

# 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

谢志远<sup>1</sup>, 耿焯<sup>2</sup>, 侯思祖<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电子与信息工程学院, 河北省 保定市 071003;

2. 河北师范大学电子系, 河北省 石家庄市 050000)

## CHANNEL ESTIMATION BASED ON DECISION FEEDBACK FOR OFDM SYSTEM IN LOW-VOLTAGE POWER LINE COMMUNICATION

XIE Zhi-yuan<sup>1</sup>, GENG-xuan<sup>2</sup>, HOU Si-zu<sup>1</sup>

(1.School of Electronics & Information Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003,

Hebei Province, China; 2. Electronics Department, Hebei Normal University,

Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** Due to many advantages of Orthogonal Frequency Division Multiplexing technique, it becomes the best choice for low-voltage power line broadband communication. Channel estimation is one of the key problems in Orthogonal Frequency Division Multiplexing system. The low-voltage power line channel properties are analyzed in this paper and a decision feedback channel estimation method is proposed on condition of slow time-variant of channel. In this method, the pre-channel estimation value is used to equalize the next receiving symbol, so a loop including decision, feedback and channel estimation is formed. No pilot symbols are needed and consecutive estimation can be made, which improves transmission efficiency. This method is applied to the power line communication simulation system, which gets a good performance.

**KEY WORDS:** Power line communication; Orthogonal frequency division multiplexing; Channel estimation; Decision feedback

**摘要:** 正交频分复用技术以其多种优势成为低压电力线宽带通信的最佳选择, 信道估计是正交频分复用系统的关键问题之一。该文分析了低压电力线信道特性, 利用信道慢时变的特点提出一种适合于电力线信道的判决反馈信道估计方法。这种方法使用前一个正交频分复用符号计算得到的信道估计值去均衡下一个接收符号, 形成一个集判决, 反馈, 信道估计为一体的回路。它不需要加入导频符号, 能够进行连续信道估计, 大大提高了系统传输效率。将该信道估计方法用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60372035)。

Project Support by National Natural Science Foundation of China (60372035).

于电力线通信仿真系统中, 取得了较好的效果。

**关键词:** 电力线通信; 正交频分复用; 信道估计; 判决反馈

## 1 引言

低压电力线拓扑结构复杂, 负载多, 具有严重的频率选择性衰减<sup>[1-2]</sup>。而正交频分复用技术通过并行传输可以有效地对抗频率选择性衰减, 同时, 加入循环前缀可以消除符号间干扰。因此, 以正交频分复用技术作为调制解调方式成为目前低压电力线通信研究的主要方向。

当通信信号通过具有频率选择特性的低压电力线信道之后, 信号必然要发生失真。为了在接收端能够进行正确的解调, 需要对信号进行均衡, 在均衡过程中所需要的信道状态信息 (CSI), 可以通过信道估计获得。对正交频分复用系统信道估计的方法主要有以下两种。训练序列或者导频方法<sup>[3-4]</sup>, 即在发送端向数据流中插入一定的已知符号, 接收端通过已知符号的大小和位置对信道状态进行估计; 盲或半盲的信道估计算法, 利用传输符号的字符特性或统计特性进行信道估计<sup>[5]</sup>。目前在低压电力线通信中信道估计通常使用的是发送训练序列的方法<sup>[6]</sup>。该方法易于实现, 但是难以跟踪信道的变化。为了克服这一缺点, 本文在测量低压电力线信道特点的基础上, 提出一种适合低压电力线通信的判决反馈

