

电力线载波通信中减小 PAPR 的预编码方法

胡博, 宫庆申, 赵宇东, 康丽雁

(辽宁省供电公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 为了提高电力线载波通信的可靠性和有效性, 提出一种在发送设备端进行的信号处理方法, 即相位调整预编码方法。利用了发送多个载波信号相位改变的不同, 可以改变多个载波信号叠加功率和, 从而减少电力线载波通信的峰均比。分析了峰均比形成的原因, 提出了以最小化发送功率为目标函数, 求解每个载波发送相位的优化问题。仿真结果表明, 该预编码方法能够有效抑制电力线载波通信中过高的峰均比问题, 在不增加复杂度的前提下, 有效提高了通信的可靠性, 证明了该方法的正确性和有效性。

关键词: 电力线载波; 相位调整; 预编码; 峰均比

Precoding method for PLC system of reducing PAPR

HU Bo, GONG Qing-shen, ZHAO Yu-dong, KANG Li-yan

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

Abstract: In order to improve the reliability and effectiveness of the power line carrier communication, this paper proposes a signal processing method conducted at sending device terminal, i.e. phase adjustment precoding method. By using that the phase change of sending multiple carrier signal is different, it can change the superposition power of multiple carrier signal, thus reduce the peak-to-average ratio (PAR) of power line carrier communication. It analyzes the causes of the formation of PAR, and puts forward an optimization problem to solve each carrier sending phase by minimizing sending power as the objective function. Simulation results show that the precoding method can effectively restrain the high PAR problem of power line carrier communication and improve the reliability of the communication without any increase of complexity, which proves the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: PLC; phase adjustment; precoding; PAPR

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)16-0108-04

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优点, 被大量的应用^[1-2]。

然而正交频分复用技术及应用方面有一个很大的挑战就是峰均比的问题, 较高的峰均比不但造成传输效率下降, 而且在硬件实现上, 也会带来大的挑战^[3-4]。

PAPR 的减小问题已经不是一个新的问题, 许多的文献提出了不同的方法来解决 PAPR 高的问题, 其可以分为以下几类: (1) 在时域下调整 OFDM 符号, 达到减小 PAPR 的目的; (2) 选择映射方式和发送序列, 达到减小 PAPR 的目的; (3) 一些非线性的信号处理方法如压缩 OFDM 信号的方法^[5]。

然而这些方法均是以牺牲信道带宽为代价的, 为了消除这个影响, 本文拟用调整每个子载波信号的相位, 扩展调制信号的星座图, 但是由于扩展调制信号的星座图, 会造成提高发送的平均功率。同时为了调整子载波信号, 会造成计算复杂度的提升。本文采用相位旋转的方式, 可以减少发送的平均功率; 同时可以采用简化的相位旋转的相位点, 从而减少了计算复杂度^[6]。

本文采用固定的相位旋转方案, 在发送端进行信号处理, 故称之为预编码。此预编码方案, 采用

线性优化, 通过推导, 得到了最优的预编码方案, 通过预编码方案, 可以得到降低的 PAPR 的互补累计分布函数 (CCDF, Complementary Cumulative Distribution Function), 从中可以看出本方案在减小 PAPR 的优势, 同时也对比了误比特性能, 从而体现出本方案的优势。

1 系统模型

类似文献[7], 所提方案的 OFDM 传输系统如图 1 所示, 考虑在一个子载波数据块包括 N 个数据符号, 其在复数 QAM 星座图 T_k 中取得的, 可以表示为 $\{X_k | X_k \in T_k\}$, 则时域 OFDM 基带信号可以表示为

$$x\left[\frac{n}{L}\right] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/NL}, n = 0, \dots, NL-1 \quad (1)$$

