

电力线 OFDM 的压缩感知均衡消噪方法

马晓奇, 邵滨, 崔宇, 孙长河

(辽宁省电力公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 电力线载波通信 (PLC, Power Line Communication) 技术被广泛地应用在电力数据采集系统中, 大部分采用正交频分复用 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技术, 而电力线中的异步脉冲噪声和周期脉冲噪声对 OFDM 电力线系统的性能影响很大, 特别是对系统的可靠性影响最大, 造成系统的误比特率上升。针对此问题, 利用 OFDM 信号的时域稀疏性, 在接收端对发送信号进行消除脉冲噪声处理, 减小接收端计算量, 提高系统的可靠性。通过仿真结果可以表明, 所提的均衡方案有效消除了脉冲噪声的影响, 同时降低了误码率。

关键词: 电力线载波; 脉冲噪声; 均衡; 误比特率; 正交频分复用

Equalizing method of eliminating impulse noise for OFDM PLC system

MA Xiao-qi, SHAO Bin, CUI Yu, SUN Chang-he

(Electric Power Company of Liaoning Province, Shenyang 110000, China)

Abstract: Power Line carrier Communication (PLC) technology is widely used in electric power data acquisition system, most of them adopt Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technology, and the asynchronous pulse noise and periodic impulse noise in the power line have a great influence on the performance of OFDM power system, especially the greatest influence on the reliability of the system, due to the bit error rate of the system. Aiming at this problem, this paper uses OFDM signal sparse time-domain, eliminates impulse noise on the sending signal in the receiving terminal, and reduces the the calculation amount of the receiver, which improves the reliability of the system. The simulation results show that the proposed equalizing scheme eliminates the influence of impulse noise effectively and reduces the bit error rate.

Key words: PLC; impulse noise; equalizing; BER; OFDM

中图分类号: TM932

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)15-0113-04

0 引言

智能电网是一个智能能量传输网络, 其包括通信和计算网络, 而智能电网中的通信网络一般是多种通信技术 (从无线通信到光纤通信) 的集合。其中, 电力线载波技术以其高覆盖率、低铺设成本等优势, 成为智能电网应用中的主要组成部分。特别地, 在现有电网中, 对电量的采集分析, 大量用到了电力线载波通信技术。无论是宽带载波通信还是窄带载波通信, 多载波通信技术被广泛的应用, 而其中正交频分复用技术以其高频谱利用率的的优势, 被大量的应用^[1-2]。

电力线通信分为宽带电力线通信和窄带电力线通信, 而无论宽带电力线通信还是窄带电力线通信均采用多载波的通信方式, 其中采用最广泛的是正交频分复用技术, 来对抗频率选择性衰落和信道干

扰噪声。然而在电力线通信系统中最主要的挑战就是克服电力线的加性噪声, 其中不但包括加性高斯白噪声, 还包括由于电气设备接入所带来的脉冲噪声^[3]。在这两种噪声中, 脉冲噪声由于其自身高功率的特点, 对通信系统干扰大, 成为阻碍电力线通信性能提升的重要因素。一方面, 商用的电力线通信调制均是低功率传输, 所以脉冲干扰成为可以左右通信的关键因素; 另一方面, 脉冲干扰的随机特性与加性高斯白噪声有很大不同, 所以传统的以加性高斯白噪声为前提条件进行优化的接收端已经不再适用于电力线通信中^[4-6]。

许多不同脉冲干扰的随机模型被提出, 并且应用到了改善电力线载波通信中, 当确定了一种随机模型后, 可以采用滤波器、均衡、解码等方式进行优化, 以提高系统的可靠性, 然而这些均需要有训练序列的开销。本文采用压缩感知的方法, 在发送

端采用脉冲干扰消除的方法, 有效消除了脉冲噪声, 从而提高系统的稳定性, 降低系统的误比特率。

1 系统模型

本文所采用的系统模型, 是建立在经典 OFDM 传输模型上的 (见图 1), 其传输过程如下所示: 设 OFDM 系统共有 N 个子载波, 系统带宽为 W Hz, 信号长度为 TS 秒, 循环前缀 CP 的长度为 T_{cp} , 即一个 OFDM 帧的传输时间是 $T = TS + T_{cp}$, 考虑到循环前缀的影响, 发送端发送的第 k 个载波的波形可以表示为

$$\phi_k(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{TS}} \exp\left[j2\pi\frac{W}{N}k(t-T_{cp})\right] & t \in [0, T] \\ 0 & t \notin [0, T] \end{cases} \quad (1)$$

