

低压窄带电力线载波通信的半盲式信道估计

刘述钢, 刘宏立

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Semi-blind Channel Estimation Based on Low-Voltage Narrowband Power Line Carrier Communication

LIU Shugang, LIU Hongli

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: In allusion to the frequency-selective transmission characteristics of low-voltage power line carrier channel, a semi-blind channel estimation method is proposed. In the proposed method the transmitted orthogonal frequency division multiplexing signal is pre-coded by a set of orthogonal sequences with constant amplitudes in both time-domain and frequency-domain, so only utilizing one pilot sub-carrier the frequency response of all sub-carriers can be estimated. Results of the simulation based on the experiment research on channel characteristics of power line carrier communication system show that the variation of frequency-selective fading of low-voltage power line channel can be effectively traced by the proposed method can effectively track, thus the bit error rate performance of low-voltage power line carrier channel can be evidently improved.

KEY WORDS: power line carrier; channel estimation; semi-blind estimation; frequency selective fading; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)

摘要: 针对低压电力线信道的频率选择性传输特性, 提出一种半盲式信道估计方法, 该方法使用一组在频域和时域上都等振幅的正交序列对正交频分复用发送信号进行预编码, 仅利用一个导频子载波就能估计出所有子载波的频率响应。在低压电力线载波信道特性的实验研究基础上进行仿真, 结果表明采用该方法能有效跟踪低压电力线信道的频率选择性衰落变化, 从而明显改善信道的误码率性能。

关键词: 电力线载波; 信道估计; 半盲估计; 频率选择性衰落; 正交频分复用

0 引言

为了满足将来用户对实时接口及智能电网发展的需求, 欧洲国家发起了电力线智能抄表演进

(power line intelligent metering evolution, PRIME) 项目^[1], 其是一个开放的电力线载波(power line carrier, PLC)通信标准。PRIME 物理层采用了一种简单而高性能的自适应正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术, 由于低速数据流的特点, PRIME 没有把多径引起的频率选择性衰落作为一个关键问题进行考虑, 因此在所有通信子载波中只定义了一个导频子载波。目前许多企业和科研机构正把 PRIME 标准应用到我国智能配电通信中, 因我国低压配电网节点数繁多、分布无规律且使用环境恶劣, 频率选择性环境复杂, 导致应用结果不理想。为了降低多径传播引起的频率选择性衰落的影响, 有必要采用信道估计技术, 对低压电力线信道进行有效跟踪和补偿, 确保 OFDM 子载波之间的正交性, 提高载波通信的性能。

目前, 利用导频来获得信道信息是最常用的信道参数估计方法^[2-9], 这种方法能对信道特性的变化及时做出反应, 但是因为导频的存在, 使得系统的频谱利用率和功率利用率降低。为了提高频率资源的利用率, 许多研究提出了一些盲估计方法^[10-16], 该类方法利用发送数据和接收数据之间的相关性来完成对信道响应值的估计, 但是需要较多的数据来进行统计处理, 导致盲估计的计算量相当大。半盲估计方法^[17-19]是在盲估计方法的基础上, 利用少量的导频信息来提高信道估计的性能。本文针对 PRIME 标准中只有一个导频子载波的特点, 利用一组在频率和时域都等振幅的广义类线性调频脉冲(generalized chirp-like, GCL)码^[17]对发送信号做前置编码, 运用半盲估计方法对所有子载波的频率响应进行估算。同时, 对一个特定低压电力网络进行实验测量, 找出低压 PLC 信道的频率选择性衰落特

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2007AA11A121); 湖南省科技厅计划项目(2008FJ3114)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2007AA11A121).

征，仿真结果表明增加信道估计后的误码率(bit error rate, BER)性能有了明显的改善。

1 估计算法

预编码方式的目的是将反向快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)前彼此无相关性的发送信号经过编码转换成一定程度的相关信号，接收端利用这些相关性做信道估计以增加解调信号的正确率。为防止因功率峰值平均比(peak-to-average power ratio, PARP)造成解调信号的误判，要求预编码方式能控制IFFT运算后的时域信号在一定范围内线性放大。GCL序列用方程式表示为

$$C_m[n] = \exp\left[\frac{j\pi n(n+m)}{N}\right] \quad (1)$$

式中： $1 \leq n \leq N$ ， N 表示序列的长度，在OFDM中表示子载波的数目且 N 为偶数； m 为偶数且 $0 \leq m \leq 2N-1$ 。很显然，GCL码在频域是等幅值的，对式(1)进行IFFT运算得到

$$c_m[k] = \text{IFFT}(C_m[n]) = \sum_{l=1}^N \exp\left[\frac{j\pi(n^2+2nm+2nk)}{N}\right] \quad (2)$$

