

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211071

# 电力线传输特性和噪声干扰对通信性能的相对影响

张文远, 李天昊

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 电力线载波通信技术是支撑智能电网信息传输的重要技术之一, 但是电力线作为信息传输通道时具有复杂的传输特性和较多的噪声干扰。为分析电力线信道的频率选择性对通信性能的影响及其和信道噪声的相对作用, 设计滤波器模拟具有不同频率选择性的电力线信道, 用米德尔顿 A 类噪声模拟信道中不同强度的噪声, 采用基于 OFDM 技术的 G3-PLC 标准建立窄带电力线载波通信系统模型进行仿真分析。结果表明: 电力线载波通信中, 低速率传输数据或信号带宽较小时噪声干扰比频率选择性对系统性能影响大。随着数据传输速率或信号带宽增加, 信道的频率选择性对系统性能的影响逐步增大。该结论为设计和研究电力线载波通信系统提供了理论分析基础。  
**关键词:** 电力线载波通信; 频率选择性衰减; 米德尔顿 A 类噪声; OFDM; 误码率

## Relative impacts of channel characteristics and noise characteristics on the performance of a power line communication system

ZHANG Wenyuan, LI Tianhao

(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Power line carrier communication (PLC) technology is one of the important technologies supporting information transmission for the smart grid. As an information transmission medium, however, a power line is complex in terms of its channel and noise characteristics. In order to disentangle the relative influence of channel frequency-selective fading and channel noise on the performance of the PLC system and the interaction between them, filters are designed to simulate power line channels with different frequency-selective fading and Middleton Class-A noise is used to simulate the noise of different intensities in the PLC system. Based on the G3-PLC protocol, which adopts OFDM technology, a whole model of the narrowband PLC system is built and simulation analysis is conducted. Results show that the noise characteristic has more influence on performance than frequency-selective fading in conditions of low transmission rate and/or small signal bandwidth. With the increase of transmission rate and/or signal bandwidth, the influence of channel frequency selectivity on the system performance becomes more significant. The results of this study provide a theoretical basis for designing and studying the PLC system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51974151).

**Key words:** power line carrier communication; frequency-selective fading; Middleton class-A noise; OFDM; BER

## 0 引言

电力线载波通信不仅是支持先进计量基础设施 (AMI) 通信的重要技术, 也是实现智能电网集成化的重要手段<sup>[1-4]</sup>。配电网通过局域网或广域网连接到公共设施控制中心, 使电网系统更加便捷地获取用户电量消耗信息的同时也可为居民提供远程激活、

电表检测以及在线缴费等其他双向服务。电力线载波通信技术相比于其他电力系统通信技术的优势在于: 可以利用现有电力线直接工作, 无需再进行其他基础设施建设。因此, 电力线载波通信技术在智能电网建设中有着不可替代的作用。

电力线作为传输电能的通道, 在传输信息时, 其网络拓扑结构的阻抗不匹配会产生反射和多径效应, 进而导致信号出现平坦衰落、频率选择性衰落等问题<sup>[5]</sup>。此外, 信道中存在的各种噪声源(例如背景噪声、脉冲噪声)都对信息传输有干扰<sup>[6-7]</sup>。因此,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51974151); 辽宁省自然科学基金指导项目资助(20180550308)

分析理解电力线信道传输特性和噪声对通信性能的影响是优化电力线载波通信系统必不可少的环节。

国内外学者对低压电力线载波通信系统进行了一系列研究。针对电力系统噪声的研究主要聚焦于噪声的统计特性和噪声的抑制方法。如文献[8-9]使用支持向量机和循环平稳理论进行电力线噪声建模。文献[10]利用窄带电力线噪声循环平稳特性和多个接收相位之间的空间相关性设计噪声抑制技术,该技术可以最小化频域信号的均方误差估计。文献[11-13]根据数学理论提出了脉冲噪声的相应抑制算法。文献[14]通过主成份分析改进符号同步检测性能,并提出适用于软判决的自适应子载波比特映射方法从而改善通信系统的传输性能。文献[15]评估了三种宽带电力线物理层标准性能,通过计算机模拟每种标准的误码率上限。针对电力线信道传输特性的研究主要聚焦于分析信道传输特性的影响因素上。如文献[16-19]使用传输线理论分析不同网络拓扑结构(例如干路长度、支路个数等)对电力线信道传输特性的影响。文献[20]对各类电器负载不同工作状态下的阻抗进行测量分析,结果表明电器负载的时变特性是信道传输的关键因素。文献[21]分析了阻抗失配和多径效应对信道特性的影响。