信道估计方法,这种方法属于半盲的信道估计算法,对此算法的性能进行了仿真,并与文献[6]的方法进行了比较。

## 2 低压电力线信道特性分析

### 2.1 衰减特性分析

低压电力线的拓扑结构,物理特性与传统的通信传输介质不同,它在传输通信信号时信道特性相当复杂,具有负载多,噪声干扰强,信道衰减大,信道多径传播等特点,通信环境相当恶劣<sup>[7-9]</sup>。为了研究信道的衰减特性,对实际的低压电力线进行了测量。测量地点在华北电力大学计算机系实验室,使用 HP4395A 网络分析仪测量了 0~35MHz 的信道衰减特性,图 1 是在一个小时内测量的两条衰减曲线。从图中可以看出,衰减特性曲线在一定的时间内变化大致相同,因此可以认为在一段时间内的传输特性是慢变化的,这与文献[1]的结论相同。

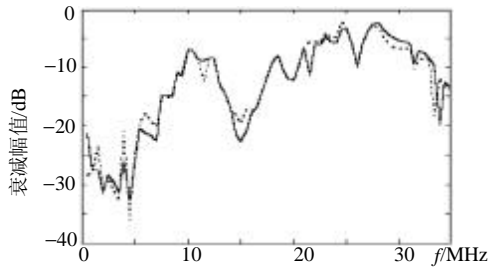


图 1 低压电力线信道衰减特性曲线  
Fig. 1 Attenuation property of low-voltage power line channel

### 2.2 噪声特性分析

低压电力线的网络连接有众多负载设备,信道所受的噪声影响要比通常的通信线路复杂的多。通常,电力线上存在的噪声<sup>[10-11]</sup>分为:有色背景噪声,窄带噪声,和工频信号异步的周期性脉冲噪声,和工频信号同步的周期性脉冲噪声,随机脉冲噪声等。噪声很难直接定量地表示,但是也有一定的规律性,比如噪声随频率的升高有下降的趋势。通过对噪声的功率谱分析,发现在高频段背景噪声可以近似认为是白噪声,且背景噪声对通信系统的影响要大于周期性噪声和突发噪声。因此仿真中可以利用白噪声及周期性噪声对噪声进行建模。

## 3 低压电力线通信中基于判决反馈的信道估计算法

### 3.1 正交频分复用系统简述

图 2 给出了正交频分复用系统的传输框图。发

送端,输入数据符号块为: $S_{n,k} (k = 0, 1, \dots, N-1)$ ,它包括  $N$  个值,其中  $S_{n,k}$  是第  $n$  个数据符号块中第  $k$  个子载波的输入数据。经过 IFFT 变换得到时域数据:

$$s_{n,i} = \sum_{k=0}^{N-1} S_{n,k} \exp(j \frac{2\pi i k}{N}) \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

然后将  $M$  个数据复制到  $s_{n,0}$  的前面,构成循环前缀。加入循环前缀的目的不仅是为了消除码间干扰,而且能够使数据序列和信道的离散冲激响应的线性卷积转换为循环卷积,即

$$r = s \otimes h + v \quad (2)$$

式中  $h$  为信道的离散冲激响应; $v$  为噪声向量; $r$  为接收端 FFT 的输入数据向量; $\otimes$  表示循环卷积。

由信号处理理论知, $r$  经过 FFT 变换后,发送信号和信道的卷积在频域变为相乘的关系

$$R_{n,k} = S_{n,k} H_{n,k} + V_{n,k} \quad (3)$$

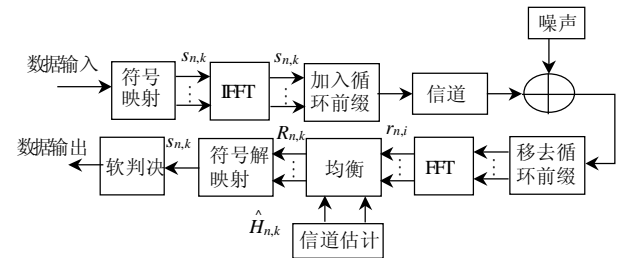


图 2 正交频分复用传输系统及信道估计框图  
Fig. 2 Block diagram of orthogonal frequency division multiplexing transmission system