对式(2)取绝对值得

$$|c_m[k]| = \left| \sum_{\zeta=1}^N \exp\left[\frac{j\pi(n+\zeta)^2}{N}\right] \right|, \quad \zeta = k + m/2 \quad (3)$$

式(3)表明无论 ζ 为何数值都不影响 $|c_m[k]|$ ，即 $|c_m[k]|$ 与 ζ 互相独立。因此GCL序列在时域内也是等幅值的。因此不管是在频域还是在时域，其振幅都是相等的，这能有效抑制PARP的影响。

对于一个发送的OFDM符号，经过GCL预编码后的发送信号频域表达为

$$S_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{(N-1)+|g|^2}} \sum_{\alpha=1}^N C_\alpha[j] x_{i,j} \quad (4)$$

式中： $C_\alpha[j]$ 满足式(1)； $S_{i,j}$ 为第 j 个子载波上传输的第 i 个OFDM符号； g 为振幅限定参数； N 为OFDM的子载波数。接收端在接收第 i 个符号后会先移去循环前缀(cyclic prefix, CP)，再经过FFT，其数学表达式一般为

$$R_{i,j} = \text{FFT}\left\{\sum_{l=0}^{L-1} h_{l,k}(i) s_{i,j-l} + v_{l,j}\right\} = S_{i,j} H[j] + V_{l,j} \quad (5)$$

式中： $H(j)$ 表示在OFDM信号中第 j 个子载波上的复数信道增益； L 为路径数。因此经过GCL序列编码，通过具有多径干扰特性的电力线信道传输后接收信号为

$$R_{i,j} = \sqrt{(N-1)+|g|^2} \sum_{q=1}^N \left[\sum_{j=1}^N \sum_{\alpha=1}^N H_i(q) C_\alpha[j] x_{i,j} + v_{i,j} \right] \quad (6)$$

式中： $H_i(q)$ 为第 i 个符号时第 q 个子载波的复数增益； $v_{i,j}$ 为一个加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)噪声项，其平均值为零，且各子载波间的噪声项互相独立； λ 为能量分散因子。因此经过电力线信道接收信号矩阵表达式为

$$\mathbf{R} = [R_{i,1} \ R_{i,2} \ \dots \ R_{i,p} \ \dots \ R_{i,N}]^T = \text{FFT}[\text{IFFT}(\mathbf{S}) \otimes \mathbf{h}] + \text{FFT}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} H_i(1)(x_{i,1}C_1[1] + x_{i,2}C_1[1] + \dots + x_{i,N}C_1[1]) + v'_{i,1} \\ H_i(2)(x_{i,1}C_1[2] + x_{i,2}C_1[2] + \dots + x_{i,N}C_1[2]) + v'_{i,2} \\ \vdots \\ H_i(p)(x_{i,1}C_1[p] + x_{i,2}C_1[p] + \dots + x_{i,N}C_1[p]) + v'_{i,p} \\ \vdots \\ H_i(N)(x_{i,1}C_1[N] + x_{i,2}C_1[N] + \dots + x_{i,N}C_1[N]) + v'_{i,N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： \otimes 为卷积； p 为导频子载波； $v'_{i,j} = Jv_{i,j}$ 且 $J = 1/\sqrt{N[(N-1)+|g|^2]}$ 是一个归一化参数。为了补偿电力线多径干扰造成的影响，可由导频子载波的预编码来构造一个相关循环移位矩阵如下：

$$\mathbf{r}_p = \begin{bmatrix} C_1^*[p] & C_N^*[p] & \dots & C_2^*[p] \\ C_2^*[p] & C_1^*[p] & \dots & C_3^*[p] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_N^*[p] & C_{N-1}^*[p] & \dots & C_1^*[p] \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

