

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.05.017

# 一种低压电力线载波通信主动抗干扰技术

景皓<sup>1</sup> 张智远<sup>2</sup> 庞先海<sup>1</sup> 孙中记<sup>1</sup> 李晓峰<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄, 050021;

2. 国网河北省电力有限公司, 石家庄, 050021)

**摘要:**针对低压电力线通信由于环境复杂、用户类型繁多、用电时间随机等因素导致干扰,严重时造成通信失败的情况,研究了低压电力线路负载和干扰的性质与规律,建立了信道噪声模型,提出了一种低压电力线载波通信主动抗干扰技术。该技术将收发控制器的阻抗与低压电力通信线路阻抗进行最大限度匹配;对扩频技术进行拓宽研究,进一步提出在扩展频谱的基础上主动选择高可靠性的频段通信的方法,以克服低压电力线的强衰减、强干扰的缺陷。最后本文搭建了实验环境,并对低压电力线存在白色噪声、周期性噪声、脉冲噪声等干扰情况进行了通信实验,结果表明本文方法可行。

**关键词:**电力线载波;抗干扰;扩频通信;智能转换

中图分类号:TN929

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)05-0701-08

## Active Anti-jamming Technique for Low Voltage Power Line Carrier Communication

JING Hao<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyuan<sup>2</sup>, PANG Xianhai<sup>1</sup>, SUN Zhongji<sup>1</sup>, LI Xiaofeng<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang, 050021, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Shijiazhuang, 050021, China)

**Abstract:** Because of the complicated environment, various types of users, random time of power consumption and so on, the low-voltage power line communication has interference, which causes communication failure seriously. In this paper, the characteristics and laws of load and interference in low voltage power lines are studied. A channel noise model is established, and an intelligent active anti-interference technique for low voltage power line carrier communication is proposed. This technique matches the impedance of the transceiver controller with the impedance of the low voltage power communication line to a maximum, and broadens the spread spectrum technology. We further propose a method of actively selecting a high reliability band to communicate on the basis of spread spectrum, so as to overcome the strong attenuation and strong interference defects of low voltage power line. The experimental environment is set up, and the communication experiments are carried out for low voltage power lines, such as white noise, periodic noise and impulsive noise. The results show that the method is feasible.

**Key words:** power line carrier; anti-jamming; spread spectrum communication; intelligent conversion

电网是最大、最普及、最可靠的供电载体,以低电压电力线路实现数据传输,具有利用现有资源、减少投资的现实意义<sup>[1-3]</sup>。低压电力线通信<sup>[4]</sup>(Low-voltage power line communication, L-PLC)是指

基金项目:河北电力计划(kj2018-063;kj2014-003;kj2015-03)资助项目。

收稿日期:2018-03-14;修订日期:2018-05-10

通信作者:景皓,女,高级工程师,E-mail:14106498@qq.com。

引用格式:景皓,张智远,庞先海,等.一种低压电力线载波通信主动抗干扰技术[J].南京航空航天大学学报,2018,50(5):701-708. JING Hao, ZHANG Zhiyuan, PANG Xianhai, et al. Active anti-jamming technique for low voltage power line carrier communication[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(5): 701-708.

利用低压配电网(380 V/220 V)中的电力线路作为信号传输的媒介,把调制好的信号叠加在电力电流中,通过电力线来完成传送<sup>[5]</sup>。近年来,在数字通信领域正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)一直是成熟度很高的通信技术<sup>[6-10]</sup>,其通信原理简单地就是将通信信道分解成许多个正交的子信道,将大量高速的数据信息转换成若干个平行的速度相对低的数据信息流,再经过调制然后在各个子信道上实现传输,OFDM在电力部门自动抄表、用户用电信息数据采集以及智能家居等已广泛应用<sup>[1]</sup>。但是由于低压电力线路供需环境复杂、用户类型繁多、用电时间随机等因素,可能导致通信信道中存在干扰,情况严重时会造成通信失败<sup>[11-12]</sup>,所以,干扰一直是制约电力线通信发展的瓶颈之一。因此,许多学者从低压电力线路干扰产生的源头和抗干扰的方法进行大量的研究工作,一般主要体现在信道识别与分析<sup>[13-15]</sup>、扩频通信<sup>[16-17]</sup>以及提高通信网络强壮性<sup>[18-19]</sup>等方面。尽管如此,针对中国特殊的低压电网环境下实现抗干扰性能强的高质量数据通信系统的研究工作、通信设备的使用以及通信系统的推广应用的报道仍然很少。在借鉴前人抗干扰技术的基础上<sup>[20-22]</sup>,本文从智能小区、智能台区户表数据核对等需求出发提出了一种L-PLC主动抗干扰方法,研究内容包括:(1)将收发控制器的阻抗与低压电力通信线路阻抗进行最大限度匹配;(2)研究低压电力线上负载和干扰性质与规律,建立噪声模型;(3)对扩频技术进行拓宽研究,进一步提出在扩展频谱的基础上主动选择高可靠性的频段通信的方法,以克服存在于低压电力线信息传输中的强衰减与强干扰等问题,从而提升L-PLC的通信能力。