### 3.2 判决反馈信道估计算法

定义代价函数  $J$

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} (R_{n,k} - S_{n,k} \hat{H}_{n,k})^* (R_{n,k} - S_{n,k} \hat{H}_{n,k}) \quad (4)$$

按照最小平方(LS)准则取  $J$  的最小函数条件求解,

$$\text{即} \quad \frac{\partial J}{\partial \hat{H}_{n,k}} = 0 \quad (5)$$

解得信道估计值为

$$\hat{H}_{n,k} = R_{n,k} / S_{n,k} \quad (6)$$

在实际估计中,假设判决反馈值以概率 1 近似发送值,即  $P(S_{n,k} = \hat{S}_{n,k}) \approx 1$ ,在这一假设下,信道估计值可以换为

$$\hat{H}_{n,k} = R_{n,k} / \bar{S}_{n,k} \quad (7)$$

图 3 给出了判决反馈的过程,在这里,为了跟踪信道的时变性,对信道估计值采用了递归处理,即

$$\hat{H}_{n,k} = g \hat{H}_{n,k} + (1-g) \hat{H}_{n-1,k} \quad (8)$$

式中  $g$  是更新因子, 它的作用是使当前信道估计值与前一个值相关联, 从而跟踪信道的缓慢变化, 它也可以扩展为多个因子, 即

$$\hat{H}_{n,k} = g_n \hat{H}_{n,k} + g_{n-1} \hat{H}_{n-1,k} + \dots + g_1 \hat{H}_{1,k} \quad (9)$$

( $g_n + \dots + g_1 = 1$ )

递归处理后的信道估计值给下一个符号均衡使用

$$\hat{S}_{n+1,k} = R_{n+1,k} / \hat{H}_{n,k} \quad (10)$$

这样就形成了一个集均衡, 判决, 反馈信道估计为一体的接收过程。

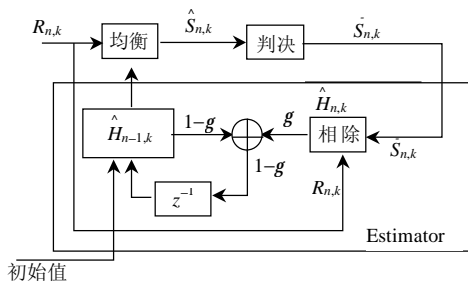


图3 判决反馈估计器

Fig. 3 decision feedback estimator

### 3.3 分析

假设背景噪声是高斯分布的白噪声, 方差为  $S^2$ , 那么接收符号的条件概率为

$$p(R/S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S^2}} \exp\left(-\frac{1}{2S^2} |R - S \cdot H|^2\right) \quad (11)$$

提取式中的  $H$ , 得到

$$p(R/S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S^2}} \exp\left(-\frac{H^2}{2S^2} \left|\hat{S} - \bar{S}\right|^2\right) \quad (12)$$

对于  $M$  进制 QAM, 发送信号空间有  $M$  种取值  $S_m$  ( $m=1, 2, \dots, M$ ), 当发送符号均匀分布时, 根据全概率理论和贝叶斯公式, 判决符号的条件概率是

$$p(\bar{S}/R) = \frac{p(R/\bar{S})}{\sum_{m=1}^M p(R/S_m)} = \frac{\exp\left(-\frac{|H|^2}{2S^2} \left|\hat{S} - \bar{S}\right|^2\right)}{\sum_{m=1}^M \exp\left(-\frac{|H|^2}{2S^2} \left|\hat{S} - S_m\right|^2\right)} \quad (13)$$