因此将接收的频域信号式(7)与式(8)相乘得

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} \mathbf{r}_p = \begin{bmatrix} R_{i,1} \\ R_{i,2} \\ \vdots \\ R_{i,p} \\ \vdots \\ R_{i,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1^*[p] & C_N^*[p] & \dots & C_2^*[p] \\ C_2^*[p] & C_1^*[p] & \dots & C_3^*[p] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_N^*[p] & C_{N-1}^*[p] & \dots & C_1^*[p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,1} \mathbf{C}_1 \mathbf{H}_1 + x_{i,2} \mathbf{C}_2 \mathbf{H}_2 + \dots + x_{i,N} \mathbf{C}_N \mathbf{H}_N + \mathbf{V}_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{C}_n = \begin{bmatrix} C_1^*[p]C_1[n] & C_N^*[p]C_1[n] & \dots & C_2^*[p]C_1[n] \\ C_2^*[p]C_2[n] & C_1^*[p]C_2[n] & \dots & C_3^*[p]C_2[n] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_N^*[p]C_N[n] & C_{N-1}^*[p]C_N[n] & \dots & C_1^*[p]C_N[n] \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_i = [H_i(1) \ H_i(2) \ \dots \ H_i(p) \ \dots \ H_i(N)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{r}_p \cdot \mathbf{v}_i = \mathbf{r}_p \cdot [v'_{i,1} \ v'_{i,2} \ \dots \ v'_{i,p} \ \dots \ v'_{i,N}]^T \quad (12)$$

很显然，式(9)共包含了 N 个 N 阶信道频率响应矩阵且每个矩阵可逆。 $x_{i,j} \mathbf{C}_n \mathbf{H}_n$ 中包含1个子载波输入信号和信道频率响应向量。根据已知的导频子载波和其预编码特性，由相关性算法准则，可从 $x_{i,j} \mathbf{C}_n \mathbf{H}_n$ 分离出频率响应向量估计值为

$$\begin{aligned} \tilde{H}_i &= x_{i,p}^{-1} C_p^* \cdot Z = x_{i,1} x_{i,p}^{-1} C_p' C_1 H_1 + \dots + I H_i + \dots + \\ & x_{i,1} x_{i,p}^{-1} C_p' C_N H_N + V_i = H_i + V_i' \end{aligned} \quad (13)$$

式中： $C_p' = C_p^{-1}$ ； $V_i' = \sum_{i=1, j \neq p}^N x_{i,j} x_{i,p}^{-1} C_p' C_N H_N + V_i$ 。因发送信号的期望值都为零，即

$$E(x_{i,j}) = 0, \quad \forall j \in 1 \sim N, \quad j \neq p \quad (14)$$

所以结合式(11)(12)可知，从一组系数矩阵中得到单位矩阵的响应即为信道频率响应，因此信道估计的理论值为

$$\begin{aligned} E(\tilde{H}_i) &= E(x_{i,p}^{-1} C_p' \cdot R) = E(x_{i,1}) x_{i,p}^{-1} C_p' C_i H_i + \dots + \\ & I H_i + \dots + E(x_{i,N}) x_{i,p}^{-1} C_p' C_N H_i + x_{i,p}^{-1} C_p' E(V_i) \end{aligned} \quad (15)$$

由于 AWGN 噪声信号的期望值为零，式(13)中可以看到非导航信号部分可视为噪声部分，其期望值都为零，即 $E(\tilde{H}_i) = H_i$ ，但是由式(15)可知，发送信号的子载波数目越多，发送信号影响信道估计方法的准确性能越严重。在不同的信噪比(signal to noise ratio, SNR)下，发送信号的影响程度也不同。为了提高信道响应估计的准确性，可采用对连续多个 OFDM 符号进行累加，然后求算术平均值的方式来降低发送信号在信道估计中所造成的多径干扰，最终的信道估计结果可表示为

$$\tilde{\tilde{H}}_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tilde{H}_i, \quad \forall i \in 1 \sim M \quad (16)$$

式中 M 为累计的 OFDM 符号数目， $M \geq 1$ 。式(16)表明累积的 OFDM 符号越多，信号的期望值越接近于零，信道估计误差越小，当 $M \rightarrow \infty$ ，则 $\tilde{\tilde{H}}_i = H_i$ 。然而电力线通信的实际信道环境是时变的，且算法实现的存储容量有限，参与估计的发送信号必将受到限制，在一定时间范围内的发送信号期望也很难为零，因此这些因素必将对信道估计造成一定影响。

经过以上分析，本文的半盲式信道估计方法是对经过频域和时域的等振幅 GCL 序列进行预编码，发送信号经过信道后进行 FFT 处理，将信号由时域转换成频域，然后对收到的频域信号利用一组导频子载波进行信道估计。