## 1 低压电力线通信信道噪声特性

### 1.1 信道噪声特点

低压电力线路主要被用来实现电能的传输,它往往需要和多种负载进行连接。因此,低压电力线上通常存在着各种噪声干扰,如图1所示。把在短时间内不变化或者变化很小的噪声,认为是背景噪声;把功率谱高、作用时间短( $\mu\text{s}$ 和 $\text{ms}$ 级)的噪声称为脉冲噪声;还有突发性的随机噪声。脉冲噪声对信号传输影响极大,严重时会出现数据错误。

### 1.2 信道噪声建模

对于低压配电网通信信道来说,由于存在各种不确定因素,想要建立一个精确的模型比较困难<sup>[6-10]</sup>。但是,通过近似模型来表示其特征则相对容易也比较现实。首先,根据低压配电网通信的特点,背景噪声可近似看作高斯白噪声,其功率谱表

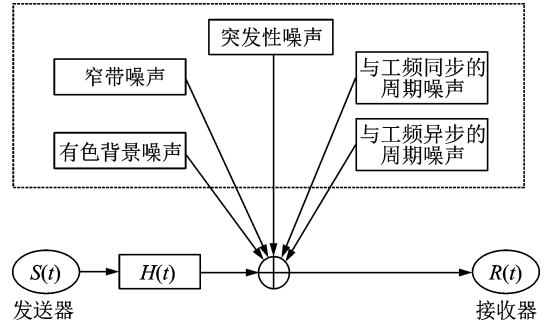


图1 低压电力线噪声分类

Fig.1 Noise classification of low voltage power lines

表达式为

$$P_n(f) = N_0/2 \quad (1)$$

其自相关函数 $R_n(\tau)$ 可表示为

$$R_n(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P_n(f) e^{j2\pi f\tau} df = \frac{N_0}{2} \delta(\tau) \quad (2)$$

式中: $\delta(\tau)$ 表示单位冲激函数。显然,当 $\tau \neq 0$ 时, $R_n(\tau) = 0$ ,即此刻高斯白噪声的自相关值为零。因此,可以用式(2)对低压电力线信道上的背景噪声进行模拟。

另一方面,低压电力线信道上的脉冲噪声可以用马尔可夫链进行模拟。马尔可夫过程是一种随机过程,假设当前状态确定,则过去对未来没有影响,若 $t_n > t_{n-1}$ ,则

$$P[X(t_n) \ll x_n | X(t), t \ll t_{n-1}] = P[X(t_n) \ll x_n | X(t_{n-1})] \quad (3)$$

若 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ ,则

$$P[X(t_n) \ll x_n | X(t_{n-1}), X(t_{n-2}), \dots, X(t_1)] = P[X(t_n) \ll x_n | X(t_{n-1})] \quad (4)$$

通过递推的方法就可得到一个简单的马尔可夫过程,表达式为

$$X_n = \rho X_{n-1} + \omega_n \quad (5)$$

式中: $\omega_n$ 表示一系列均值为0的白色随机变量, $\rho$ 为确立 $X_n$ 和 $X_{n-1}$ 间相关程度的参数。则有

$$E(X_n X_{n-1}) = \rho E(X_{n-1}^2) = \rho \sigma_{n-1}^2 \quad (6)$$

若 $\{\omega_n\}$ 为高斯型序列,则 $X(t)$ 即为一个高斯-马尔可夫过程。鉴于篇幅,读者可以参考文献[8-10]中的一些讨论。

## 2 扩展频谱通信与跳频扩频通信抗干扰原理分析

### 2.1 扩展频谱通信特性分析

直接扩展频率通信系统的工作原理如图2所示。直接扩频(Direct sequence spread spectrum, DSSS)即将待传送的信息用伪随机(Pseudo-noise code, PN)码扩展到更宽的频带,同时,在接收端用相同的PN码对接收到的信号进行解扩。由于

在此过程中干扰信号和 PN 码之间并无关联,从而导致在接收端被扩展并落入信号频带内的干扰信号的功率被大幅降低。通过这种方法,可以大大提高输出的信噪比,从而实现抗干扰的目的。