式(13)表明接收判决值的概率取决于信道传递函数, 判决符号和估计符号的距离, 以及估计符号与信号空间的距离。显然

$$1/M \leq p(\bar{S}/R) \leq 1 \quad (14)$$

更新因子  $g$  与判决符号有关。由于更新因子不是在  $[0, g_{\max}]$  上均匀分布的, 对它进行归一化处理

$$g = g_{\max} \left( \frac{p(\bar{S}/R) - 1/M}{1 - 1/M} \right)^a \quad (15)$$

这样, 递归因子可以随判决符号的判决质量变化, 从而能自适应跟踪信道的变化。

### 3.4 说明

(1) 这种算法成立的前提条件是信道是慢时变的, 相对于通信信号传输时间( $\mu\text{s}$  级), 可以认为电力线信道在传输前后两个正交频分复用符号时是不变的, 这样才能使用前一个符号计算得到的信道估计值去均衡下一个接收符号。

(2) 如果一个符号判决误差较大的话, 由于反馈回路的存在易造成误差扩散, 因此对发送序列的可靠性估计是通过增加前向纠错编码(FEC)系统来保证的, 而目前的正交频分复用系统中通常都包括编码部分, 因此并不增加复杂度。通过前向纠错编码系统能够进一步降低误码率。

## 4 仿真试验

### 4.1 仿真模型

由 2.1 节分析知, 电力线信道具有多径传播的特性。多径信号传播的信道传输函数可以用  $N$  条传输路径的叠加表示, 为简化考虑, 假设输入、输出端与电力线的阻抗是匹配的, 则主要考虑信号在电力线上多径传播, 据此提出多径传播模型<sup>[12-13]</sup>, 见图 4。

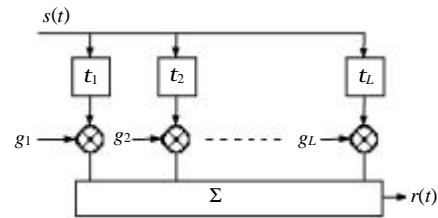


图4 电力线多径传播模型

Fig. 4 Multi-path propagation model of power line

这个模型由  $L$  条路径组成, 即信道的冲激响应为

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} g_i d(t - t_i) \quad (16)$$

其中  $g_i$  是第  $i$  条路径的衰落因子,  $t_i$  是第  $i$  条路径的延时。假定信道的最大有效延迟数为  $L$ , 因此可以采用抽头系数为  $L$  的复系数 FIR 滤波器作为仿真信道的模型。

### 4.2 仿真参数

在实际测量系统中, 文献[14]测得的最大多径时延为  $1.6\mu\text{s} \sim 2.5\mu\text{s}$ , 因此, 如果选择保护时间间隔  $T_g = 5\mu\text{s}$ , 基本上能消除低压电力线上的多径干扰。通常取  $T_g \leq T/4$ <sup>[15]</sup>, 因此得到  $T \geq 20\mu\text{s}$ 。

这里,正交频分复用信号直接以基带形式在电力线上传输,本文研究的电力线可用频带为 5MHz~20MHz,根据奈奎斯特采样定理,IFFT输出的采样频 $f_s=40\text{MHz}$ 。取子载波数 $N=1024$ ,则有用码元周期 $T=N/f_s=25.6\mu\text{s}$ ,相邻子载波间隔 $\Delta f=39.065\text{kHz}$ ,总的正交频分复用码元周期 $T_u=T+T_g$ 。由于数据是对称共厄的,则只有一半的子载波加载实际的数据,然后结合本文对使用频带的要求,关闭5MHz以下的信道,因此,实际使用的子信道数 $N_u=384$ ,总的符号率为 $R=N_u/T_u=12.55\text{Mbit/s}$ 。

### 4.3 仿真结果

定义信道估计值的MSE为

$$e_{MSE} = E[|H_{n,k} - \hat{H}_{n,k}|^2] \quad (17)$$

为了研究判决反馈算法能否跟踪信道的慢时变特性,可以假定两个信道,初始信道为 $h_1$ ,经过20个正交频分复用码字后,信道变为 $h_2$ ,信道的幅频响应,相频响应如图5和图6所示。