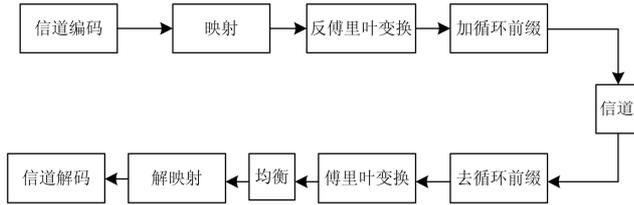


图 1 经典 OFDM 传输系统框图

Fig. 1 Traditional OFDM transmission system

当 $t \in [0, T_{cp}]$ 时, 有 $\phi_k(t) = \phi_k(t + N/W) = \phi_k(t + TS)$, 由此可以看出循环前缀的作用, 它使得信号在一定的时间内看上去具有周期性。这样第 i 个 OFDM 帧信号的调制后的波形可以表示为

$$s_i(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_i(k) \phi_k(t - iT) \quad (2)$$

当传输的是一个无限的 OFDM 信号序列时, OFDM 已调信号波形可以表示为

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} s_i(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_i(k) \phi_k(t - iT) \quad (3)$$

经过信道, 假设信道的冲击响应 $g(\tau; t)$ 的时延小于循环前缀 CP, 即 $\tau \in [0, T_{cp}]$, 则接收机收到的信号为

$$r(t) = (g \otimes s)(t) = \int_0^{T_{cp}} g(\tau; t) s(t - \tau) d\tau + \tilde{n}(t) \quad (4)$$

其中, $\tilde{n}(t)$ 代表信道加性噪声。

在接收机部分, OFDM 接收机由一个滤波器组成, 其中第 k 个滤波器与传输载波波形 $\phi_k(t)$ 的后面部分 $[T_{cp}, T]$ 相匹配, 即

$$\Psi_k(t) = \begin{cases} \phi_k^*(T-t) & t \in [0, TS] \\ 0 & t \notin [0, TS] \end{cases} \quad (5)$$

由式 (5) 可以看出循环前缀 CP 已经被删除。由于 CP 包含了所有的码间干扰, 所以接收机滤波器组的抽样输出将不包含码间干扰。警告过一系列的滤波器组的滤波后可以得到简化的输出为

$$y_k = \sum_{k'=0}^{N-1} X(k') \int_{T_{cp}}^T \frac{\exp(j2\pi k'(t-T_{cp})W/N)}{\sqrt{TS}} h_k \phi_k^*(t) dt + \int_{T_{cp}}^T \tilde{n}(T-t) \phi_k^*(t) dt \quad (6)$$

去除循环前缀后得到 OFDM 信号, 记为 r , 其表达式为

$$r = \mathbf{H}\mathbf{F}^* \mathbf{x} + \mathbf{e} + \mathbf{n} \quad (7)$$

其中: \mathbf{F} 是 N 点离散傅里叶矩阵; \mathbf{H} 是信道的卷积矩阵; \mathbf{e} 为脉冲干扰, 其包括两部分, 第一部分为异步脉冲干扰, 第二部分为周期脉冲干扰; \mathbf{n} 为加性高斯白噪声; 信号 r 经过离散傅里叶变换, 得到信号 y , 其表达式为

$$y = \mathbf{F}\mathbf{H}\mathbf{F}^* \mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{e} + \mathbf{F}\mathbf{n} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{e} + \mathbf{g} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{A} \triangleq \mathbf{F}\mathbf{H}\mathbf{F}^*$, 为对角矩阵; $\mathbf{g} = \mathbf{F}\mathbf{n}$ 是加性高斯白噪声的离散傅里叶变换。对信号 y 中的白噪声进行预消除, 得到 \hat{y} , 其表达式为

$$\hat{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{e} \quad (9)$$

2 基于压缩感知的均衡算法

接收端对脉冲干扰 \mathbf{e} 按照线性回归算法进行估计, 其线性估计表达式为

$$\mathbf{t} = \Phi \mathbf{w} + \mathbf{v} \quad (10)$$

其中: \mathbf{t} 为观测向量, 即脉冲干扰 \mathbf{e} ; Φ 为完备的正交基; \mathbf{w} 为稀疏比重向量; 线性回归估计的稀疏比重向量 \mathbf{w} , 估计其方差 Γ 。