之前的研究将系统性能下降与信道的频率选择性紧密联系在一起,但是有关信道频率选择性衰减和噪声干扰对电力线载波通信系统性能的相对影响的研究还不够具体。并且,正交频分复用(OFDM)技术的广泛应用使得信道频率选择性衰减和平坦衰减对系统性能的影响并不一致。所以,本文重点分析电力线信道频率选择性衰减、平坦衰减及其和信道噪声对通信系统性能的相对影响。为排除电力线信道中其他因素干扰,本文设计滤波器模拟信道频率选择性,并采用米德尔顿 A 类噪声模型模拟低压电力线噪声。发送接收参数取自马克西姆公司开发的窄带电力线通信标准: G3 标准(G3-PLC),其中包括前向纠错系统(FEC)和各种调制技术。

## 1 低压电力线载波通信系统模型

电力线载波通信系统模型如图 1 所示。信源是随机生成的二进制数据流,经前向纠错及 OFDM 调制输送到电力线信道。信息在信道传输过程中会有噪声干扰和信道衰减。接收端信号如式(1)所示。

$$r(t) = s(t) * h(t) + \omega(t) + i(t) \quad (1)$$

式中:  $s(t)$ 、 $r(t)$  分别为发送端和接收端信号;  $h(t)$  为信道的传输函数;  $\omega(t)$ 、 $i(t)$  分别为背景噪声和脉冲噪声。

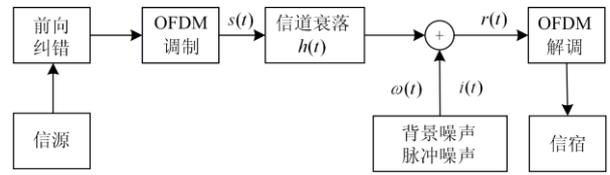


图 1 电力线载波通信系统模型

Fig. 1 Power line carrier communication system model

OFDM 技术具有频谱利用率高、纠错能力强和易于实现等优点,因而被广泛用于传输环境恶劣的电力线载波通信系统中。当使用电力线传输信号时,主要考虑以下四种影响因素:(1)背景噪声;(2)脉冲噪声;(3)平坦衰减;(4)频率选择性衰减<sup>[21]</sup>。

## 2 电力线噪声模型

### 2.1 背景噪声

低压电力线信道存在多种噪声源,为表征背景噪声,文献[22]分别在宽带和窄带环境中进行测量,结果表明低压电力线中存在的背景噪声可以看作是由高斯噪声通过滤波器形成的具有离散高斯分布特性的噪声。模型可由式(2)表示。

$$h_{\text{mod}}(\omega) = \frac{1 + \sum_{i=1}^m b_i e^{-j\omega i}}{1 + \sum_{i=1}^m a_i e^{-j\omega i}} \quad (2)$$

背景噪声的功率谱密度可以表示为

$$N(f) = 10^{K-3.95 \cdot f \cdot 10^{-5}} \quad (3)$$

式中,  $K$  表示均值为 5.64、方差为 0.5 的正态分布。

### 2.2 脉冲噪声

米德尔顿 A 类噪声是以提出者米德尔顿命名的噪声模型,其概率密度函数(Probability Density Function, PDF)简单,并且一阶统计量被广泛用于模拟低压电力线脉冲噪声。米德尔顿 A 类函数是一种特殊的高斯混合模型(GMM)。高斯混合模型是由均值为零、但方差不同的几个高斯分布相加而得。

$$p(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \pi_k \cdot G(x; 0, \gamma_k) \quad (4)$$

$$\pi_k = e^{-A} \frac{A^K}{K!} \quad (5)$$

$$\gamma_k = \sigma^2 \frac{\frac{K}{1+\Omega} + \Omega}{1+\Omega} = \sigma_i^2 \frac{K}{A} + \sigma_g^2 \quad (6)$$

式中:  $\sigma^2$  表示噪声的方差;  $G(x; 0, \gamma_k)$  表示随机变量  $x$  的高斯混合函数;  $\sigma_i^2$  和  $\sigma_g^2$  分别表示脉冲噪声和背景噪声方差;  $\Omega$  为脉冲噪声与背景噪声的功率

比;  $A$  为脉冲指数。将式(5)、式(6)代入式(4)中, 可得米德尔顿 A 类噪声函数为

$$p(x) = \sum_{K=0}^N \frac{e^{-A} A^K}{K!} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|x|^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

由文献[8]可知, 当  $\Omega$  固定时,  $A$  值越大, 米德尔顿 A 类噪声越接近于高斯分布的背景噪声; 随着  $A$  值变小, 噪声越趋近于脉冲噪声。本文模拟了两种脉冲强度不同的噪声, 图 2(a)为弱脉冲噪声, 图 2(b)为强脉冲噪声。