2 低压 PLC 信道特征

低压配电网具有多接点、多分支、多交叉的复杂结构，其信道特性很难用一个确定且通用的数学模型来描述^[20-25]。为统计分析低压配电网特性，构建一个图 1(a)所示的测量方法和图 1(b)所示低压网络。根据国家电网通信单元技术规范要求，信号发

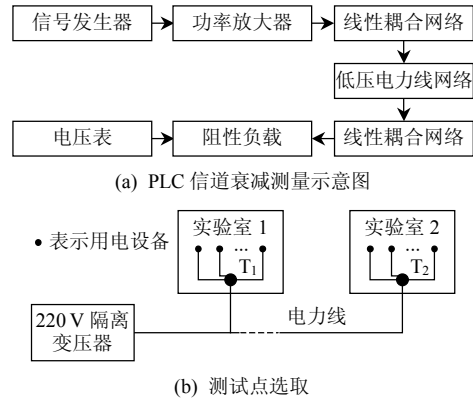


图 1 低压电力线中信号衰减的测量方法
Fig. 1 Measurement for signal attenuation in low-voltage power line

送器的信号频率范围为 3~500 kHz，发端和收端的耦合网络具有相同的耦合效率和滤波特性，实际测量时，将耦合网络的衰减从总的衰减中扣除。

如图 1(b)所示，每个实验室有 1 个测试点，分别为 T_1 (离信号源约 32 m)和 T_2 (离信号源约 67 m)。每个实验室的主要负荷为计算机、实验仪器、荧光灯和手机充电器。当测试 T_1 点时， T_2 为空负荷(实验室 2 中所有用电设备都关闭)，而当测试 T_2 点时， T_1 为全负荷(实验室 1 所有用电设备都正常使用)，对不同类负荷进行随机开关控制，采用同相传输测量方式，信号从隔离变压器端耦合导入电网中，信号频率间隔 $\Delta f = 10$ kHz，50 个信号点，带宽为 500 kb/s。由自回归(auto regressive, AR)^[19]信道模型可得

$$H(n) = -\sum_i^p a_i H(n-1) + V(f_n) \quad (17)$$

式中： $H(n)$ 为第 n 个频点的频率响应； a_i 为系数； p 为阶次； $V(f_n)$ 为一个白噪声过程。假设白噪声方差为 1.05×10^{-5} ，通过 1200 次的测量数据统计分析发现，满足 3 阶 AR 模型的系数分别为： $a_1 = -0.927 + 0.071j$ ； $a_2 = 0.221 + 0.096j$ ； $a_3 = -0.161 + 0.042j$ ，低压电力线信道中不同时刻的窄带载波信号频率响应见图 2。

图 2 显示 2 个不同时刻 t_1 和 t_2 的频率响应的幅

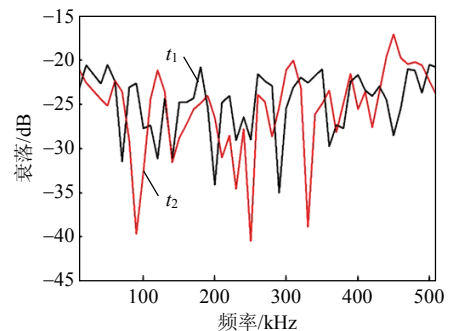


图 2 频率响应的幅频特性曲线
Fig. 2 Characteristic curve of frequency response

频特性曲线，从曲线中可以看出：在同一时刻，不同频率的衰落不同，有些频率的衰落会突然增大，变化可以超过 40 dB；同时，在不同的时刻，同一频率的衰落也不同，这充分表现了低压电力线信道的频率选择衰落具有时变性。

3 仿真与性能分析

开放的 PRIME 项目标准中主要 OFDM 参数为：有效荷载中每个 OFDM 符号包含 96 个数据子载波和 1 个导频子载波；IFFT 间隔长度 2048 ms，加上一个 192 ms 的循环前缀。每次仿真时累计 OFDM 符号数目是 32，130 kb/s 数据速率。在整个系统仿真把本文提出的信道估计方法增加到系统中(见图 3)。