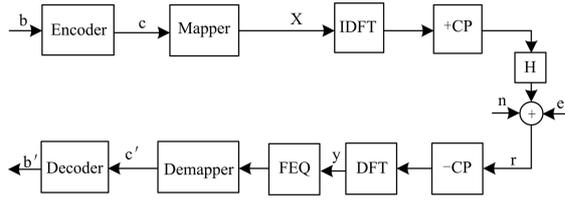


图 1 OFDM 传输系统框图

Fig. 1 OFDM transmission system

则其 PAPR 可以计算为

$$PAPR(x[n/L]) = \frac{\max_n |x[n/L]|^2}{\frac{1}{NL} \sum_{n=0}^{NL-1} |x[n/L]|^2} \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 当 $L=1$ 时, 其 PAPR 的值是最大的, 为了达到降低 PAPR 的目的, 只有最小化式 (2) 的分子, 其思路为调整数据的 OFDM 的符号, 其可以表示为

$$\{Y_k = X_k + Z_k\}_{k=0}^{N-1} \quad (3)$$

其中, Y_k 来代替原始信号 X_k , 用时域的波形表示为

$$y\left[\frac{n}{L}\right] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} (X_k + Z_k) e^{j2\pi kn/NL} \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 决定 Z_k 是算法的关键所在, 任意的制定 Z_k , 会使得在接收端判别信号 X_k , 故可以简化为

$$Z_k = C_k r_k + jC_k s_k \quad (5)$$

其中, C_k 为星座扩展的距离, C_k 可以表示成为

$$C_k = \lambda \sigma_k \sqrt{M_k} \quad (6)$$

其中: M_k 代表 QAM 星座图中星座点的个数; 而 σ_k

代表每个星座点之间最短距离; 而 λ 为大于 1 的实数, 作为其尺度参数。而式 (5) 中的 r_k 和 s_k 的取值分别为 $-1, 0, +1$; 根据推算可以得到, 其将 X_k 的星座图拓展了, 根据调制原理, 其误比特率由星座间不同距离的最小值决定, 故可以看出, 其最小值不变, 没有改变 BER 的性能。在接收端, 采用球形解码算法, 可以得到 X_k 。由于接收端采用球形解码算法, 其计算复杂度会大幅度的增加。总之, 为了得到较小的 PAPR, 其优化函数可以表示为

$$\begin{aligned} \min_{\{r_k, s_k\}} \max_n |y[n/L]|^2 \\ \text{s.t. } r_k, s_k \in \{-1, 0, +1\} \end{aligned} \quad (7)$$

由于这是个 N-P 难的优化问题, 所以所有的优化方案均是在计算复杂度和降低 PAPR 的折中。为了下一部分说明方案方便, 这里讲上述的过程, 用向量和矩阵表示, 定义频域的符号用 \tilde{x} 表示, 而时域的波形用 \mathbf{x} 表示, 而用 $\mathbf{x}_{\text{Re}} = \text{Real}\{\mathbf{x}\}$, $\mathbf{x}_{\text{Im}} = \text{Imag}\{\mathbf{x}\}$, 则向量中的第 k 个元素可以表示 x_k , 则公式 (4) 可以写成矩阵形式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}^T \tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{W}^T (\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\mathbf{r} + j\mathbf{D}\mathbf{s}) \quad (8)$$

其中, \mathbf{y} 为一个复数向量, 其维数为 $NL \times 1$, 定义 $\mathbf{y}_n = y[n/L]$, 而 \mathbf{W}^T 代表傅里叶变换矩阵, 其中其第 n 行第 k 列的元素为 $W_{n,k}^T$, 其表达式为

$$W_{n,k}^T = \sqrt{\frac{1}{N}} e^{j2\pi nk/NL} \quad (9)$$

其中: $W_{n,k}^T$ 的维数为 $NL \times N$; 并且 \mathbf{D} 是一个对角矩阵, \mathbf{D}_k 代表其第 k 个对角元素。由式 (8) 可以经过一系列的恒等变换, 得到

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}^T \tilde{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} \mathbf{W}^T \mathbf{D} & j\mathbf{W}^T \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

