

# 宽带电力线载波 MIMO 系统干扰消除预编码方法

伍韵文<sup>1</sup>, 郭劲松<sup>1</sup>, 吴海东<sup>1</sup>, 王朝霞<sup>1</sup>, 宋巍<sup>2</sup>

(1. 国家电网四川省电力公司乐山供电公司, 四川 乐山 614000; 2. 国网冀北电力有限公司检修分公司, 北京 102488)

**摘要:** 随着电力线载波通信在电力系统中的广泛应用, 宽带多输入多输出系统会有共信道干扰, 此干扰是除了异步脉冲噪声和周期脉冲外影响电力线载波宽带 MIMO 系统最大的因素。针对此问题, 利用多输入多输出信道的状态信息, 在发送端采用块对角化的方法消除信道间的干扰, 从而提高宽带电力线载波系统的容量, 同时降低了系统的误比特率。通过仿真结果和分析可以表明, 所提的块对角化的预编码方法有效地消除了共信道干扰, 提高了信干噪比, 从而提高了系统的最大互信息并降低了系统的误比特性能。

**关键词:** 电力线载波; 块对角化; 预编码; 多输入多输出; 干扰消除

## Precoding method for eliminating interference of broadband PLC MIMO system

WU Yunwen<sup>1</sup>, GUO Jinsong<sup>1</sup>, WU Haidong<sup>1</sup>, WANG Zhaoxia<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>2</sup>

(1. Leshan Power Supply Company, State Sichuan Electric Power Company, Leshan 614000, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Company Limited Maintenance Branch, Beijing 102488, China)

**Abstract:** With the widespread application of power line carrier communication, broadband multi-input multi-output (MIMO) system will have a co-channel interference which is the largest factor influencing the MIMO system of broadband power line carrier in addition to asynchronous pulse noise and pulse cycle. Aiming at this problem, this paper, by using multiple input multiple output channel state information, the sender with the method of block diagonalization, eliminates the interference between the channel, so as to improve the capacity of broadband power line carrier system, at the same time reduces the bit error rate of the system. Through the simulation results and analysis can show that the proposed block diagonalization precoding method effectively eliminates the common channel interference, improves the drying ratio, thus enhances the maximum mutual information of the system and reduces the bit error performance of the system.

**Key words:** PLC; block diagonalization; precoding; multiple input multiple output; interference elimination

中图分类号: TM932 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0123-04

## 0 引言

电力线载波通信(PLC)通过存在的电力电缆传递信息。PLC 其最大的优点就是不需要增加其他线路的铺设, 可以进行通信<sup>[1-2]</sup>。PLC 开始应用在低速率的通信场景, 经过了数十年的发展, 特别是正交频分复用技术在 PLC 中的应用, 使得 PLC 进入了宽带电力线载波通信时代。在室内电力线中, 存在三个传输线: 1)本相线; 2)中性线; 3)保护接地线。传统的 PLC 工作在单输入单输出(SISO)系统中, 即工作在本相线和中性线两个电线上。一种作为发送线路, 一个作为接收线路。然而, 其可以工作在多输入多输出(MIMO)系统中, 能够提高系统的容量和

改变系统的稳定性。已经证明, 利用 MIMO 技术, PLC 系统的容量得到了提高<sup>[3-5]</sup>。为了充分利用 MIMO 技术的优势, 必须研究信道的特征和干扰抑制技术, 因为共信道干扰<sup>[6]</sup>(Co-Channel Interference, CCI)不但降低了系统的容量, 而且降低了接收的信噪比(SNR), 从而使得误比特率(BER)上升, 影响 PLC 的通信质量。传统的方法都是在接收端采用均衡的方法, 如最大比合并或者等比例合并等均衡方法, 这些均衡方法虽然能够消除 CCI, 但是由于接收端处理能力有限, 并且会增加发送端发射功率。针对此问题, 本文提出了一种基于块对角化的预编码方法, 能够消除各个电力线之间的干扰, 从而提高系统的性能。