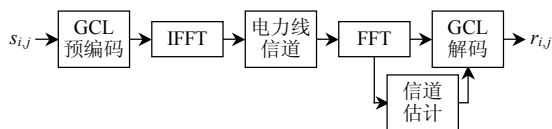


图 3 信道估计方法框图

Fig. 3 Block diagram of channel estimation method

根据低压电力线信道中窄带载波信号的频率选择衰落的传输特性，并考虑 AWGN 信道噪声，对加入信道估计前后 BER 性能进行比较，仿真结果见图 4。显然，加入本文半盲式信道估计方法后，当 SNR 大于等于 9 dB 时，BER 可达 10^{-4} 以上，而无信道估计的情况下，即使 SNR 为 10 dB，BER 也只能达到 10^{-3} 。因此本文估计方法对信道频率选择衰落有较强的自适应能力，有利于提高低压 PLC 通信的可靠性。为能使 PRIME 标准在我国低压窄带 PLC 中有效应用，需要提高抗频率选择性的能力，增加本文的信道估计技术是必要的，也是可行的。

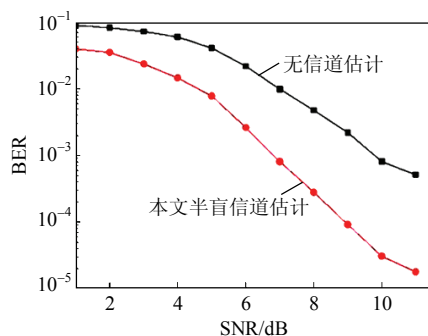


图 4 BER 性能比较

Fig. 4 BER performance

4 结论

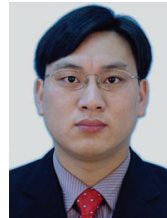
由于低压配电网结构十分复杂，本文对特定的低压电力线信道进行了测量，结果表明并不是所有的频段都处于深衰落，同时频率选择性衰落也随着

时间而改变。同时，本文利用 GCL 正交码对发送信号作预编码，研究开发出适用于低压 PLC 的半盲估计方法。该方法仅利用 1 个导频子载波，由相关性特点能有效估计出所有子载波的频率响应，具有很好的信道跟踪能力，可补偿各子载波信道增益不一致的影响，从而得到较佳的 BER 性能，这种方法比较适用于只有 1 个导频子载波的 PRIME 标准，能改善用于我国恶劣低压电力线信道的 OFDM 信号的传输性能。但是就本文方法而言，如果要持续降低估计误差，就必须提高累计的 OFDM 符号数量，因此在实际执行上由于存储容量有限，工程师在设计实现时需要做适当的取舍。

参考文献

- [1] PRIME Project. PRIME technology whitepaper: PHY, MAC and convergence layers[S]. 2008.
- [2] Granado J, Torralba A. Method for frequency offset estimation in OFDM with application to power line communication[J]. Electronics Letters, 2003, 39(5): 468-470.
- [3] Gotz M, Rapp M, Dostert K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 42(4): 78-86.
- [4] 王根平, 易灵芝. 电力系统通信系统中的信道训练和信道估计方案[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 35-37.
Wang Genping, Yi Lingzhi. Channel training and estimating scheme for power line communication[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 35-37(in Chinese).
- [5] 赵宇明, 郭静波, 王赞基. 一种改进的电力线正交复用信道估计的最小平方算法[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 25-30.
Zhao Yuming, Guo Jingbo, Wang Zanji. An improved least square algorithm for channel estimation of power line orthogonal division multiplexing communication[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 25-30(in Chinese).
- [6] 韩谷静, 秦亮, 殷小功, 等. 一种正交复用低压电力线通信系统的信道估计与迭代均衡策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 91-96.
Han Gujing, Qin Liang, Yin Xiaogong, et al. A channel estimation and iterative equalization scheme OFDM in low-voltage power-line communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 91-96(in Chinese).
- [7] 谢志远, 耿焯, 侯思祖. 基于判决反馈的正交频分复用低压电力线通信信道估计的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 66-70.
Xie Zhiyuan, Geng Xuan, Hou Sizu. Channel estimation based on decision feedback for OFDM system in low-voltage power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 66-70(in Chinese).
- [8] 罗春风, 程时杰, 熊兰, 等. 基于多层感知器的用低压电力线时变信道非线性均衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 71-75.
Luo Chunfeng, Cheng Shijie, Xiong Lan, et al. A nonlinear equalization method based on multilayer perception for OFDM power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 71-75 (in Chinese).
- [9] 赵庆杞, 杨东升, 张化光, 等. 电力线通信中信道估计和模糊滤