根据稀疏贝叶斯学习算法, 参数 \mathbf{w} 高斯先验概率表示为

$$p(\mathbf{w}; \Gamma) = cN(\mathbf{w}; \mathbf{0}, \Gamma) \quad (11)$$

其中: $p(\bullet)$ 代表概率; $cN(\bullet)$ 代表复高斯分布; $\Gamma \triangleq \text{diag}\{\gamma\}$, 为对角矩阵, 并且 $\gamma \in \mathfrak{R}^N$, 其中 γ_i 是第 i 个元素 w_i 的方差。给定的先验概率, 根据观测数据的似然分布可以表达为

$$p(\mathbf{t}; \Gamma, \sigma^2) = cN(\mathbf{t}; \mathbf{0}, \Phi \Gamma \Phi^* + \sigma^2 \mathbf{I}_M) \quad (12)$$

最大似然估计需要得到 γ 和 σ^2 最大化上式的 $p(\mathbf{t}; \Gamma, \sigma^2)$ 。通过迭代方法估计计算其数学期望最大化。给定观测值和估计的 γ 和 σ^2 , 则脉冲干扰 \mathbf{e} 分布服从高斯分布, 其分布可以表达为

$$p(\mathbf{w} | \mathbf{t}; \Gamma, \sigma^2) = cN(\mathbf{w}; \boldsymbol{\mu}_w, \boldsymbol{\Sigma}_w) \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\mu}_w = \sigma^{-2} \boldsymbol{\Sigma}_w \boldsymbol{\Phi}^* \boldsymbol{t} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_w = \left(\sigma^{-2} \boldsymbol{\Phi}^* \boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \right)^{-1} \quad (15)$$

w 最大后验概率估计是后验概率均值 $\boldsymbol{\mu}_w$ 。

$\boldsymbol{\Gamma}$ 先验概率信息, 定义其等效矩阵 $\boldsymbol{\tau} \triangleq \boldsymbol{\Gamma}^{-1}$, $\boldsymbol{\varphi} \triangleq [\varphi_1, \dots, \varphi_N]^T$ 代表 $\boldsymbol{\varphi}$ 的对角矩阵, $\boldsymbol{\varphi}$ 的共轭先验概率是服从伽玛分布^[7]

$$P(\boldsymbol{\tau}; \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) = \prod_{i=1}^N Ga(\tau_i; a_i, b_i) \quad (16)$$

其中伽玛分布的参数 \boldsymbol{a} 和 \boldsymbol{b} , 当 a_i 和 b_i 为非零的值, 则似然概率可以表示为

$$p(\boldsymbol{z}; \boldsymbol{\tau}, \sigma^2, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) = cN(\boldsymbol{z}; 0, F_r \boldsymbol{\tau}^{-1} F_r^* + \sigma^2 \boldsymbol{I}_M) \times Ga(\boldsymbol{P}; \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) \quad (17)$$

最大化上式, 可以得到 τ_i 的最大后验概率为

$$\tau_i = \gamma_i^{-1} = \frac{1 + 2a_i}{\boldsymbol{\mu}_{e,i}^2 + \boldsymbol{\Sigma}_{e,ii} + 2b_i} \quad (18)$$

比较上式, 其 $\boldsymbol{\tau}$ 给定 \boldsymbol{e} 、 \boldsymbol{a} 和 \boldsymbol{b} 后验概率符合伽玛分布, 其分布可以表示为

$$P(\boldsymbol{\tau} | \boldsymbol{e}; \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}) = \prod_{i=1}^N Ga(\tau_i; \tilde{a}_i, \tilde{b}_i) \quad (19)$$

根据以下参数进行更新迭代

$$\tilde{a}_i = a_i + \frac{1}{2} \quad (20)$$

$$\tilde{b}_i = b_i + \frac{|e_i|^2}{2} \quad (21)$$

根据观测向量 \boldsymbol{t} 和 $\hat{\boldsymbol{c}}$ 构造接收估计向量 $\hat{\boldsymbol{r}}$; 接着根据接收估计向量 $\hat{\boldsymbol{r}}$ 得到脉冲噪声估计量 $\hat{\boldsymbol{e}}$ 。

