

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.06.008

# 低压电力线载波通信信道特性仿真研究

谷聚辉, 张学毅, 邓杰, 周美琴, 周志伟

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对低压配电网电力线载波通信信道存在频率选择性衰减, 建立了电力线信道模型, 并对频率为 50 Hz~20 MHz 的信道频率响应进行了分析。由于电力线信道存在多径效应, 考虑到信道路径对信号衰减的影响, 建立了多径信道衰减模型, 并对多径信道下的信号频率特性进行仿真, 得出的试验结果与预期一致。对电力线载波通信信道进行了改进, 在 OFDM 子载波信道中插入导频符号, 改进后系统的仿真误码率较改进前降低了 10%。

**关键词:** 电力线载波通信; 频率选择性衰减; 多径衰落; 误码率

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2014)06-0038-04

## The Simulation Study of Low-Voltage Power Line Carrier Communication Channel Characteristics

Gu Juhui, Zhang Xueyi, Deng Jie, Zhou Meiqin, Zhou Zhiwei

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the frequency selective attenuation existing in power line carrier communication channel of low-voltage distribution network, established PLC channel models and analyzed the channel frequency response at 50 Hz~20 MHz. As the power line channel existed multipath effects, considering the impact of channel paths to signal attenuation, established a multi-path channel attenuation model and simulated the signal frequency characteristics in multi-path channels. Obtained the experimental results consistent with the expected. Improved the PLC communication channel and inserted a pilot symbol in OFDM subcarriers channel of the system. The simulated bit error rate of the improved system reduced by 10% than before.

**Keywords:** power line carrier communication; frequency selective attenuation; multipath fading; bit error rate

## 0 引言

由于低压配电网拓扑复杂易变和负荷多样性, 信号在电力线传输过程中容易出现折反射, 导致信号在到达接收器时出现传输延时, 致使信号频率出

现选择性衰落。建立精确的电力线信道模型, 对信道频率响应的研究来说是很关键的。采用正交频分复用技术 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 可以有效地克服电力线载波通信 (power line

收稿日期: 2014-08-17

基金项目: 湖南省科技厅科技计划基金资助项目 (2013FJ3099), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目 (CX1303)

作者简介: 谷聚辉 (1988-), 男, 河南洛阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电工理论与新技术,

E-mail: gujuhui.cool@163.com

通信作者: 张学毅 (1966-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学教授, 主要从事电工理论与新技术方面的研究,

E-mail: 774970930@qq.com

carrier communication, PLC) 信道存在的多径效应及频率选择性衰落。

文献[1]建立了基于背景噪声的自回归模型和脉冲噪声的改进马尔科夫模型,但模型复杂度高,不能很好地反映信道时变性。文献[2]依据信道频域和时域特性,采用自顶向下的建模方法建立低压电力线信道模型,虽然仿真结果具有一定的精确性,但对于信道特性的研究过于单一。文献[3]采用3 dB相干带宽和RMS (root mean square) 时延扩展的统计规律,建立了低压电网信道频率响应的三阶统计自回归模型,但没有考虑不同阶数对信号频率的影响。文献[4]分析了信号的平均增益和延迟扩展,没有考虑信道特性。文献[5-7]主要从信道容量和服务质量的角度分析了信道频率特性,未考虑信道多径衰减带来的影响。上述研究虽然对电力线通信进行分析,但由于模型不精确,均未考虑到不同信道模型下多径效应对信号衰减的影响,具有一定的局限性。

本文在对已有信道模型进行研究的基础上,建立了低压电力线载波通信多径信道衰减模型,并分析了信道频率衰减特性。最后,将发送的OFDM子载波信道进行改进,插入一种导频符号,对系统误码率进行仿真。试验结果表明,改进模型对通信质量有一定的提升。

## 1 低压电力线信道特性分析

由于低压配电网结构复杂、电力线通信环境恶劣,信道存在噪声干扰和衰减等问题。当电力线上连接不同类型的负载时,由于负载的电气特性未知,容易造成阻抗特性难以匹配。同时,连接在低压电力线上用电设备的开通或关断,也会对电力线载波信号造成干扰,使信道呈现出时变特性。在380 V/220 V侧,变压器两边的信号会呈现20~100 dB的衰减。这些问题都会严重影响系统通信质量,所以对低压电力线载波信道特性的研究显得尤为重要。

