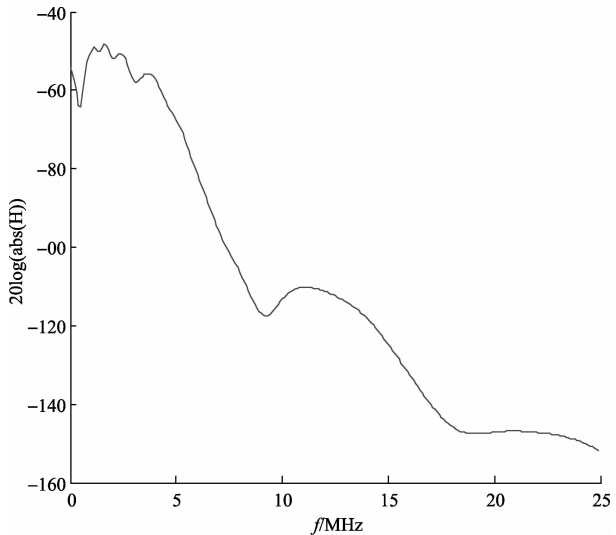


图 12 电力线多径模型幅频特性

仿真结果体现了多径传输带来的频率选择性衰落，以及随着传输距离增加和频率提高带来的信道衰落。

4 基于 OFDM 调制技术的电力线通信系统仿真分析

首先，构建了 OFDM 原有的发射接收模型，发射信号为图片信号，信道中只加入高斯白噪声，信噪比设定为 3，子载波调制方式为 QPSK，仿真结果如图 13 和 14 所示。

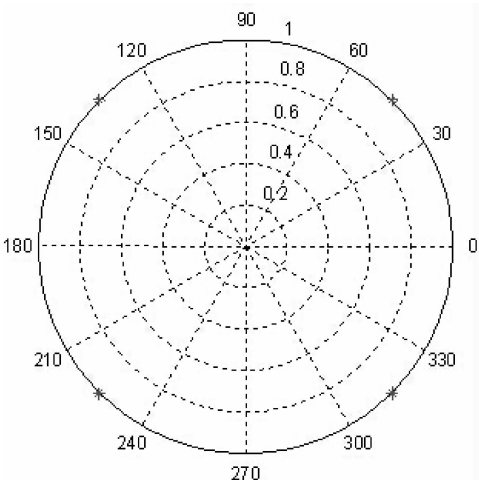


(a) 发射的图像

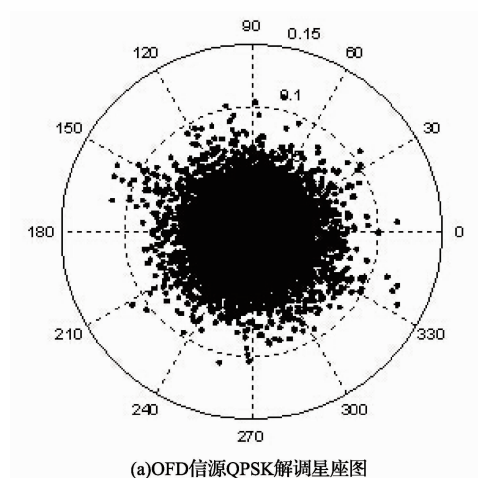
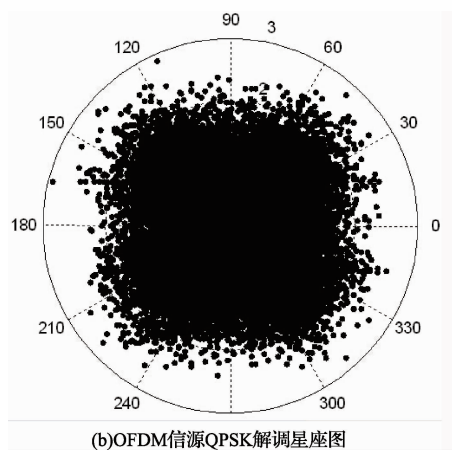


(b) 接收的图像

图 13 发射与接收图像



(a) OFDM 信号 QPSK 调制星座图



除此之外,加入电力线噪声和电力线多径效应后,接收误码率提高,虽然对信号的接收有一定的影响,但是依然能够接收到较为清晰的图像,说明 OFDM 调制技术能较好地应用于电力线通信。

5 结 论

构建了一个完整的电力线通信系统,以 OFDM 发射和接收模型为基础,在信道中加入了电力线中常见的有色背景噪声、工频同步噪声、工频异步噪声、窄带噪声和随机脉冲噪声及多径效应。仿真结果证明了所建模型的可行性,能够完成 OFDM 信号的发射和接收。仿真结果体现了电力线通信的信道特点和 OFDM 调制抗噪声干扰和抗信道衰落能力强的优越性。

参 考 文 献

- [1] 任志胜,林平分. 电力线载波通信系统的物理层仿真方法的研究[J]. 科技信息, 2013(7):565-569.
- [2] 郭昊坤. 低压电力线通信信道噪声建模研究[D]. 南京:南京理工大学,2012:23-29.
- [3] 李丰. 低压电力线载波通信信道阻抗和衰减特性的研究[D]. 保定:华北电力大学,2012:42-50.
- [4] 台新. 电力线通信信道噪声分析与建模仿真 [D]. 北京:北京邮电大学,2013:31-57.
- [5] 吴军基,郭昊坤,孟绍良,等. 电力线通信信道背景噪声建模研究[J]. 电力系统保护与控制,2011(12):6-10.
- [6] 张旭辉,张礼勇,梁宵. 基于改进粒子群优化算法的电力线通信多径传输模型参数辨识[J]. 电网技术, 2009(1):75-79.
- [7] 王勇. 基于 OFDM 的电力线通信中的部分关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2007:24-32.
- [8] 郭昊坤,吴军基,衡思坤,等. 低压电力线通信信道噪声建模及仿真[J]. 电力系统保护与控制,2012(10):61-66.
- [9] 赵建华,李智,马一森. 电力线信道模型下 OFDM 通信系统的 Simulink 仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2011(9):41-43.
- [10] 谢俐. 电力线载波数字通信技术研究与实践[D]. 重庆:重庆大学,2009:42-53.
- [11] 陈朝阳,邢海涛,杨光松,等. 非参数似然率独立分量分析算法的 OFDM 系统载波频偏盲估计[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):1967-1972.
- [12] 李欣,郝建华,许斌,等. 自适应 OFDM 系统中各种调制解调技术的性能分析[J]. 国外电子测量技术, 2009,28(6):24-27.
- [13] 黄继鹏,李欣,栾泊,等. OFDM 系统中自适应调制结构设计及性能分析[J]. 国外电子测量技术,2010, 29(11):31-34.

作 者 简 介

陈宜文,硕士研究生,主要研究方向为电力线通信系统、电力线通信信号检测。
E-mail:ipad910913@163.com