为了进一步说明本方案的复杂度, 表 1 给出了本方案的编码计算量; 表 2 比较了本方法与传统方案^[10]的编码计算量, 计算量的单位是每秒浮点运算次数 (Floating-point Operations Per Second, flops), 即一次复数乘法运算需要 6 次 flops 操作, 一次复数加法运算需要 2 次 flops 操作。比较可得, 本方案的复杂度都与 N^2M 、 N^2K 及 K^3 呈线性关系, 即本方案与已有的方案相比复杂度在同一个数量级。

表 1 本方案的复杂度

Table 1 Complexity of the scheme

步骤	复杂度 (flops)
步骤一	$5N^2K$
步骤二	$8N_3K - 4K_3$
步骤三	$2N^2K$
步骤四	$2K^3$
步骤五	$5N_3K - 4K_3$
步骤六	$N^2K + 8K^2$
总计	$18N_3K + 4K_3 - 4N_3$

表 2 两种方案的复杂度比较

Table 2 Complexity comparison of two schemes

方案	复杂度 (flops)
本方案	$18N^2K + 4K^2 - NM^2$
已有方案	$5N_3K + 8K_3 - 4N_3$

3 仿真结果

在本部分, 所提方案和以下三个方案进行了对比:

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”^[8];

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 和图 3 中记为“传统非线性方法”^[9];

3) 用传统的线性处理方法, 没有采用压缩感知的线性方法, 在图 2 和图 3 中记为“传统线性方法”^[10]。

在仿真中, 根据文献[10]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。

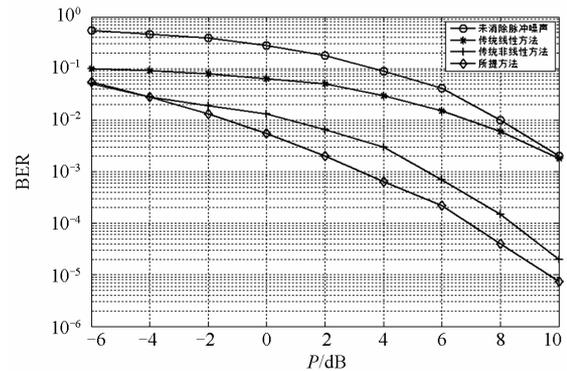


图 2 四种方案的 BER 对比 (QPSK)

Fig. 2 BER comparison of four scenarios

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 和图 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。

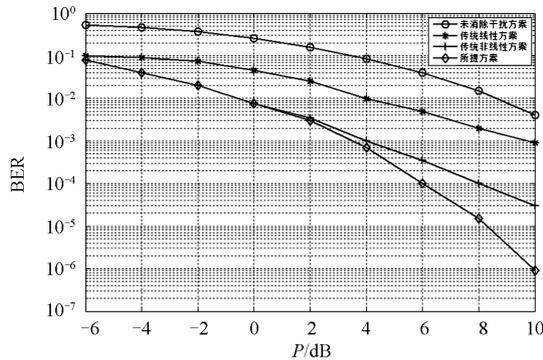


图3 四种方案的误码率对比 (16-QAM)

Fig. 3 Error rates comparison of four scenarios

4 结论

本文提出了电力线载波通信中,OFDM系统中,消除脉冲噪声的均衡方案,此方案消除脉冲噪声的效果明显,并且BER的性能也高于其他方案,在接下来的工作中,将继续优化其计算复杂度。

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 Jian-hua, 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 Yu-juan, DONG Bao-guo. 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 Yan-jun, 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 Sheng-hua, ZHONG Yan-ping, LAI Xiang-dong, 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 Ming-song, HUANG Song-ling, 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] 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.
- [9] NASSAR M, LIN J, MORTAZAVI Y, et al. Local utility power line communications in the 3-500 kHz band: channel impairments, noise, and standards[J]. IEEE Sig Proc Mag, 2012, 29(5): 116-127.
- [10] DWEIK A 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.

收稿日期: 2013-10-10; 修回日期: 2014-02-22

作者简介:

马晓奇(1967-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力线通信方面的研究。E-mail: andyzhaoster@163.com