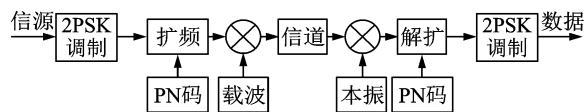


图 2 直接序列扩频系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of direct sequence spread spectrum system

图 3 形象地表征了信息流  $\{a(n)\}$  扩展成为复合信号  $d(t)c(t)$  的过程,说明了传输信号带宽扩展的原理。

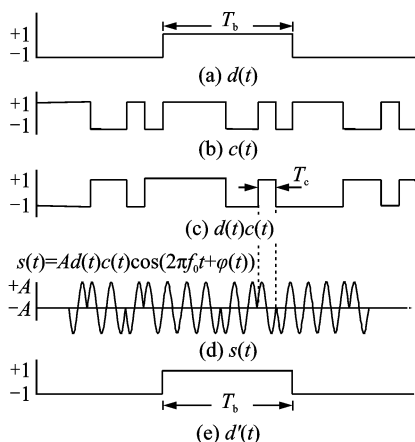


图 3 扩展频谱系统波形示意图

Fig. 3 Waveform of spread spectrum system

通常,PN 码的速率  $R_c = 1/T_c$  较高,可达到几百 Mb/s。而相比之下,信息流  $\{a(n)\}$  编码速率  $R_b = 1/T_b$  较低,有的低至几 Kb/s。这样就实现了传输信号带宽的扩展。在频谱扩展完成后,利用复合信号  $d(t)c(t)$  对载波  $\cos(2\pi f_0 t)$  进行调制,再由发送机和耦合器发送到信道中进行传送。

在此过程中,发送机输出的扩频信号可以由  $s(t)$  表示,如图 3(d) 中所示。其中,  $s(t)$  的带宽由 PN 码  $c(t)$  的码速率  $R_c$  决定。在 PSK 码的调制下,调频信号的带宽为 PN 码速率的 2 倍,也就是  $R_{RF} = 2R_c$ ,而它和数字信号  $d(t)$  的码速率并无关联。通过上述处理过程,实现了对  $d(t)$  频谱进行扩展的目的。在接收端,通过与发送端同步的参考伪 PN 码  $c_r^*(t - \hat{T}_d)$  调制出振荡信号  $2\cos(2\pi(f_0 + f_{IF} + \hat{f}_d)t + \hat{\varphi})$ ,将其与  $s(t)$  进行相关运算。

当两个信号相同时,相关峰值最大,可以由数据检测器恢复出发送信号  $d'(t)$ 。但是信道中存在单频、窄带、多径以及码分多址等干扰信号。假设传输过程中,有用信号、码分多址信号、多径干扰信

号和噪声的功率相同,如图 4(a) 所示。解扩之后的信号功率谱如图 4(b) 所示,各分量面积保持不变。但是,有用信号频带变窄,幅值变大,可以通过滤波器解扩出来。而其余信号被过滤掉,从而实现了抗干扰的能力。

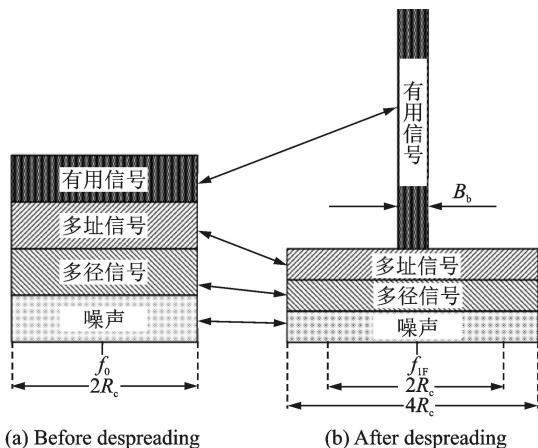


图 4 解扩前后信号功率谱密度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of signal power spectrum density before and after despreading

综合起来看,低压电力线载波通信过程中应用 DSSS 技术在很大程度上保证了数据传输的可靠性。换句话说,传输过程中的各种噪声被有效抑制,有用信号都可准确地被传输至目的地。

### 2.2 跳频扩频抗干扰技术

跳频扩频通信 (Frequency-hopping spread spectrum, FHSS) 是扩频通信方式中的一种,也被简称为跳频通信。FHSS 用 PN 码序列随机控制通信控制器的输出频率,使发送信号的频率以 PN 码变化的方式跳变。

在发送端,频率合成器从预先设定的频率集内随机地选择跳变频率发送。在接收端,频率合成器也按与发送端相同的方式进行频率跳变,产生一个和接收信号频率只差一个中频频率的参考本振信号,经混频后得到一个频率固定的中频信号,这一过程称为对跳频信号的解跳。解跳后的中频信号经放大后送到解调器解调,恢复出传输的信息 (图 5)。