## 1 系统模型

图1为 $3 \times 3$ 室内MIMO电力线通信信道。本文所采用的系统模型,类似于文献[7],设有 $M$ 个发送端,并且有 $N$ 个接收端,则信道可以表示为 $\mathbf{H}(f)$ ,其矩阵表示形式为

$$\mathbf{H}(f) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(f) & h_{1,2}(f) & \cdots & h_{1,m}(f) \\ h_{2,1}(f) & h_{2,2}(f) & \cdots & h_{2,m}(f) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{n,1}(f) & h_{n,2}(f) & \cdots & h_{n,m}(f) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $h_{n,m}(f)$ 代表第 $m$ 个发送端到第 $n$ 个接收端在频率 $f$ 上的复数信道转移矩阵。当 $m=n$ 时,发送信道 $h_{n,m}(f)$ 代表共信道,当 $m \neq n$ 时,发送信道 $h_{n,m}(f)$ 代表互相干扰信道。设 $x_j$ 为第 $j$ 个发送端发送的信号,而 $n_i$ 是在第 $i$ 个接收端接收到的噪声,则可以得到,第 $i$ 个接收端接收的信号表示为

$$y_i = \sum_{j=1}^M h_{i,j} x_j + n_i \quad (2)$$

式中, $y_i$ 是第 $i$ 个接收端接收到的信号。为了简化模型,信道噪声 $n_i$ 可以建立模型为加性高斯白噪声和加性脉冲噪声相加,可以表示为

$$n_i = n_{\text{awgn},i} + n_{\text{ain},i} \quad (3)$$

所有接收端接收到的信号可以写为矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,M} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{N,1} & \cdots & h_{N,M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix} \quad (4)$$

也可以简写为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{N} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{N}_{\text{AWGN}} + \mathbf{N}_{\text{AIN}} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{y}$ 是接收端的 $N \times 1$ 列向量; $\mathbf{H}$ 是 $N \times M$ 的

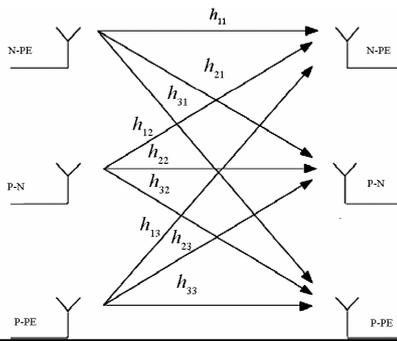


图1  $3 \times 3$  室内MIMO电力线通信信道

Fig. 1  $3 \times 3$  indoor MIMO power line communication channel

信道传输矩阵; $\mathbf{x}$ 是 $M \times 1$ 维的发送向量; $\mathbf{N}$ 是 $N \times 1$ 的接收端的噪声向量。其中 $\mathbf{N}_{\text{AWGN}}$ 代表AWGN接收噪声,并且 $\mathbf{N}_{\text{AIN}}$ 代表加性脉冲干扰噪声。并且平均信道增益为 $G = 1/B \int_0^B |\mathbf{H}(f)|^2 df$ ,可以近似为对数正态分布。对于MIMO的电力线通信系统,其容量可以表示为

$$C_{\text{MIMO}} = BE \left\{ \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I} + \frac{S}{M} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \right\} \quad (6)$$

式中: $E\{\bullet\}$ 代表取均值运算; $\mathbf{I}$ 代表单位矩阵; $B$ 是带宽; $s$ 代表每个比特的平均信噪比; $(\bullet)^H$ 代表共轭转置运算。

另外,除了背景的加性高斯白噪声外,电力线通信系统还会有大幅度、短时间的脉冲噪声,其概率密度函数为

$$p_X(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^m}{m! \sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (7)$$