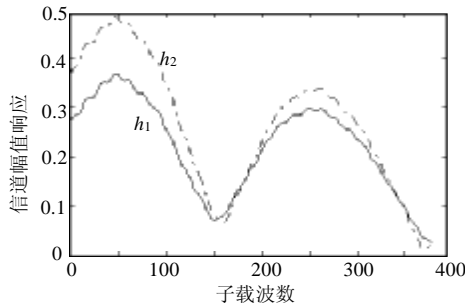


图5 信道幅频响应

Fig. 5 Channel amplitude response

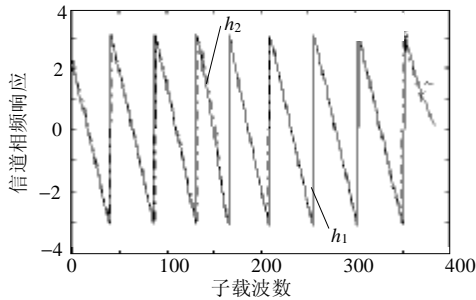


图6 信道相频响应

Fig. 6 Channel phase response

图7给出了当信道由 $h_1$ 变到 $h_2$ 时,信道估计值MSE的变化,从图中看出,当信道发生缓慢变化时,在变化点处出现较大的MSE,但是随着判决反馈过程的进行,会重新跟踪信道变化,MSE降低。

当更新因子不同时,MSE的收敛速度也不一样,图8给出了不同更新因子时,MSE的变化曲线。在其它条件相同的情况下,存在着一个更新最

佳值使收敛速度最快。以上结果表明该算法能够跟踪电力线信道的缓慢变化。

本文对该算法的误码率进行了仿真,同时与发送单一训练的方法<sup>[6]</sup>进行了对比,结果如图9所示。

仿真表明,该算法能够达到通信的要求,并且其性能要好于发送单一训练序列的方法。

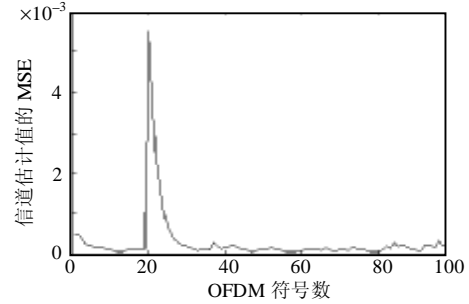


图7 信道估计值的MSE

Fig. 7 MSE for channel estimation

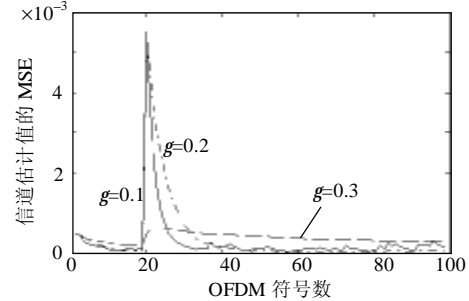


图8 不同g的收敛情况

Fig. 8 Convergence comparison for different g

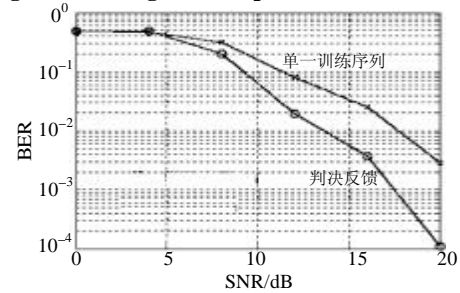


图9 误码率比较

Fig. 9 Comparisons for BER

## 5 结论

(1) 通过实际测量表明,低压电力线信道相对于通信信号传输时间而言,具有慢时变性,针对这种特点,提出了正交频分复用系统中基于判决反馈的信道估计方法,这种方法利用前一个符号的信道估计值均衡下一个接收符号,形成一个判决反馈回路。