根据频率的跳变速度不同,可以把跳频过程分为频率慢跳变过程和频率快跳变过程。其中慢跳变过程可参见图 6。  $T_c$  表示码元的宽度,每经过  $T_b$  时间,输出一个频率,而每经过  $T_c$  时间,通信系统跳变为一个新的频率。当  $T_c > T_b$  时,此系统即为频率慢跳变系统。

具体到图 6 中,  $B_b = 2/T_b$ ,  $T_c = 3T_b$ ,  $B_{RF} = 8B_b$ 。频率合成器设置 8 个频率进行跳变,即  $\{f_1, f_6, f_7, f_3, f_8, f_2, f_4, f_5\}$ 。每当传送完 3 个比特

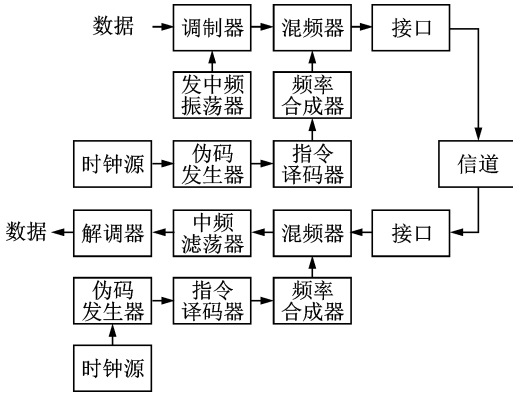


图5 频率跳变扩频通信系统

Fig. 5 Block diagram of frequency hopping spread spectrum communication system

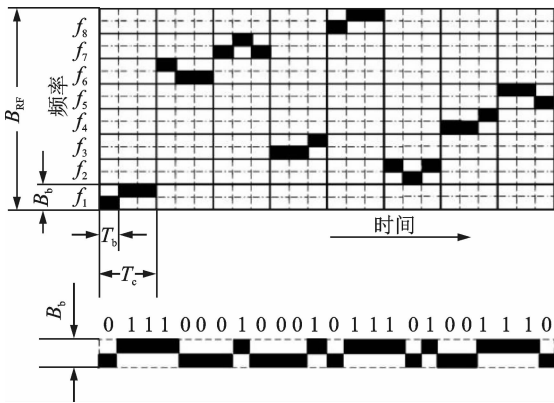


图6 频率慢跳变示意图

Fig. 6 Slow frequency hopping sketch map

后,该频率合成器即跳变为一个新的频率。由此产生的频率跳变信号还需在收信机中根据本地参考振荡信号完成下变频,因此本振频率也有8种,分别为 $\{f_1 + f_{1F}, f_6 + f_{1F}, f_7 + f_{1F}, f_3 + f_{1F}, f_8 + f_{1F}, f_2 + f_{1F}, f_4 + f_{1F}, f_5 + f_{1F}\}$ 。在下变频后,中频信号则集中于频率为 $f_{1F}$ 宽度为 $B_b$ 的频带中。

对于频率的跳变速度低于数据符号变化速度的情况,称之为频率慢跳变,如果每个数据符号的输出频率进行多次跳变,就把这种跳变方式称为快跳变。图7给出了频率快跳变示意图,其中, $T_c = T_b/3$ ,合成频率分别为 $\{f_5, f_{11}, f_7, f_{14}, f_{12}, f_8, f_1, f_2, f_4, f_9, f_3, f_6, f_{13}, f_{10}, f_{16}, f_{15}\}$ , $B_b = 2/T_b$ , $B_{RF} = 16B_b$ 。

显然跳频扩频通信并不总是在一个频段内传送数据,通信过程中遇到干扰严重的情况,可以立即跳变到其他干扰不严重甚至没有干扰的频段通信。因此,跳频扩频通信可以抗信道中的噪声干扰,是因为通信可以选择干扰小的频段传送信号。

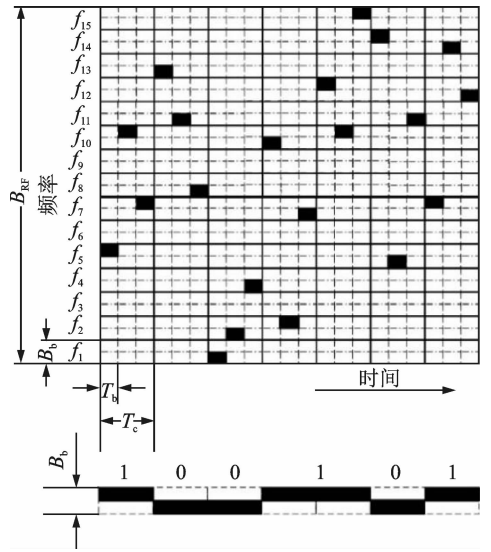


图7 频率快跳变示意图

Fig. 7 Fast frequency hopping sketch map

### 3 直序列展宽扩频与高可靠性频段主动选择抗干扰技术

通过前面的分析,直序列展宽扩频与频率跳变扩频都可以抗击通信中的干扰,本节将这两种扩频通信技术加以改进,再增加智能耦合接口,提出一种主动扩频载波通信技术,原理框图如图8所示。