令 $\mathbf{Q}^C = \mathbf{W}^T \tilde{\mathbf{x}}$, 并且 $\mathbf{Q}^D = \begin{bmatrix} \mathbf{W}^T \mathbf{D} & j\mathbf{W}^T \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$, 可以看出, \mathbf{Q}^C 是为数据进行傅里叶变换, 是一个常数。而 $\mathbf{Q}^D = \begin{bmatrix} \mathbf{W}^T \mathbf{D} & j\mathbf{W}^T \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ 为对数据的调整, 而这种调整均与 \mathbf{r} 和 \mathbf{s} 有关。

2 相位调整预编码算法

对式 (10) 中的发送向量 \mathbf{y} 进行预编码, 使得 PAPR 进一步减小, 其表达式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}\tilde{\mathbf{y}} \quad (11)$$

根据系统模型中公式 (10) 可以得到经过预编码的矩阵可以表示为

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} f_1(\theta) & 0 \\ 0 & f_2(\theta) \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{y}} \quad (12)$$

其中, $f_1(\theta)$ 和 $f_2(\theta)$ 分别代表相位旋转的函数, 它们也是一个对角矩阵, 其旋转的角度, 应该按照最优化理论归结为

$$\begin{aligned} \min_{\{f_1(\theta), f_2(\theta)\}} \max_{\theta} \|\mathbf{y}\|^2 \\ \text{s.t. } f_1(\theta), f_2(\theta) \text{ 为对角矩阵} \end{aligned} \quad (13)$$

根据式 (13) 中的优化问题, 为后续的优化表达方便, 可以将 $f_1(\theta)$ 和 $f_2(\theta)$ 分别表示为对角矩阵, 其具体表达式为

$$f_1(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j\theta_1} & & \\ & \ddots & \\ & & e^{j\theta_N} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$f_2(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j\beta_1} & & \\ & \ddots & \\ & & e^{j\beta_N} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由此可以得到, 优化 $f_1(\theta)$ 和 $f_2(\theta)$ 最终是优化每个对角元素中的 $\theta_i (i=1, \dots, N)$ 和 $\beta_i (i=1, \dots, N)$, 以达到降低 PAPR 的作用。

为了简化分析, 设 $\theta_i (i=1, \dots, N)$ 和 $\beta_i (i=1, \dots, N)$ 为锐角和直角, 如果是钝角, 可以用 $\pi - \theta_i$ 和 $\pi - \beta_i$ 来代替。由于 $\tilde{\mathbf{y}}$ 为复数, 故可以分解为 $\mathbf{y}_{\text{Re}} = \text{Real}\{\mathbf{y}\}$ 和 $\mathbf{y}_{\text{Im}} = \text{Imag}\{\mathbf{y}\}$, 则 $\|\mathbf{y}\|^2$ 可以表示为

$$\|\mathbf{y}\|^2 = \max_{\substack{\tilde{x}_{\text{Re}}, \tilde{x}_{\text{Im}} \in \mathcal{Q} \\ \tilde{x}_{\text{Im}} \neq \tilde{x}_{\text{Re}}}} \left\| \begin{bmatrix} f_1(\theta) & f_2(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{\text{Re}} \\ \mathbf{y}_{\text{Im}} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (16)$$

其中, \tilde{x}_{Re} 和 \tilde{x}_{Im} 分别为 MQAM 的信号实部和虚部。为了方便推导, 设 MQAM 的信号实部和虚部的取值集合为 $A = \left\{ \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \dots, \pm \frac{2M-1}{2} \right\}$, 所以对式 (16) 求最小值, 根据柯西—许瓦兹不等式, 可以得到

$$\|\mathbf{y}\|^2 \leq \|f_1(\theta)\mathbf{y}_{\text{Re}}\|^2 + \|f_2(\theta)\mathbf{y}_{\text{Im}}\|^2 \quad (17)$$

根据式 (17) 可以看出, 需要满足

$$\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_N = \frac{\pi}{2} \quad (18)$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_N = \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