式中: $A$ 是脉冲噪声的类型,如单位时间的平均脉冲数的积; $\sigma_m^2$ 是噪声的方差,其定义如式(8)所示。

$$\sigma_m^2 = (\sigma_G^2 + \sigma_I^2) \frac{m/A + T}{1 + T} \quad (8)$$

式中, $\sigma_G^2$ 和 $\sigma_I^2$ 分别是高斯噪声和脉冲噪声的方差,并且 $T = \sigma_G^2 / \sigma_I^2$ 是高斯噪声与脉冲噪声方差比。

## 2 基于块对角化预编码方法

本部分是设计块对角化预编码,此算法考虑在发送端对发送信号采用预编码矩阵,则接收到的信号的表示形式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{x} + \mathbf{N} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{T} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 为预编码矩阵,需要考虑的限制条件,即发送的支路数等于接收的支路数。用数学表达式表达为

$$M = \sum_{j=1}^n n_j \quad (10)$$

根据联合处理方案,则在接收端得到的数据为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{R}(\mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{x} + \mathbf{N}) \quad (11)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}$ 是 $M \times 1$ 维的接收数据向量,接收端的均衡矩阵为 $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 。此部分为了得到最优的发送端的矩阵 $\mathbf{T}$ ,使得对其他接收端的干扰为零,可以考虑矩阵 $\mathbf{T}$ 分解列为 $[\mathbf{t}_1^T, \mathbf{t}_2^T, \dots, \mathbf{t}_N^T]^T$ ,并且设接收端的接收矩阵 $\mathbf{R}$ 为共轭对称矩阵,即 $\mathbf{R}\mathbf{R}^H = \mathbf{I}$ 。为了消除接收端间的共信道干扰,提出了必须满足以下条件:

$$\mathbf{H}_i \mathbf{t}_j = 0 \quad i \neq j \quad (12)$$

若  $N=1$ , 此方法可以用信道的伪逆矩阵来实现。而完全的对角化也可以应用在  $N>1$  的情况下, 并且可以简化接收, 这将会以减少吞吐量为代价, 或者以增大发送功率为代价。本文提出的算法以最大化系统的互信息量, 在总的发送功率受限的条件下, 块对角化可以达到的吞吐量为

$$C = \max_{\mathbf{R}, \mathbf{H}_j \mathbf{t}_j = 0} \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{H} \mathbf{T} \mathbf{H}^H \mathbf{T}^H \right| \quad (13)$$

根据其统计特性, 可以得到式(13)的另一种表达形式为

$$C = \max_{\mathbf{R}, \mathbf{H}_j \mathbf{t}_j = 0} \sum_{j=1}^N \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{H}_j \mathbf{t}_j \mathbf{H}_j^H \mathbf{t}_j^H \right| \leq C_s \quad (14)$$

定义

$$\hat{\mathbf{H}}_j = \left[ \mathbf{H}_1^T \cdots \mathbf{H}_{j-1}^T \mathbf{H}_{j+1}^T \cdots \mathbf{H}_K^T \right]^T \quad (15)$$

式(13)中,  $C_s$  代表系统的最大容量。零干扰的限制条件使得  $\mathbf{t}_j$  在  $\hat{\mathbf{H}}_j$  的零空间。这个定义使得所有的接收端能够符合零干扰的限制。数据发送给接收端  $j$ , 如果  $\text{rank}(\hat{\mathbf{H}}_j) < M$ , 则能够满足干扰为零的条件。故对于任意的一个  $\mathbf{H}_j$ , 块对角化预编码的条件是

$$M > \max \left\{ \text{rank}(\hat{\mathbf{H}}_1) \cdots \text{rank}(\hat{\mathbf{H}}_K) \right\} \quad (16)$$

如果维数条件满足所有的接收端, 则可以对  $\hat{\mathbf{H}}_j$  进行特征值(SVD)分解, 可以得到

$$\hat{\mathbf{H}}_j = \tilde{\mathbf{U}}_j \tilde{\mathbf{\Xi}}_j \left[ \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)H} \right]^H \quad (17)$$