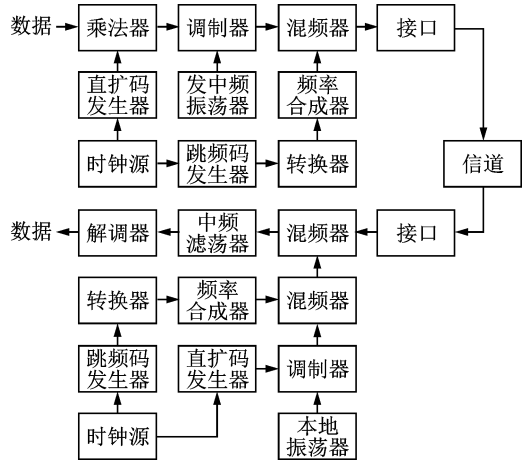


图8 主动扩频载波通信工作原理

Fig. 8 Schematic diagram of adaptive spread spectrum communication

#### 3.1 智能耦合接口

本文设计的智能耦合接口是一种调谐电路,如图9所示,主要由可调电感线圈LT和可调电容CT组成。该接口可自动识别载波信号频率并且能够主动控制可调电感线圈LT与可调电容CT的接入过程。通过改变LT与CT的不同组合方式,产生串联谐振。由于串联谐振中心阻抗较低,因此可以在不同电网中实现载波信号的转换,提升了传输效果。

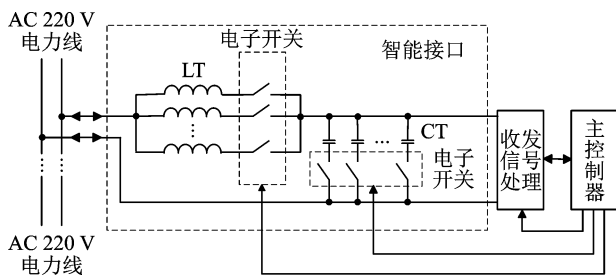


图 9 智能接口原理图

Fig. 9 Intelligent interface schematic

### 3.2 直接序列频谱展宽技术与多频段主动选择跳频技术相结合

图 8 中,直接序列频谱展宽技术与多频段主动选择跳频技术进行了结合,其工作原理是:在直扩展频的基础上,扩展增加多个通信频段,当误码率(Symbol error ratio, SER)较高时,通信控制器可以主动地跳变到某个较为可靠的频段进行数据传输。该方法与传统跳频技术的最大区别是频点并非定时改变,而是由通信控制器根据干扰特点和通信的可靠性主动选择最佳的跳变时间和跳变点。图 10 给出了该方法实现流程图。

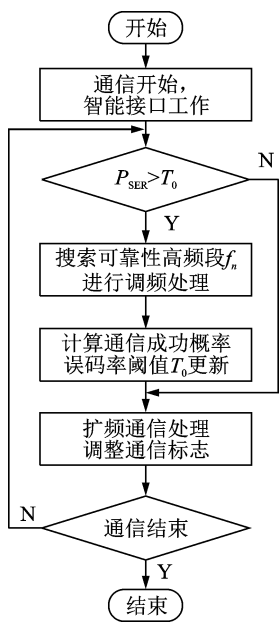


图 10 算法流程图

Fig. 10 Flow chart of algorithm

该方法实现步骤如下:

#### 第 0 步 初始化

- (1) 设定初始通信频率  $f_n = f_0$ ;
- (2) 设定误码率阈值  $T_0$ , 通信可靠性初值  $P_{max}$ ;
- (3) 设定各频段初始误码率  $P_{SER}(0)$  等参数。

**第 1 步** 通信开始,系统自动识别载波信号频率,并自动调节电感和电容接入值,使耦合接口电

路产生所需要的谐振,与通信信道保持阻抗匹配。

#### 第 2 步 判断当前通信频段可靠性与稳定性,

即判断收发数据误码率  $P_{SER}$

$P_{SER} > T_0$ , 转第 3 步,

$P_{SER} \leq T_0$ , 转第 4 步。

#### 第 3 步 通信频段选择

(1) 搜索误码率低可靠性高频段  $f_n$ , 即  $P(f_n) < P_{max}$ ;