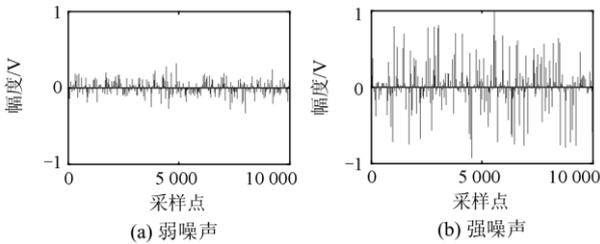


图 2 电力线噪声  
Fig. 2 Power line noise

### 3 电力线信道模型

为了更好地理解频率选择性产生的原因, 以开路截断线路为例, 如图 3(a)所示。首先在 A 端和 C 端设置与发射端和接收端相匹配的阻抗, 避免输入输出端出现阻抗不连续问题。D 是线路中并联负载总和; B 是 T 型连接点;  $l_x$  表示线路长度,  $Z_x$  表示线路中的特性阻抗; 阻抗不连续处的传播系数和反射

系数由  $t_{xy}$  和  $r_{xy}$  表示, 文献[23]推导了不连续阻抗和特性阻抗之间的关系。当 A、B 两点出现阻抗  $Z_a$  和  $Z_b$  不连续问题时, 反射系数和传播系数可由式(8)、式(9)计算得到。

$$r_{ab} = \frac{Z_b - Z_a}{Z_b + Z_a} \quad (8)$$

$$t_{ab} = 1 + r_{ab} \quad (9)$$

对于图 3(a)中的情况,  $r_{1B}$  可由式(10)计算得出。

$$r_{1B} = \frac{Z_2 // Z_3 - Z_1}{Z_2 // Z_3 + Z_1} \quad (10)$$

式中,  $Z_2 // Z_3$  表示  $Z_2$  和  $Z_3$  并联时的阻抗。

图 3(a)展示了信号传播的三种情况:

信号从 A 出发经过 B 到达 C。

信号从 A 出发经过 B 到达 D, 反射到 B, 最后到达 C。

信号从 A 出发, 在 B、D 之间反射多次, 最后到达 C。

信号在 B、D 之间可以反射多次, 所以考虑将反射系数和传播系数作为滤波器的增益, 使用滤波器组来模拟电力线网络。不过需要注意的是, 这种情况下要将电力线考虑为理想传输线, 即时延只与长度有关。这样图 3(a)中简单的截断线路就可以用图 3(b)中的滤波器原件表示, 其中矩形表示时延, 三角形表示滤波器系数。

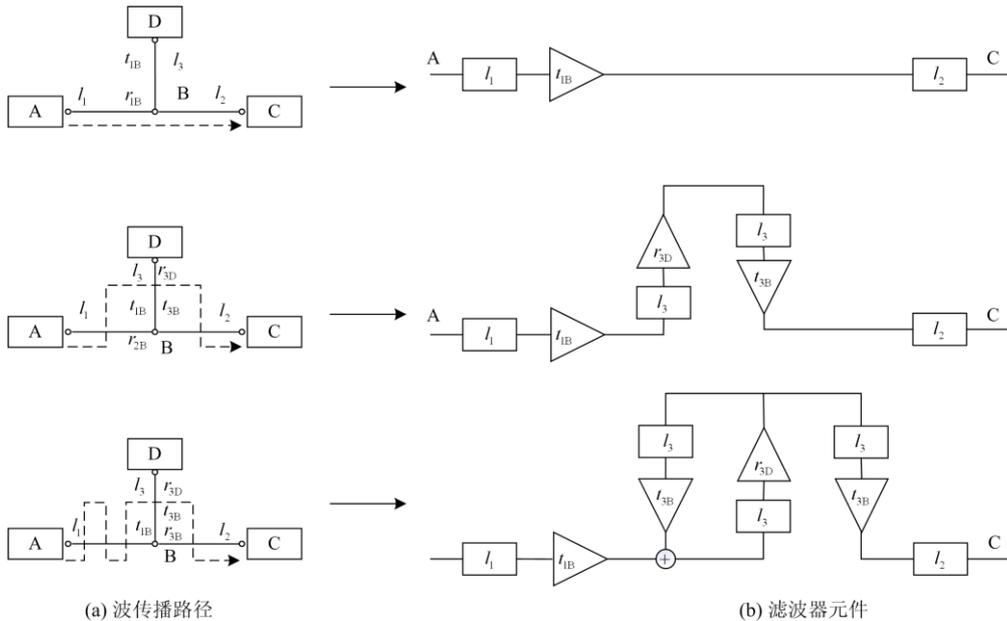


图 3 信号传播路径

Fig. 3 Signal propagation path

图 4 是更加具体的滤波器表达形式。在离散时间情况下, 时间间隔与系统采样频率有关, 即  $f_s = 1/T_s$ 。所以单位长度的电力线时延可以表示为

$$N_{\text{delay},x} = \frac{\text{delay}_x}{T_s} = \frac{l_x}{T_s \cdot v_x} \quad (11)$$