(2) 由于这种算法前后两个符号的信道估计值有一定的相关性,见式 $\hat{H}_{n,k} = a\hat{H}_{n,k} + (1-a)\hat{H}_{n-1,k}$ ,因此能够跟踪信道的缓慢变化,比文献[6]单纯发送训

练序列的方法有了改进, 仿真表明能够得到比文献[6]更好的性能。

(3)这种算法的优点是不需要连续发送导频信号, 对于高速数据通信来说大大提高了通信效率, 而且信道估计只需要延迟一个正交频分复用符号, 能够保证信道的实时估计, 符号实时通信的要求, 仿真表明其误码率也能达到通信的要求, 因此是一种有效的正交频分复用系统中低压电力线通信信道估计方法。

## 参考文献

- [1] 郭静波, 王赞基. 低压配电网扩频信号传输特性及通信系统实现对策[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 78-82.  
Guo Jinbo, Wang Zanji. Spectrum signal transmission over low voltage distribution networks and realization countermeasures of the communication systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 78-82.
- [2] Morgan H L Chan, Robert W Donaldson. Amplitude, width, and interarrival distributing for noise impulses on intra-building power line communication networks[J]. IEEE Transactions on EMC. 1989, 62(8): 62-69.
- [3] Ye(Geoffrey) Li. Pilot-Symbol-Aided channel estimation for OFDM in wireless systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(4): 1207-1215.
- [4] Coleri S, Ergen M, Puri A. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems[J]. IEEE Trans. Broadcast, 2002, 48(3): 223-229.
- [5] Liu H, Xu G, L Tong *et al.* Recent developments in blind channel equalization: from cyclostationarity to subspaces[J]. Signal Processing, 1996, 50(1-2): 83-99.
- [6] 吕海峰 郭静波 王赞基. 电力线正交频分复用通信的实时信道估计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 29-31  
Lv Haifeng, Guo Jinbo, Wang Zanji. Real time channel estimation of power line OFDM communications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 29-31.
- [7] 姜霞, Nguimbis J, 程时杰. 低压配电网载波通信噪声特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 30-35.  
Jiang Xia, Nguimbis J, Cheng Shijie. Noise characteristics investigation in low voltage powerline communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 30-35.
- [8] 何海波, 张有兵, 程时杰. 低压电力线载波通信中信号反射现象的复小波研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 11-15.  
He Haibo, Zhang Youbin, Cheng Shijie. Analysis of reflection of signal transmitted in low voltage powerline with complex wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 11-15.
- [9] 何海波, 姜霞, 程时杰. 一种低压配电网载波通信信号分析的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 66-71.  
He Haibo, Jiang Xia, Cheng Shijie. A novel scheme for low voltage powerline communication signal processing[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 66-71.
- [10] Zimmermann M, Dostert K. An analysis of the broadband noise scenario in power-line network[C]. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Power-line Communications and Its Applications. Limerick(Ireland), 2000. 131-138.
- [11] Zimmermann M, Dostert K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communication[J]. IEEE Trans. Electromagn Compat, 2002, 44(1): 249-258.
- [12] Philipp s H. Development of a statistical model for powerline communication channels[C]. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Power2line Communications and Its Applications. Limerick (Ireland), 2000.
- [13] 罗春风, 程时杰, 熊兰, 等. 基于多层感知器的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 multiplayer perceptron for OFDM powerline communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 71-75.
- [14] Zimmermann M, Dostert K. A multi-path signal propagation model for the power-line channel in the high frequency range [C]. Proceedings of the 3th International Symposium on Power-line Communications and Its Applications. Lancaster(UK), 1999. 45-51.
- [15] 王秉均, 孙学军, 王少勇, 等. 现代通信系统原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.

收稿日期: 2005-09-18。

作者简介:

谢志远 (1964-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为数字信号处理技术及其应用;

耿 焜 (1979-), 女, 助教, 主要研究方向为数字信号处理;

侯思祖 (1962-), 男, 教授, 主要研究方向为通信网络, 高速 PLC 通信。