(2) 进行调频处理,即通信频率切换;

(3) 前一频段通信可靠性处理,即求通信成功概率  $P(f_n)$ ;

(4) 误码率阈值  $T_0$  更新处理。

#### 第 4 步 扩频通信处理

(1) 扩频通信相关工作处理。

(2) 通信结束判断。是,转第 5 步。否,转第 2 步。

#### 第 5 步 通信结束。

该方法的一些说明:

#### (1) 信道误码率阈值设定

智能主动跳频技术需要从误码率高的频段跳到误码率相对较低的频段,那么在此需要对误码率的阈值进行选择。如果阈值过高则会影响通信质量,阈值过低则会导致无法同步。如果采取固定阈值,在不同噪声环境下对通信质量的影响较大,很难得到较好的通信质量。

#### (2) 信道误码率阈值更新

假设误码率阈值选择的范围为  $T_{min} \sim T_{max}$ , 低于此范围则通信难以完成,高于此范围则噪声过大。笔者在其中不均匀地选取  $r$  个阈值点。初始误码率阈值选择为  $T_0$ , 假设跳频后的误码率依旧高于阈值,则相应提高到下一个阈值,再次跳频,若仍高于阈值则再次提高;反之,若误码率远低于阈值,则相应降低阈值点,实现阈值的自适应更新。

#### (3) 频段选择过程

当检测到某个频段误码率较高时,需要用备用频段进行替换。当检测到某个适合频段后,通过反馈,在发送端和接收端将此频段替换为备用频段。当备选频率段消耗殆尽时,此时的通信环境与之前往往发生了变化,可以把之前认为不适合通信的频段再次替换出来使用,实现频段选择的自适应更新。

(4) 跳频过程可用图 11 表示。

## 4 实 验

为了验证本文方法的可行性,笔者进行了 3 种实验。选择实验楼线路,并以多台移动电脑与终端配合来进行通信实验。通信距离为 1 500 m 左右,

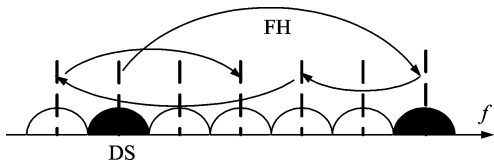


图 11 跳频示意图

Fig. 11 Schematic diagram of frequency hopping

实验环境电力线噪声功率可在  $-10 \sim -100$  dBm 调整。实验中载波频率选取 210 kHz, 扩频的带宽设定为 20 kHz。数据源信号是在  $(0, 1)$  这个区间中产生的随机数据, 卷积码的编码方式选取的是  $(2, 1, 2)$  卷积码。直扩伪码位数为 15 位, 选用 2PSK 调制方式, 初相位为 0。卷积码的译码方式选取维特比译码, 通过将译码后得到的信号与输入信号进行比较, 可以求得误码率。实验在不同时间段进行多次测试, 通过计算机设置测试频率为 100 Hz, 每帧 50 字节, 统计接收数据的正确率大于 99% 帧次数。

### (1) 抗白色噪声干扰实验

在抗白噪声干扰实验中, 白噪声由信号发生器 HP6548A 产生, 实验中电力线上存在着一定的白噪声, 其功率大约为  $-80$  dBm。通过调节白噪声的峰峰值来改变传输过程, 并记录实验结果。经过多次实验发现电力线上的白噪声功率主要部分集中在 50 kHz 以下的频率干扰成分, 约为  $-50 \sim -20$  dBm, 在信噪比达到  $-20$  dB 左右时, 通信误码率低于  $10^{-9}$ 。在抗高斯白噪声的扩频通信系统中, 如果希望系统的误码率达到  $10^{-4}$  这个级别, 则需要控制此过程中的信噪比大于 0 dB。误码率与信噪比曲线如图 12 所示。

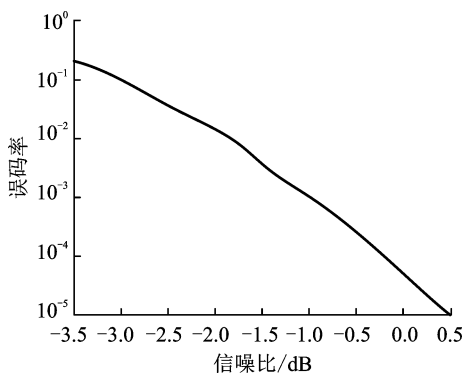


图 12 抗白色噪声干扰实验

Fig. 12 White noise interference test

### (2) 抗选择频率干扰实验

在抗选择频率干扰实验中, 仍然选用 HP6548A 产生干扰信号。与实验(1)不同的是, 此过程中的干扰信号为正弦信号, 频率范围为 50 ~ 500 kHz, 峰峰值设定为 10 V。实验表明, 干扰信