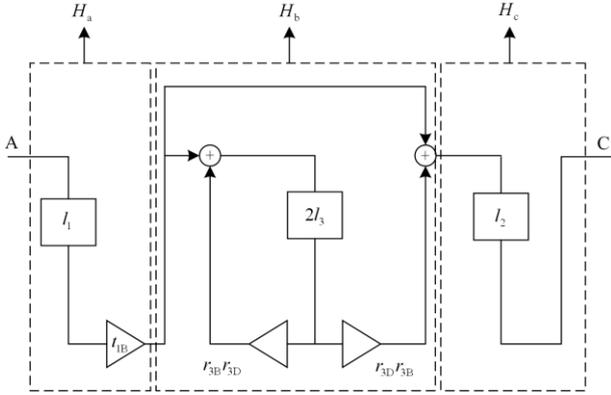


图 4 滤波器示例

Fig. 4 Filter representation

电力线的长度和波速分别用式中的  $l_x$  和  $v_x$  表示。在时延确定的情况下可以根据 Z 变换求出相应的滤波器表达式:  $z^{-\text{Round}\{l_x/T_s \cdot v_x\}}$ 。Round{ }表示四舍五入。图 4 中子滤波器的 Z 变换分别用  $H_a$ 、 $H_b$  和  $H_c$  表示。

$$H_a = t_{1B} \cdot z^{-l_1} \quad (12)$$

$$H_b = 1 + \frac{t_{3B} \cdot r_{3D} \cdot z^{-2l_3}}{1 - t_{3B} \cdot r_{3D} \cdot z^{-2l_3}} \quad (13)$$

$$H_c = z^{-l_2} \quad (14)$$

整体 Z 变换通过图 4 中三个子滤波器级联得到  $H = H_a \cdot H_b \cdot H_c =$

$$t_{1B} \cdot z^{-l_1} \cdot \left(1 + \frac{t_{3B} \cdot r_{3D} \cdot z^{-l_3}}{1 - t_{3B} \cdot r_{3D} \cdot z^{-l_3}}\right) \cdot z^{-l_2} = \frac{t_{1B} \cdot z^{-(l_1+l_2)}}{1 - t_{3B} \cdot r_{3D} \cdot z^{-l_3}} + \frac{(t_{3B} - r_{3B}) \cdot r_{3D} \cdot t_{1B} \cdot z^{-(l_1+l_2+l_3)}}{1 - t_{3B} \cdot r_{3D} \cdot z^{-l_3}} \quad (15)$$

式(15)说明了多径效应的产生过程以及随之而来的信道频率选择性衰落。最终计算所得  $H$  为从输入 A 到输出 B 的滤波器。本文选择使用滤波器模拟电力线的频率选择性衰减和平坦衰减。首先仿真生成一条平坦衰减信道, 另外模拟三种具有不同频率选择性的信道。确保信道衰减幅度相同的情况下, 仅改变信道的频率选择性。图 5 为 4 种仿真信道的幅频响应。

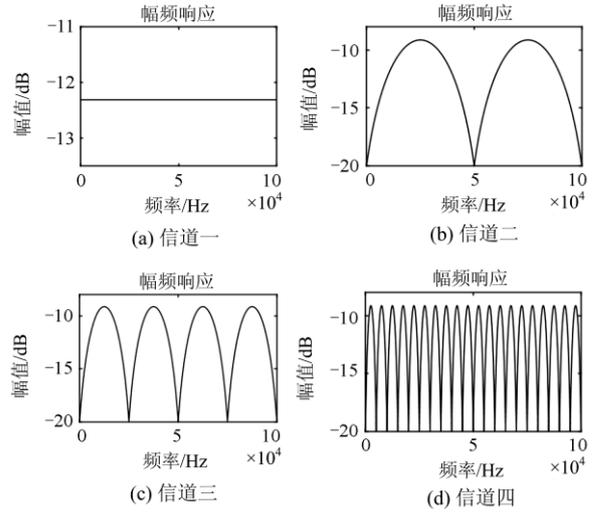


图 5 信道传输特性

Fig. 5 Channel transmission characteristic

#### 4 基于OFDM的G3-PLC通信标准

G3-PLC 标准在使用 OFDM 技术的同时提供了多种调制方式<sup>[24]</sup>, 并且其频率范围与国内几种主流芯片相同。因此, 在 Matlab 平台模拟电力线载波通信系统时, 使用 G3-PLC 标准参数可以更全面地分析信道频率选择性和信道噪声对通信系统性能的相对影响, 具体参数如表 1 所示。

表 1 G3-PLC 标准参数

Table 1 G3-PLC standard parameters

参数	参数值
FFT/IFFT 数	256
子载波间隔	1.565 2 kHz
子载波个数	36
抽样速率(带宽)	400 kHz
循环前缀个数	30
FFT/IFFT 周期	640 μs(256 chip)
循环前缀周期	75 μs(30 chip)
OFDM 符号间隔	715 μs(286 chip)
调制方式	BPSK/DBPSK/DQPSK/D8PSK