或者

$$|-\pi + \theta_i| = \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

$$|-\pi + \beta_i| = \frac{\pi}{2} \quad (21)$$

为了解决此问题, 可以构建接收端和发送端均

符合的序列来调整相位, 从而达到降低 PAPR 的作用, 此序列最好为伪随机序列, 这样对于接收非常有利, 可以避免相关载波的干扰, 本文在方案中采用了 Gloden 序列, 当然, 构造较为符合降低 PAPR 的序列也是需要研究的, 本文将在后续的研究中不断深入。

为了进一步说明本方案的复杂度, 表 1 比较了本方法与传统方案的编码计算量, 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, 本方案的复杂度与其他方案相当。

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降低 PAPR 的方法, 在图 2 和图 3 中记为“非降低”^[8];
- 2) 传统的用非线性处理手段, 经过迭代的方法降低 PAPR 的方法, 在图 2、图 3 中记为“传统非线性方法”^[9];
- 3) 用传统的线性处理方法, 没有采用相位调整的线性方法, 在图 2、图 3 中记为“传统线性方法”^[10]。

在仿真中, $N=64$ 和 $N=128$, $L=2$, 所使用调制方式为 16-QAM, 根据文献[10]的仿真定义, 用互补累积分布函数来对比降低 PAPR, 从图 2 中可以看出, $N=64$ 在 CCDF 为 10^{-3} 情况下, 与传统非线性方法相比至少有 1.5 dB 的增益; 与传统线性方法相比, 至少有 3 dB 的增益。从中可以看出, 本文所提方案在降低 PAPR 的效果明显, 可以看出相位对 PAPR 的影响很大。

图 3 为随着发送功率增加, 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,

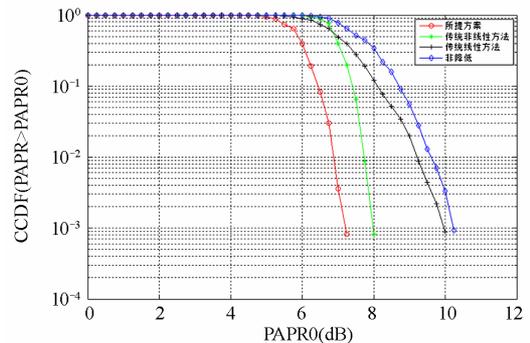


图 2 四种方案的 PAPR 的 CCDF 对比

Fig. 2 CCDF comparison of four scenarios

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 2 dB 的增益。

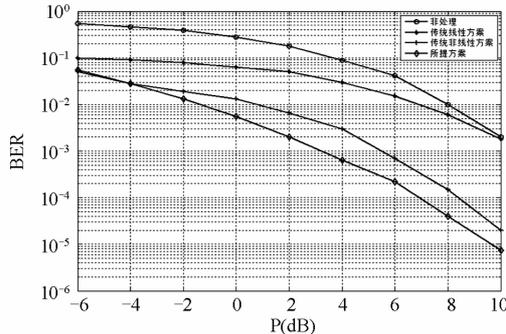


图 3 四种方案的误码率对比

Fig. 3 Error rates comparison of four scenarios

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。本方案的复杂度与其他三种方案对比,比较可得表 1,本方案和文献[8, 10]的计算复杂度相当,明显低于文献[9]的计算复杂度。仿真结果和计算复杂度比较均体现本方案的优势。

表 1 四种方案的复杂度比较

Table 1 Complexity comparison of four schemes

方案	复杂度 (flops)
本方案	$5NK^2 + N^2 + NM^2$
文献[8]方案	$2N^2K + 8K^2 - N^2$
文献[9]方案	$9NK^2 + 2NM^2 + N^2$
文献[10]方案	$4NK^2 + 2NM^2 - N^2$

4 结论

本文提出了电力线载波通信中,OFDM 系统中,降低 PAPR 的相位调整方案,此方案在降低 PAPR 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,将继续深化对相位调整序列的设计。

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.
- [10] 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.

收稿日期: 2013-11-02; 修回日期: 2013-12-30

作者简介:

胡 博 (1971-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力信息化方面的研究。E-mail: 419041627@qq.com