低压电力线信道噪声模型如图1所示。

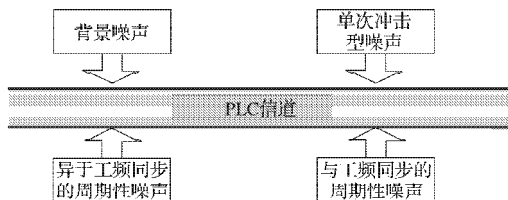


图1 PLC信道噪声模型

Fig. 1 The noise model of PLC channel

图1中背景噪声多指配电变压器一次侧进入配电网的噪声,还有网络中各种电气设备产生的噪声

等;单次冲击型噪声主要由配电网中用电负荷的突然投切产生;与工频50 Hz同步的周期性噪声,多来自电网中的变频设备、开关电源等;异于工频同步的噪声多指一些非工频工作的用电设备等。这些噪声混合在一起对电力线上信号的传输产生很大的干扰,造成系统发生突发性错误。

电力线载波信号容易在信道中发生折反射现象,使信号在信道中形成多条传输路径,从而导致信号存在一定的延时。电力线载波信道多径传输模型如图2所示。

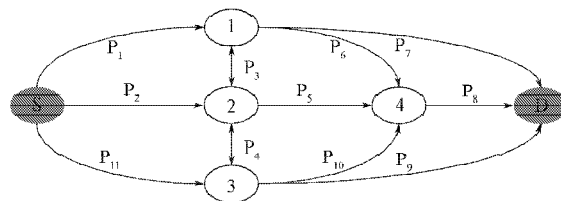


图2 电力线载波信道多径传输模型

Fig. 2 The multipath transmission model of PLC channel

假设信号从发射机S发送到接收机D,从图2中可以看出,由于信号的折反射现象,使S和D之间形成了多条传输路径 $P_i(i=1, 2, \dots, 10)$ 。随着传输路径的增多,会使信号到达接收端存在一定的延时,并出现信号叠加等现象。

## 2 电力线载波通信信道模型

### 2.1 多径衰减信道

根据Manfred Zimmermann和Klaus Dostert理论“由上而下”的建模思路,结合电力线载波通信信道的多径效应,建立了信道多径衰减函数表达式:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N H_i(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

式中: $f$ 为发送信号频率; $N$ 为信道路径数; $g_i$ 为第 $i$  ( $i=0, 1, \dots, N$ ) 条路径反射和传输组合的加权系数; $e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_i}$ 是由路径长度和频率所决定的衰减部分; $\alpha_0, \alpha_1$ 是衰减参数; $k$ 是衰减因子指数,通常取0.2~1.0。 $e^{-j2\pi f \tau_i}$ 是由路径和速度所决定的衰减部分, $\tau_i = d_i / v_p$ 为第 $i$ 条路径上的传输时延, $d_i$ 为路径长度, $v_p$ 为传播速度。多径模型部分仿真参数设置见表1。

表1 多径模型部分仿真参数设置

Table 1 The parameters setting of multipath model

仿真参数	参数名称	参数设置
$k$	衰减因子	0.6
$g_i$	加权系数	<1
$d_i$	路径长度	>100 m
$\alpha_i$	衰减参数	测量获得

本文中 $\alpha_0=0, \alpha_1=0.512+j0.176, \alpha_2=0.383+j0.139, \alpha_3=0.169+j0.103, \alpha_4=-0.097+j0.089, \alpha_5=-0.075+j0.07, \alpha_6=-0.023+j0.035, \dots$ ;  $g_i$  和  $d_i$  由路径长度决定。依据表1仿真参数设置,对频率在50 Hz~20 MHz范围内的信号进行 Matlab 仿真,得出多径信道衰减特性曲线如图3所示。

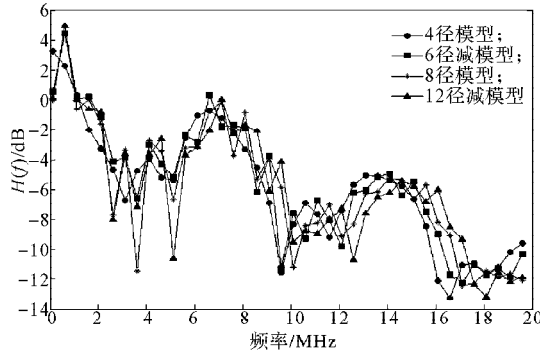


图3 不同路径衰减特性曲线

Fig. 3 The attenuation characteristic curves for different paths

由图3可得出,电力线信道衰减随频率的增大而增大,信号在某些频段内衰落较为严重,不同路径下的信号衰减呈现一定的规律性。对电力线载波通信信道的研究,文中取4径信道。

### 2.2 FIR模型

低压电力线载波信号在传输过程中,由于存在噪声干扰,将FIR滤波器(finite impulse response, FIR)视为结合多径衰减和延时的组合,其表达式为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k), \quad (k=0,1,\dots,N-1). \quad (2)$$

式中:  $x(n)(n=1, 2, \dots)$  表示滤波器信号输入;  $y(n)$  表示滤波器输出;  $h(k)$  为FIR的系统函数。FIR模型结构如图4所示。