G3-PLC 标准规定: 将经过扰码的信息流, 输入由 RS 编码、卷积编码、重复编码以及交织器组成的前向纠错系统, 再根据通信环境选择是否使用鲁棒模式。系统对每 256 个采样点进行快速逆傅里叶变换(IFFT)后加上 30 个循环前缀, 形成一个完整的 OFDM 信号。将所得 OFDM 信号使用 400 kHz 采样频率通过模拟前端上变频后发送到电力线进行传输。图 6 是 G3-PLC 标准的物理层框图。子载波频率间隔为

$$\Delta f = \frac{400 \text{ kHz}}{256} = 1562.5 \text{ Hz} \quad (16)$$

其中, 每个 OFDM 信号有 36 个可用子载波用来传输信息; 第一个可用子载波被映射到 IFFT 的

第 23 号(35.938 kHz), 最后一个可用子载波被映射到 IFFT 第 58 号(90.625 kHz)。图 7 为发送端信号功率谱密度。

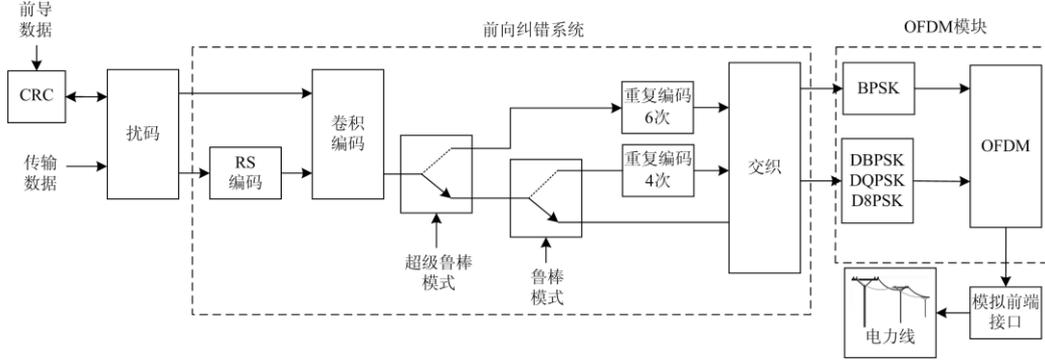


图 6 G3-PLC 标准物理层结构

Fig. 6 Physical layer model of G3-PLC network

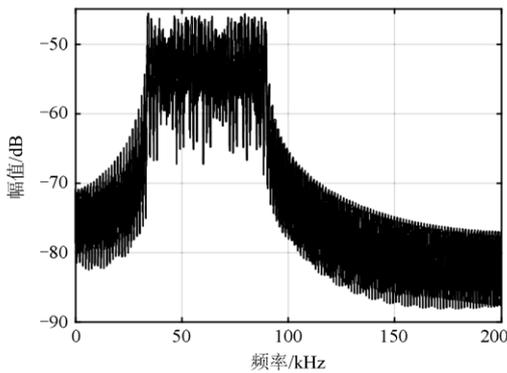


图 7 G3-PLC 信号功率谱密度

Fig. 7 Power spectral density of G3-PLC signal

## 5 仿真和结果

由第 2 节可知, 通过改变米德尔顿 A 类噪声函数的脉冲指数  $A$  和功率比  $\Omega$ , 可以生成脉冲强度不同的噪声。本文在仿真中使用的噪声模型参数为:  $\sigma_g^2 = 0.01$ ,  $\sigma_i^2 = 4$ ; 图 2(a)、图 2(b)中  $A$  分别为 0.01 和 0.1。图 8 中, 左侧为弱脉冲噪声下仿真结果, 右侧为强脉冲噪声下仿真结果。信道一至信道四对应图 5 中的四种信道模型。

首先, 从整体来看不同进制的调制方式对系统传输性能的影响差别较大; 以图 8(a)、(b)、(c)为例, 当系统使用 DBPSK 调制时, 其性能明显优于 DQPSK 和 D8PSK。其次, 信道一对应的平坦衰落信道对系统传输性能干扰最小, 信道四对应的严重频率选择性衰落信道对系统传输性能干扰最大。不过对于频率选择性衰落不严重的信道(信道二、三)

所得误码率结果差别不大。再者, 当系统选择 DBPSK 调制且误码率达到  $10^{-2}$  级别时, 信道二、三比信道四所需信噪比少 1.5 dB; 使用 DQPSK 和 D8PSK 调制时则分别少 2 dB 和 8 dB。随着脉冲噪声强度增强(右侧图), 同种调制方式下, 不同频率选择性信道之间的信噪比差异没有改变, 但是系统的整体性能下降较明显(约 8 dB)。这说明在窄带电力线通信系统中, 噪声比信道频率选择性衰落对系统性能的影响更大。