式中:  $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$  为前  $L_j$  个右奇异向量; 并且  $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$  是最后的  $(M-L_j)$  个右奇异向量。因此,  $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$  是  $\hat{\mathbf{H}}_j$  零空间的正交基, 故如果独立条件均满足的情况下, 可以定义矩阵

$$\mathbf{H}' = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{H}_N \tilde{\mathbf{V}}_N^{(0)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

对  $\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$  进行 SVD 分解则可以得到

$$\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}_j \begin{bmatrix} \Xi & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_j^{(1)} & \mathbf{V}_j^{(0)} \end{bmatrix}^H \quad (19)$$

可以得到最终的预编码矩阵

$$\mathbf{T} = \left[ \tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} \mathbf{V}_1^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_2^{(0)} \mathbf{V}_2^{(1)} \cdots \tilde{\mathbf{V}}_N^{(0)} \mathbf{V}_N^{(1)} \right] \mathbf{\Delta}^{1/2} \quad (20)$$

根据以上的虚数, 可以在总功率  $P$  受限条件下,  $\mathbf{\Delta}$  采用最优的功率分配方式即功率注水算法, 具体详见文献[8], 则块对角化预编码方法可以总结为以下流程:

1) For  $j=1, \dots, K$

利用式(17)计算  $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)}$ , 即  $\hat{\mathbf{H}}_j$  的右零空间。

计算 SVD 分解(利用式(19))。

$$\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(0)} = \mathbf{U}_j \begin{bmatrix} \Xi & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_j^{(1)} & \mathbf{V}_j^{(0)} \end{bmatrix}^H$$

2) 在总功率  $P$  受限的条件下, 用功率注水算法计算最优的矩阵  $\mathbf{\Delta}$ 。

3) 设置预编码。

$$\mathbf{T} = \left[ \tilde{\mathbf{V}}_1^{(0)} \mathbf{V}_1^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_2^{(0)} \mathbf{V}_2^{(1)} \cdots \tilde{\mathbf{V}}_N^{(0)} \mathbf{V}_N^{(1)} \right] \mathbf{\Delta}^{1/2}.$$

### 3 仿真结果

在本部分, 所提方案和其他三种方案的性能进行了对比:

1) 不采用信号处理方式消除脉冲干扰, 在图 2 和图 3 中记为“未消除脉冲噪声”<sup>[9]</sup>;

2) 传统的用非线性处理手段, 经过迭代的方法消除脉冲噪声干扰方法, 在图 2、图 3 中记为“传统非线性方法”<sup>[10]</sup>;

3) 用传统的线性处理方法, 即在接收端采用均衡模式的方法, 在图 2、图 3 中记为“传统线性方法”<sup>[8]</sup>。

在仿真中, 根据文献[8]的仿真定义, 仿真了三种已有方案与本方法的误比特性能的曲线, 其中调制方式采用 QPSK, 快速傅里叶变换采用 128 位, 信道编码采用码率为 1/2 的卷积码, 数据位为 72 位, 非数据位为 56 位, 由图 2 可以看出, 随着发送功率增加, 其 BER 随之下降, 误比特性能为  $10^{-3}$  的情况下, 本文所提方案相对于传统非线性方案提高 2 dB。

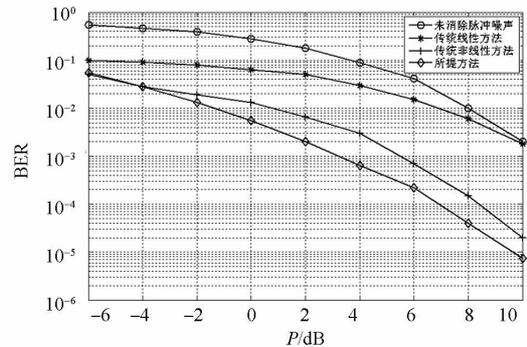


图 2 四种方案的 BER 对比(QPSK)

Fig. 2 BER comparison of four scenarios (QPSK)

图 3 为调制方式采用 16-QAM 的条件下, 快速傅里叶变换采用 128 位, 信道编码采用码率为 1/2 的卷积码、数据位为 72 位、非数据位为 56 位, 随着发送功率增加误比特性能的变化曲线图。从图 3