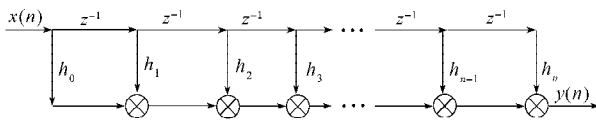


图4 FIR滤波器结构

Fig. 4 The structure of FIR filter

对于不同路径的信道, FIR 的冲击响应函数  $h(t)$  可表示为

$$h(t) = e^{-Afd_i} \cdot \sum_{i=1}^N \gamma_i \delta(t - \tau_i), \quad i=(0,1,2,\dots,N-1), \quad (3)$$

式中:  $A$  为衰减系数,常取0~1;  $\gamma_i$  为路径  $i$  的系数,取值0~1;  $\delta(t - \tau_i)$  为路径  $i$  的冲击响应。根据信号延时和码元时长来选取合适的FIR滤波器阶数,作为电力线信道仿真模型。系数  $\gamma_0=0.53, \gamma_1=0.31-0.27j, \gamma_2=0.26-0.15j, \gamma_3=0.12-0.08j, \gamma_4=0.09-0.03j$ 。FIR模型幅频特性曲线如图5所示。

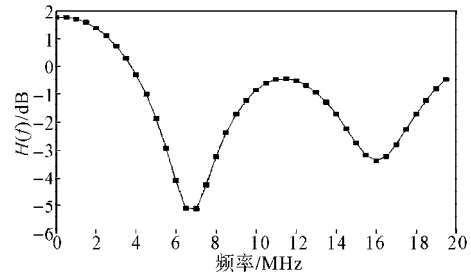


图5 FIR模型幅频特性

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic of FIR model

由图5可以看出, FIR模型能够反映信号幅值随着频率增大而衰减,当频率为1.45 MHz时衰减最大,但不同频率段衰减程度差异比较大,模型呈现出不稳定状态。

### 2.3 自回归模型

PLC信道频率变化是一个随机过程,用一个白噪声和一个滤波器模型来研究这个随机过程。自回归滑动平均(autoregressive moving average, ARMA)就是一个很好的用于研究平稳随机过程的参数模型,该模型背景噪声属于典型离散高斯型,自回归模型传输函数表示为

$$H(\bar{f}_{t,n}) = N(f_n) - \sum_{i=1}^m a_i H(\bar{f}_{t,n-i}). \quad (4)$$

对式(4)在离散条件下进行变换,可得

$$H(n) = N(f_n) - \sum_{p=1}^m a_p H(n-1). \quad (5)$$

式(4)~(5)中:  $H(\bar{f}_{t,n})$  是  $t$  时刻第  $n$  个采样值;  $m$  为自回归模型的阶数;系数  $a_p (p=1, 2, \dots, m)$  为复数模型;  $H(n)$  为第  $n$  个频率响应的采样值。试验部分仿真参数设置如表2所示。

表2 自回归模型部分仿真参数设置

Table 2 Part of the parameters setting of ARMA model

仿真参数	参数名称	参数设置
$\Delta f/\text{kHz}$	采样频率间隔	500
$N_s/\text{个}$	采样点数	45
$\sigma$	白噪声方差	$1.986 \cdot 10^{-5}$
$a_1$	一阶系数	$-0.689 + j0.090$
$a_2$	二阶系数	$-0.201 + j0.065$
$a_3$	三阶系数	$-0.103 + j0.025$

根据表2设置的仿真参数,对信道模型进行仿真,得出信号幅频特性如图6所示。

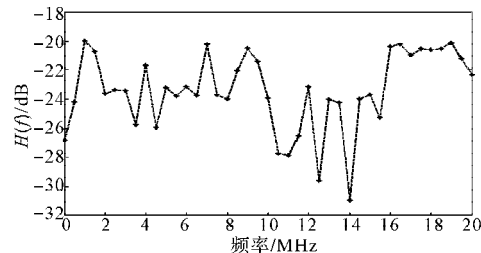


图6 自回归模型幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristic of ARMA model