号频率在 FSK 通信频率  $f_0$  左右时, 误码率低于  $10^{-4}$ , 其他干扰频率误码率低于  $10^{-8}$ 。误码率与信噪比曲线如图 13 所示。

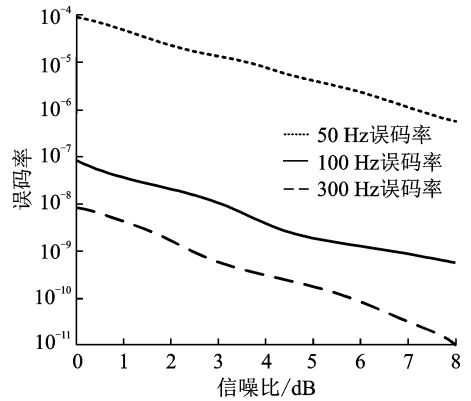


图 13 正弦干扰实验

Fig. 13 Sinusoidal interference test

### (3) 抗时域脉冲干扰实验

在抗时域脉冲干扰实验中, 噪声方式为人工产生, 即利用典型电路在某些测试点附近的电力线上进行投切, 脉冲重复间隔为 100 ms 左右, 实验结果显示该种脉冲干扰噪声对通信的影响程度较大。信噪比需控制在 5 dB 左右, 误码率则低于  $10^{-6}$ 。误码率与信噪比曲线如图 14 所示。

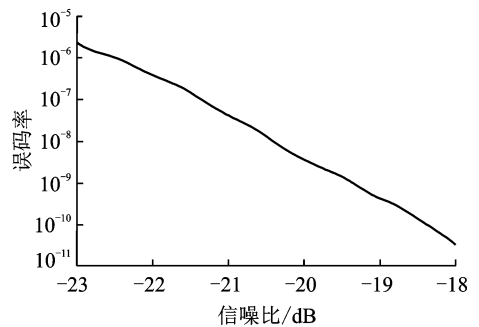


图 14 抗脉冲干扰实验

Fig. 14 Pulse interference test

从图 12—14 可以看出: 本文方法可以抗击低压电力线载波通信中的白噪声干扰、周期性干扰和脉冲干扰, 在相同信噪比情况下, 脉冲干扰的误码率更低一些, 通信可靠性更高。

## 5 结束语

利用低压电力线传输数据, 既符合节能环保原则又有重要的现实意义。通过信号耦合、阻抗匹配、信道噪声建模以及扩频技术拓宽等研究工作, 本文提出了一种在扩展频谱的基础上主动选择高可靠性的频段通信的方法, 以克服低压电力线的强衰减、强干扰的缺陷, 提高 L-PLC 通信能力。今后可以继续从电路设计、芯片集成以及算法改进等方

面进行研发,进一步实现低压电力线载波通信数据采集、传送及抗干扰等硬件产品及系统,可有效解决低压电力线的通信问题和抗干扰问题。该技术不仅可以应用于智能电网能量管理、故障检测、线路识别等电网领域,还可以广泛地推广应用于高速 Internet 接入家庭、智能小区、商业领域以及智能工厂、工业控制领域等,有其他通信技术无法比拟的优势。