值得注意的是, 信道三相比于信道二的频率选择性衰落更为严重, 但是信道三对应的系统性能却优于信道二。为了分析其中的原因, 将信号的功率谱密度和信道的频率选择性衰落联系在一起, 如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 通信系统性能的优劣需要考虑每个子载波所在位置的信道衰减程度; 尽管信道二和信道三的频率选择性衰落程度不同, 但是通过比较可用子载波在两种信道中对应的衰减大小, 可以发现二者数值相差不大, 这解释了信道二和信道三对系统性能影响几乎相同的现象。但是相比于信道三, 信道二中衰减相对严重的子载波个数更多。尽管信道二和信道三中衰减大于  $-16 \text{ dB}$  的子载波个数都为 5 个, 但是信道二中衰减大于  $-18 \text{ dB}$  的子载波为 3 个, 而信道三为 2 个。所以从误码率结果来看, 信道三的结果要略好于信道二。然而当使用宽带电力线通信标准时, 因为子载波间隔较大, 信道频率选择性衰落对电力线通信系统性能的影响被放大, 所以在分析宽带电力线通信影响因素时需要特别注意信道频率选择性衰落带宽和子载波间隔大小的关系。

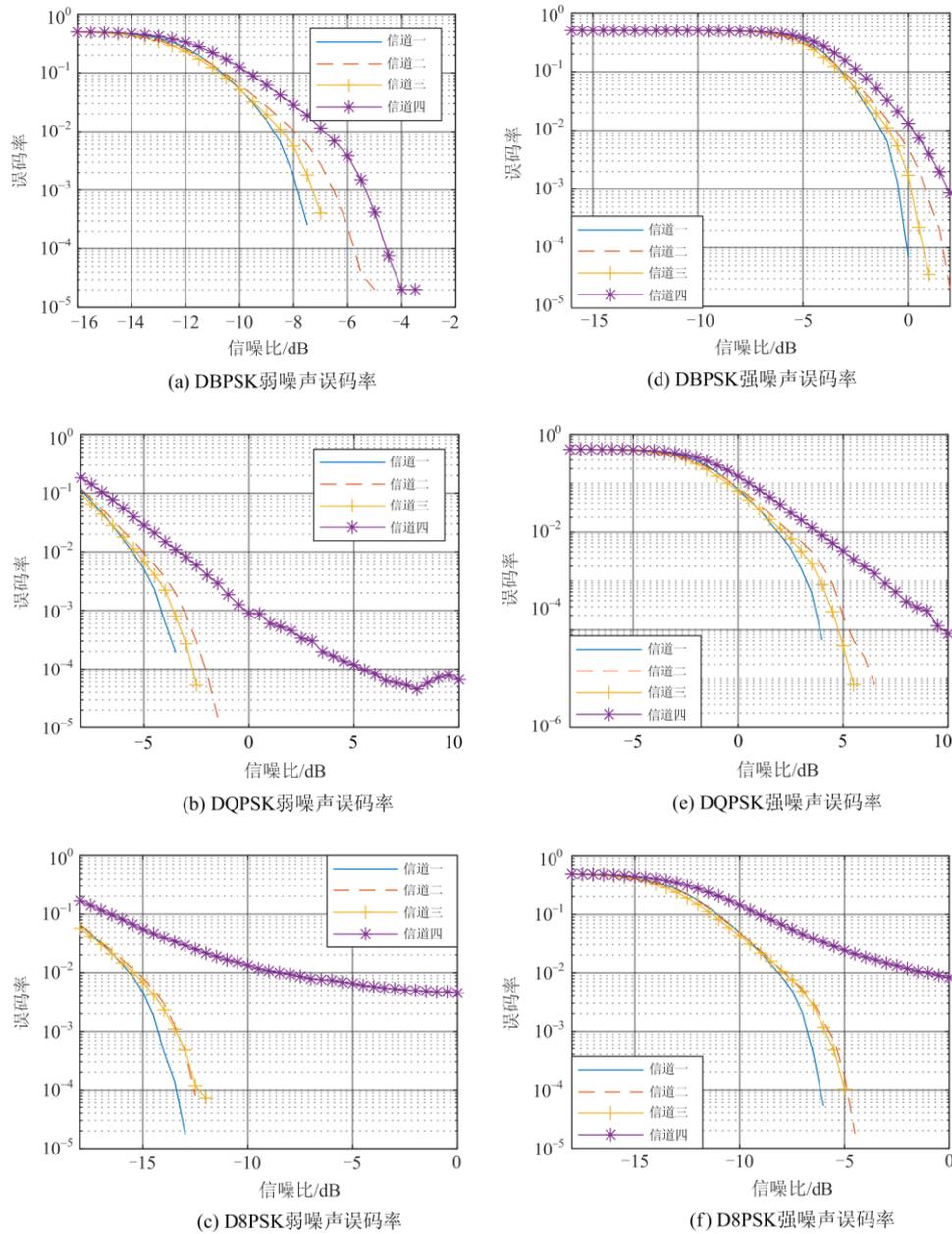


图 8 信道不同强度频率选择性衰落的仿真结果

Fig. 8 Simulation results with different frequency selective fading

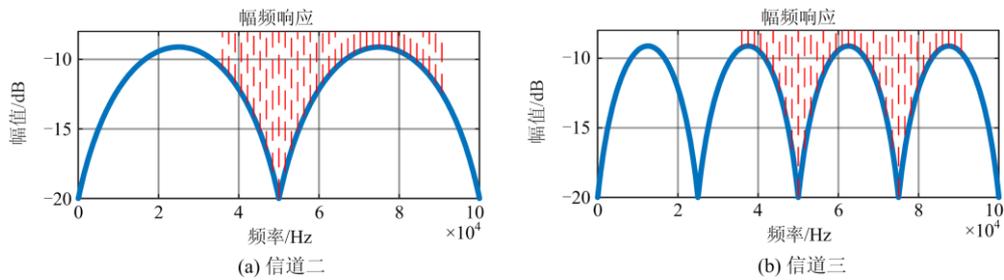


图 9 信道传输特性和子载波位置

Fig. 9 Channel transmission characteristics and subcarrier positions

最后, 在 4 种信道中仿真了 G3-PLC 规定的鲁棒模式。鲁棒模式使用 4 倍重复编码技术和 BPSK 调制方式, 仿真结果如图 10 所示。

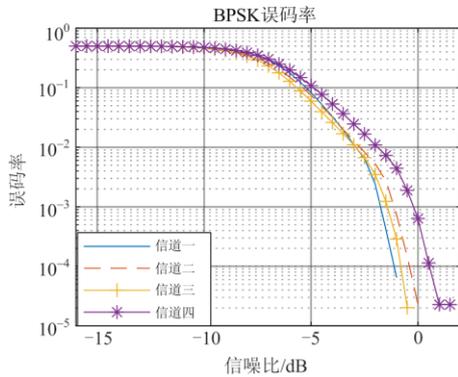


图 10 BPSK 仿真结果

Fig. 10 BPSK simulation results

从结果来看, 无论是对噪声的抑制作用, 还是对抗信道频率选择性的能力, BPSK 都要优于三种差分调制。这是因为在使用差分调制时, 噪声或信道衰落在干扰当前位置信号的同时也会影响到相邻信号, 从而降低系统的传输质量。当系统使用相干调制时虽然不会出现上述问题, 但是会明显降低数据的传输速率。因为相干调制中每 12 个可用子载波中有一个是导频子载波, 并且在使用鲁棒模式时, 4 倍重复编码技术使得数据速率降低 75%。表 2 为 4 种调制方式下的数据传输速率。

表 2 数据传输速率

Table 2 Data transmission rate

调制方式	速率/(kbp/s)
BPSK	3.2
DBPSK	14.8
DQPSK	32
D8PSK	N/A

## 6 结论

本文基于 G3-PLC 标准建立了低压电力线载波通信系统模型, 为系统地研究信道频率选择性对通信性能的影响, 使用滤波器模拟不同的信道频率选择性和平坦衰减特性; 使用米德尔顿 A 类噪声模拟电力线信道噪声。根据系统仿真结果, 得到以下三点结论: (1) 在窄带电力线通信系统中, 相比于信道的频率选择性, 脉冲噪声强度的影响更大。因此, 信道的频率选择性不是窄带系统优化时最重要的考量因素。(2) 从整体来看, 随着信道频率选择性衰落程度的增加, 系统通信性能逐渐变差, 但是当频率选择性衰落不严重时, 系统的传输性能并非一定变