- 波技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 85-89.
- Zhao Qingqi, Yang Dongsheng, Zhang Huaguang, et al. Research on channel estimation and fuzzy filter technique applied in power line communication[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 85-89 (in Chinese).
- [10] Musolino A, Raugi M, Tucci M. Cyclic short-time varying channel estimation in OFDM power-line communication[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 157-163.
- [11] Raugi M, Tucci M. Power-line communications channel estimation and tracking by a competitive neural network[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2006, 52(4): 1213-1219.
- [12] Sarmadi N, Shahbazpanahi S, Gershman A B. Blind channel estimation in orthogonally coded MIMO-OFDM systems: a semidefinite relaxation approach[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(6): 2354-2364.
- [13] 于华楠, 陈晓娟. 一种基于神经网络的低压电力线通信盲信道估计算法[J]. 东北电力大学学报, 2008, 28(6): 68-71.
- Yu Huanan, Chen Xiaojuan. A blind channel estimation algorithm based on neural network in low voltage power-line communication [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2008, 28(6): 68-71(in Chinese).
- [14] 陈研华, 焦毅. OFDM 低压电力线通信中基于小波去噪的盲信道估计[J]. 电力系统通信, 2006, 27(12): 58-62.
- Chen Yanhua, Jiao Yi. Blind channel estimation based on wavelet denoising for OFDM system in low-voltage power line communication[J]. Telecommunication for Electric Power system, 2006, 27(12): 58-62(in Chinese).
- [15] 王鹤, 郭玉山. 一种非线性直接判决的 OFDM 电力线通信盲信道估计算法[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2008, 9(6): 566-568.
- Wang He, Guo Yushan. A blind channel estimation algorithm based on cyclic varying characteristics in OFDM power-line communication[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2008, 9(6): 566-568(in Chinese).
- [16] 孙慧勇. 基于 OFDM 的电力线通信信道估计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [17] Li Chih-Peng, Huang Wei-Chieh. Semi-blind channel estimation using superimposed training sequences with constant magnitude in dual domain for OFDM system[C]//IEEE 63rd Vehicular Technology Conference. Melbourne, Vic.: IEEE, 2006: 1575-1579.
- [18] Muck M, Courville M, Duhamel P. A pseudorandom postfix OFDM modulator--semi-blind channel estimation and equalization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3): 1005-1017.
- [19] 马英红, 周春丰, 刘爱辉. 半盲式信道估计在 OFDM 低压电力线通信中的应用[J]. 电力系统通信, 2006, 27(3): 55-58.
- Ma Yinghong, Zhou Chunfeng, Liu Aihui. Application of semi-blind channel estimation in OFDM low voltage power line communication [J]. Telecommunication for Electric Power System, 2006, 27(3): 55-58(in Chinese).
- [20] Zimmerman M, Dostert K. A multipath model for the power line channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(4): 553-559.
- [21] Andreadou N, Pavlidou F N. Modeling the noise on the OFDM power-line communications system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 150-157.
- [22] Meng H, Guan Y L, Chen S. Modeling and analysis of noise effects on broadband power-line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 630-637.
- [23] 刘海涛, 张保会, 郑涛. 低压电网信道频率响应模型的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 66-71.
- Liu Haitao, Zhang Baohui, Zheng Tao. Research on frequency response model to low voltage network channel[J]. Transactions of China Electrotechnician Society, 2004, 19(11): 66-71(in Chinese).
- [24] 翟明岳, 曾庆安. 低压电力线通信信道的马尔柯夫特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 116-121.
- Zhai Mingyue, Zeng Qingan. Markov characterization of LV power line communication system channels[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 116-121(in Chinese).
- [25] 崔鼎新, 瞿学第, 于泓. 架空电力线与地下电信电缆的互感系数[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 42-46.
- Cui Dingxin, Qu Xuedi, Yu Hong. Mutual Inductance coefficient between overhead power line and underground communication cable [J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 42-46(in Chinese).



刘述钢

收稿日期: 2010-09-01。

作者简介:

刘述钢(1978), 男, 博士研究生, 主要从事智能电网中低压配电系统中高性能通信关键技术的研究, E-mail: liusghnu@126.com;

刘宏立(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代通信理论和无线传感网络新技术、OFDM 通信系统的研究。

(责任编辑 李兰欣)