#### 参考文献:

- [1] 马晓奇. 电力线载波通信技术发展现状及其应用前景[J]. 机电设备, 2014(3):36-40.  
MA Xiaochi. The development status and application prospect of power line carrier communication technology[J]. Electromechanical Equipment, 2014(3): 36-40.
- [2] 周彪. 电力线扩频载波通信技术及其应用[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(22):54.  
ZHOU Biao. Power line spread spectrum carrier communication technology and its application [J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2015(22):54.
- [3] 刘丽霞. 电力线载波通信技术的发展及特点[J]. 内燃机与配件, 2018(1):223-224.  
LIU Lixia. Development and characteristics of power line carrier communication technology[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(1):223-224.
- [4] 庞姣, 田晓燕, 康建楠. 一种抑制低压电力线载波通信干扰的方法[J]. 电视技术, 2014, 38(11):119-121.  
PANG Jiao, TIAN Xiaoyan, KANG Jiannan. Method for restraining interference of low-voltage power line carrier communication[J]. Video Engineering, 2014, 38 (11):119-121.
- [5] 张高境, 熊兴中. 电力载波通信中的干扰特性及抑制技术分析[J]. 电信科学, 2016, 32(2):182-188.  
ZHANG Gaojing, XIONG Xingzhong. Interference characteristics and suppression techniques in power line communication [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(2):182-188.
- [6] 李风飞, 郝学飞, 胡国荣. 一种多带时频扩展 OFDM 电力线通信系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013 (9):131-136.  
LI Fengfei, HAO Xuefei, HU Guorong. Multi-band time-frequency spreading OFDM for power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2013(9):131-136.
- [7] 李风飞, 胡国荣. 电力线 OFDM 通信系统的自适应定时同步阈值选择方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23):93-96.  
LI Fengfei, HU Guorong. Adaptive timing synchronization threshold selection method for power line OFDM communication system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23):93-96.
- [8] 郑雪娇, 焦健. OFDM 电力线通信系统抗噪性能分析[J]. 重庆文理学院学报, 2014, 33(5):62-65.  
ZHENG Xuejiao, JIAO Jian. Anti-noise performance analysis of OFDM power line communication system [J]. Journal of Chongqing Academy of Arts and Sciences, 2014, 33(5):62-65.
- [9] 王彦, 王超, 刘宏立, 等. 跳频 OFDM 低压电力线通信网络优化算法研究[J]. 电子技术应用, 2015, 41 (5):94-97.  
WANG Yan, WANG Chao, LIU Hongli, et al. Research of optimization algorithm for hopping OFDM low voltage power network[J]. Application of Electronic Technology, 2015, 41(5):94-97.
- [10] LUO G. Differentially coherent detection for multi-carrier spread spectrum communication over power lines[C]//International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. [S. l.]: IEEE, 2013:281-284.
- [11] 严家伟, 王少峰. 低压电力线载波通信干扰因素的解决方法[J]. 科技展望, 2016, 26(8):94.  
YAN Jiawei, WANG Shaofeng. Solutions to the interference factors of low voltage power line carrier communication [J]. Technology Outlook, 2016, 26 (8):94.
- [12] 赵新正, 姚发久, 白崇乾, 等. 低压电力线载波通信与抗干扰解决途径[J]. 现代电子技术, 2014(19): 108-113.  
ZHAO Xinzheng, YAO Fajiu, BAI Chongqian, et al. Solutions for low voltage power line carrier communication and anti-jamming[J]. Modern Electronic Technology, 2014(19):108-113.
- [13] 邵天宇, 王立欣, 白瑾璐, 等. 低压电力线传输衰减模型的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22):68-74.  
SHAO Tianyu, WANG Lixin, BAI Jinjun, et al. Modeling and simulation of low-voltage power line transmission signal attenuation[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(22):68-74.
- [14] 曹旺斌, 尹成群, 谢志远, 等. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4):1136-1141.  
CAO Wangbin, YIN Chengqun, XIE Zhiyuan, et al. Research on broadband MIMO power line communications model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4):1136-1141.
- [15] 赵永辉, 张建伟, 李仕林, 等. 基于低压电力线载波通信信道特性的分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2016 (10):216-218.  
ZHAO Yonghui, ZHANG Jianwei, LI Shilin, et al. Analysis of channel characteristics based on low volt-

- age power line carrier communication[J]. Automation and Instrumentation, 2016(10):216-218.
- [16] HAN B, KAISER C, DOSTERT K. A novel approach of canceling cyclostationary noise in low-voltage power line communications[C]// IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE, 2015:734-739.
- [17] ZHANG Jiaqi, GE Ning, WANG Zhaocheng, et al. Fast anti-jamming timing acquisition using multilayer synchronization sequence[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7):3497-3503.
- [18] ZEICHNER A, FREI S. Immunity of automotive power line communication systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(4):1289-1296.
- [19] NIR V L, SCHEERS B. Robust blind carrier frequency synchronisation for direct sequence spread spectrum systems[J]. Electronics Letters, 2015, 52(4):425-427.
- [20] 齐火箭, 徐海宾, 杨红欣. 电力线宽带载波通信的干扰过滤技术[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(9):6-10.
- QI Huojian, XU Haibin, YANG Hongxin. Interference filtering technology for power line carrier broadband communication[J]. Power Grid and Clean Energy, 2016, 32(9):6-10.
- [21] 邹婷, 李有明, 郭涛, 等. 电力线通信系统中的脉冲干扰抑制研究[J]. 移动通信, 2015, 39(7):84-87.
- ZOU Ting, LI Youming, GUO Tao, et al. Research on impulsive interference suppression in power-line communication system[J]. Mobile Communications, 2015, 39(7):84-87.
- [22] GARLAPATI S, VAGHEFI R M, BUEHRER M R, et al. Performance evaluation of hybrid spread spectrum based advanced smart metering infrastructure network with multi-user detection techniques in jamming channel[C]// Wireless Sensors and Sensor Networks. [S. l.]:IEEE, 2013:154-156.

(编辑:夏道家)