差, 需要同时考虑子载波位置和频率选择性信道的带宽。(3) 在差分调制中, DBPSK 性能最佳, D8PSK 性能最差, 二进制调制性能优于三种差分调制。G3 标准的鲁棒模式在提升系统通信性能的同时, 降低了通信系统的传输速率。

本文在得到上述结论的同时, 为之后的电力线载波通信研究提供了以下几条技术优化方向: (1) 电力线通信中脉冲噪声的抑制方法研究。(2) 差分调制中载波间和符号间的性能优化。(3) OFDM 技术中符号长度、子载波数量以及子载波频率间隔的配置优化。

## 参考文献

- [1] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.  
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [2] 王学良, 李蕊, 姜慧竹, 等. 智能电网电力线宽带载波通信测试系统关键技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(5): 82-88.  
WANG Xueliang, LI Rui, XIAN Huizhu, et al. Research on key technologies of power line broadband carrier communication test system in smart grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(5): 82-88.
- [3] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.  
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.
- [4] 史建超, 谢志远, 胡正伟, 等. 多跳中继宽带电力线通信网络中的 OFDM 跨层资源分配[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 58-66.  
SHI Jianchao, XIE Zhiyuan, HU Zhengwei, et al. OFDM cross layer resource allocation in multi-relay broadband power line communication networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 58-66.
- [5] 王艳, 王阳, 赵洪山, 等. 中压配电网电力线载波通信信道建模[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 50-57.  
WANG Yan, WANG Yang, ZHAO Hongshan, et al. Channel modeling of power line communication in a medium voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 50-57.
- [6] MATHUR A, BHATNAGAR M R, PANIGRAHI B K. Performance evaluation of PLC under the combined effect of background and impulsive noises[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(7): 1117-1120.
- [7] 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, 40(13): 61-66.