中可以看出,随着平均 SNR 的增加,其他三种方案均处于下降趋势,而在误比特性能为 $10^{-3}$ 的情况下,本文所提方案相对于传统非线性方案有 12 dB 的增益。通过图 2、图 3 的对比可以看出,本方案在调制阶数较小的情况下,带来的增益较大。

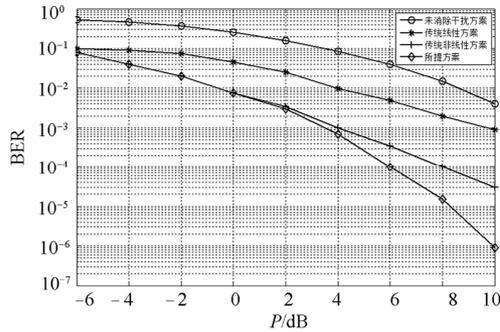


图 3 四种方案的误码率对比(16-QAM)

Fig. 3 Error rates comparison of four scenarios (16-QAM)

#### 4 结论

本文针对多个接收端的共信道干扰的问题,提出了不同接收端零干扰的块对角化预编码方法,此方法从仿真结果看,从系统的最大互信息和误比特性能对比其他三种方案,有较大的优势。当然,本文没有考虑信道状态信息的不理想状态,可以在后续的研究中完善。

#### 参考文献

[1] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.  
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.

[2] 王峰, 张弛, 贺春, 等. 一种继电保护故障信息系统在线通信报文分析工程方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 151-155.  
WANG Feng, ZHANG Chi, HE Chun, et al. A scheme of online communication message analysis for protection relay fault information system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 151-155.

[3] 余萍, 薛玉娟, 董保国. 基于Mesh 的变电站临时通信系统传播路径损耗的预测分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 117-122.

YU Ping, XUE Yujuan, DONG Baoguo. Prediction and analysis of the path loss in temporary communication system of substation based on mesh network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 117-122.

[4] 于艳君, 柴凤, 欧景, 等. 基于旋转高频信号法的IPMSM 无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 26-31.  
YU Yanjun, CHAI Feng, OU Jing, et al. Position sensorless control of IPMSM based on rotating high frequency signal method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 26-31.

[5] 吴胜华, 钟炎平, 赖向东, 等. 高频链矩阵式正弦波变换器控制策略的改进[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 228-233.  
WU Shenghua, ZHONG Yanping, LAI Xiangdong, et al. Improvement of control strategy for matrix sinusoidal converter with high frequency link[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 228-233.

[6] 邵明松, 黄松岭, 赵伟. 无极灯系统的建模与分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 13-19.  
SHAO Mingsong, HUANG Songling, ZHAO Wei. Modeling and analysis of electrodeless lamp system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 13-19.

[7] NASSAR M, DABAK A, KIM I, et al. Cyclostationary noise modeling in narrowband powerline communication for smart grid applications[C] // Proc IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Sig Proc, 2012: 3089-3092.

[8] AL-DWEIK A, HAZMI A, SHARIF B, et al. Efficient interleaving technique for OFDM system over impulsive noise channels[C] // Proc IEEE Int Symp Pers Indoor and Mobile Radio Comm, 2010.

[9] NIEMAN K F, LIN J, NASSAR M, et al. Cyclic spectral analysis of power line noise in the 3-200 kHz band[C] // Proc IEEE Int Symp Power Line Comm and Appl, 2013.

[10] NASSAR M, LIN J, MORTAZAVI Y, et al. Local utility power line communications in the 3-500 kHz band: channel impairments, noise, and standards[C] // IEEE Sig Proc Mag.

收稿日期: 2014-04-24; 修回日期: 2014-07-15

作者简介:

伍韵文(1989-), 男, 本科, 初级工程师, 研究方向为电力线宽带通信。E-mail: ywwu03@126.com