从图6可以看出, 自回归模型在一定程度上反映了频率选择性衰减, 但不能很好地体现信号随频率的增大而衰减的特征。

### 3 系统仿真分析

#### 3.1 多径信道对信号衰减的影响

对文中提出的多径信道衰减模型进行仿真对比分析, 结果如图7所示。

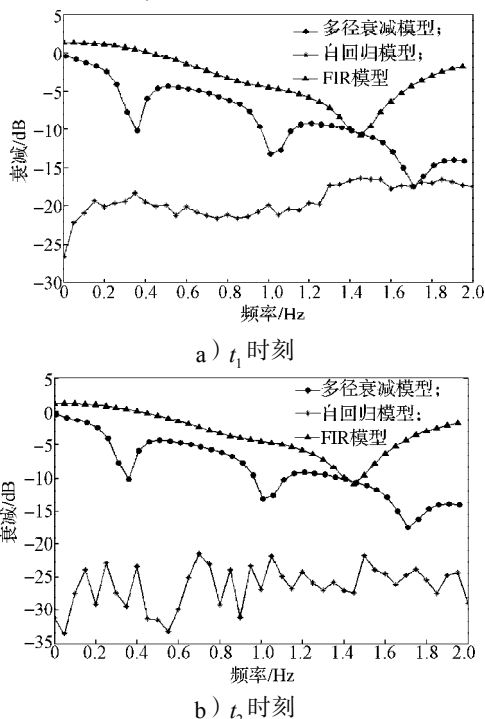


图7 PLC信道衰减特性

Fig. 7 The attenuation characteristic of PLC channel

从图7可以看出, 自回归模型在2个不同时刻的衰减曲线不同, 虽然在一定程度上反映了信道衰减特性, 但不能很好地体现衰减随频率增加而增大的特点, FIR模型信号衰减随频率变化不稳定。文中提出的多径衰减信道模型能很好地体现频率选择性衰减, 有较好的信道时变性。

#### 3.2 改进信道的误码率

对电力线载波通信信道进行改进, 在OFDM子载波中插入导频符号, 然后对其进行Matlab仿真分析。在频域内插入导频符号的间隔表示形式为

$$N_f \leq \frac{1}{\tau_{\max}} \Delta F_c, \quad (6)$$

式中:  $N_f$  为插入导频符号最小间隔, 本文取值5;  $\Delta F_c = 1/T_c$  为子载波频率间隔, 为单位归一化;  $\tau_{\max}$  为信道最大时延扩展。

设OFDM系统产生的子载波数为128个, 每次仿真产生50个OFDM符号的比特数, 则一共会产生

128\*50个星座映射符号, 子载波符号长度为128  $\mu$ s, 循环前缀长度为16  $\mu$ s, 部分实验仿真参数设置如表3所示。

表3 系统部分仿真参数设置

Table 3 Part of the simulation parameters setting of system

仿真参数	参数名称	参数设置
$\Delta f_c$ /kHz	子载波间隔	8
$N_f$ 个	子载波数	128
$\Delta f_s$ /Hz	采样间隔	2
$B$ /MHz	带宽	1
$N_{cp}$	循环前缀数	16
$f_c$ /GHz	仿真载频	2
$\Delta t$ /s	仿真间隔	1e-6
$\Delta \tau_i$ /s	第 <i>i</i> 条路径延时	自行设置

OFDM系统采用16QAM调制, 4径信道的延时分别设置为:  $\Delta \tau_1=0$  s,  $\Delta \tau_2=(1e-6)$  s,  $\Delta \tau_3=(3e-6)$  s,  $\Delta \tau_4=(5e-6)$  s。循环前缀延时可设置为  $\Delta \tau_{cp}=(10e-6)$  s。模型改进前后误码率如图8所示。

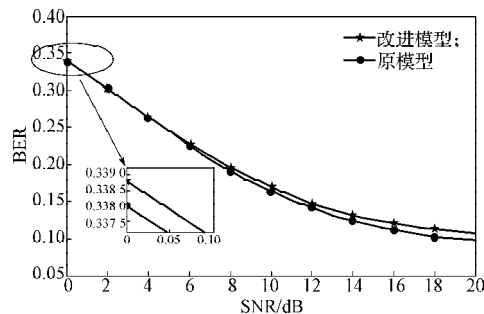


图8 系统误码率

Fig. 8 The BER of system

图8中横坐标SNR为系统信噪比, 纵坐标BER为系统误码率。通过实验仿真结果可以看出, SNR在0~6 dB的范围内, 信道改进前后误码率基本不变。当信噪比超过6 dB后, 改进信道较原信道误码率减小, 主要由于子载波信道中导频符号的加入, 使载波信号在传输过程中能够更好地调整并适应符号的改变, 减小了符号间的干扰。通过计算可以得出, 改进后的模型较改进前的系统误码率降低了10%。

### 4 结语

由于低压电力线载波通信的特殊性, 对频率范围为50 Hz~20 MHz内的信道模型进行研究, 针对电力线载波通信信道存在频率选择性衰减和多径效应等特性, 建立了电力线载波多径信道衰减模型, 并与FIR模型和自回归模型进行仿真对比分析, 得出多径衰减模型能够很好地体现电力线信道所存在的多径衰减和时变特性, 为工程应用提供一定的参考。对发送的OFDM子载波信道进行改进, (下转第52页)