- GUO Haokun, WU Junji, HENG Sikun, et al. Modeling and simulation of low-voltage power line communication channel noise[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 61-66.
- [8] 张慧, 卢文冰, 赵雄文, 等. 基于最小二乘支持向量机和小波神经网络的电力线通信信道噪声建模研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 223-232.
- ZHANG Hui, LU Wenbing, ZHAO Xiongwen, et al. Research on power line communication channel noise modeling based on least square support vector machine and wavelet neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 223-232.
- [9] 李天昊, 赵明. 智能电网电力线通信系统信道噪声模型分析[J]. 电源学报, 2019, 17(1): 165-170.
- LI Tianhao, ZHAO Ming. Analysis of channel noise model of smart grid power line communication system[J]. Journal of Power Sources, 2019, 17(1): 165-170.
- [10] ELGENEDY M, SAYED M, AL-DHAHIR N, et al. Cyclostationary noise mitigation for SIMO powerline communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 5460-5484.
- [11] 杨挺, 刘佳林, 张亚健, 等. 电力线载波通信时频混合降噪方法[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3153-3160.
- YANG Ting, LIU Jialin, ZHANG Yajian, et al. Hybrid time-frequency noise reduction method for power line carrier communication[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3153-3160.
- [12] 翟明岳, 苏岭东. 基于 EMD-TFPP 算法的电力线通信噪声消除技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 51-56.
- ZHAI Mingyue, SU Lingdong. A noise mitigation method based on EMD-TFPP in powerline communication system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 51-56.
- [13] ANDREADOU N, FULLI G. NB-PLC channel: estimation of periodic impulsive noise parameters and mitigation techniques[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 103: 146-158.
- [14] 谷志茹, 黄晓峰, 王奇. 面向 AMI 的电力线通信理论与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [15] CHUNG Y M. Performance comparisons of broadband power line communication technologies[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9).
- [16] 卢文冰, 张慧, 赵雄文, 等. 网络参数对低压宽带电力线信道的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 221-229.
- LU Wenbing, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen, et al. Influence of network parameters on low voltage wideband power line channel[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 221-229.
- [17] 孙晓达, 翟明岳, 李丹, 等. 低压电力线窄带载波通信信道的衰减测量及分析[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(2): 28-33.
- SUN Xiaoda, ZHAI Mingyue, LI Dan, et al. Attenuation measurement and analysis of low voltage power line narrowband carrier communication channel[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2014, 12(2): 28-33.
- [18] 王勇, 张明, 马洲俊. 电力线信道通信特性影响因素分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 157-164, 173.
- WANG Yong, ZHANG Ming, MA Zhoujun. Analysis of influence factors of power line channel communication characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 157-164, 173.
- [19] 刘玉新, 李天昊, 孙梦娜. 低压宽带电力线通信系统建模仿真分析[J]. 测控技术, 2021, 40(9): 83-89.
- LIU Yuxin, LI Tianhao, SUN Mengna. Modeling and simulation analysis of low-voltage broadband power line communication system[J]. Measurement and Control Technology, 2021, 40(9): 83-89.
- [20] 王毅, 贾睿, 梁星, 等. 电器对低压电力线载波通信信道特性的影响[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(3): 411-418.
- WANG Yi, JIA Rui, LIANG Xing, et al. Influence of electrical appliances on channel characteristics of low-voltage power line carrier communication[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(3): 411-418.
- [21] 李松浓, 胡晓锐, 郑可. 低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 99-106.
- LI Songnong, HU Xiaorui, ZHENG Ke. Measurement and analysis of low voltage power line carrier communication channel attenuation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 99-106.
- [22] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(1): 249-258.
- [23] BERGER L T, SCHWAGER A, PAGANI P, et al. MIMO power line communications: narrow and broadband standards, EMC, and advanced processing[M]. CRC Press, 2014.
- [24] LLANO A, ANGULO I, VEGA D, et al. Virtual PLC lab enabled physical layer improvement proposals for PRIME and G3-PLC standards[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5).

收稿日期: 2021-08-11; 修回日期: 2021-12-25

作者简介:

张文远(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力线载波通信技术; E-mail: 2653292641@qq.com

李天昊(1973—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为人工听觉建模优化与智能电网信息技术。E-mail: 319595856@qq.com

(编辑 魏小丽)