

doi:10.13756/j.gtxyj.2017.02.002

光通信系统与网络技术

基于小波变换的 OFDM 在电力线通信系统中的应用

王 震,王 颖,陈浩哲,卞诗航,丁俊杰,吴 昊,游善红

(苏州大学 电子信息学院,江苏 苏州 215006)

摘要:研究了基于 DWT(小波变换)的 OFDM(正交频分复用)和 FFT(快速傅里叶变换)的 OFDM 两种不同调制方式在 PLC(电力线通信)系统中的性能。首先建立了两种不同调制方式下 PLC 的系统模型,然后在 AWGN(加性高斯白噪声)和子 CFO(载波频率偏移)的干扰下,分析了两种系统的误码性能以及峰均功率比的分布。通过仿真发现,在 PLC 系统中,DWT-OFDM 系统比 FFT-OFDM 系统更具优势,在未来的 PLC 系统中必将发挥重要的作用。

关键词:正交频分复用;离散小波变换;载波频率偏移;电力线通信

中图分类号:TN914.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2017)02-0005-04

Performance Comparison of FFT-OFDM and DWT- based OFDM in PLC

WANG Zhen, WANG Ying, CHEN Hao-zhe, BIAN Shi-hang, DING Jun-jie, WU Hao, YOU Shan-hong

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: We mainly compared the performance of Fast Fourier Transform(FFT) Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Discrete Wavelet Transform(DWT) OFDM in Power Line Communication (PLC). We first shown the PLC channel model. Then the Bit Error Rate(BER) and Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) performances of DWT-OFDM and FFT-OFDM are analyzed with the interference of Additive White Gaussian Noise (AWGN) and Carrier Frequency Offset (CFO). Throughout the simulation, DWT-OFDM is more appropriate to power line communications in the PLC system, which will make significant influence on the PLC in the future.

Key words: OFDM;discrete wavelet transform; carrier frequency offset; power line communication

0 引 言

PLC(电力线通信)是一种利用家庭供电系统中的物理线路作为信息传输媒介的通信技术。根据电力线宽带通信标准 IEEE1901^[1]的规定,在物理层有两种实现方式:基于 FFT(快速傅里叶变换)的传统 OFDM(正交频分复用)和基于 DWT(离散小波变换)的 OFDM。在 FFT-OFDM 中,由于每个符号上的每个子载波信号均为时间有限,而非带宽有限,因此 FFT-OFDM 信号易产生带外辐射,这将在功率谱上引起不可忽略的旁瓣^[2],最终导致 ICI(码间干扰),所以传统的 OFDM 系统为了减少带外辐射,会在外侧的子载波上设置一个保护带宽。同时,为了消除 ISI(符号间干扰),传统的 OFDM 系统还会在每个符号前端,额外地添加 CP(循环前缀)作为保护间隔,以减少带外辐射^[3]。不管是保护带宽还是 CP,都必将影响系统的有效传输带宽,占用频谱资源,从而降低数据传输率。此外,由于 FFT 频谱特性本身较差,导致 FFT-OFDM 对干扰的抵抗能力也不够理想。

相比于传统的 FFT-OFDM 系统, DWT-OFDM 由于小波函数具有良好的尺度与平移正交性,因而可将其作为多载波调制的子载波。由于不需要使用保护带宽和插入 CP,DWT-OFDM 的频谱特性也比其他调制方式要好得多,所以 DWT-OFDM 具有较高的频谱利用率和很好的抗干扰能力^[4]。

本文分别从通信系统的 BER(误码率)和 OFDM 的 PAPR(峰均功率比)两方面来比较 FFT-OFDM 与 DWT-OFDM 两种系统在 PLC 信道下的性能差异。

1 PLC 的 OFDM 系统结构

1.1 OFDM 系统结构原理

两种 OFDM 在 PLC 信道下的系统框图如图 1 所示。在发射端,串行二进制数字信号首先经过 16QAM(正交幅度调制)映射,再进行串/并转换、插入导频序列,然后分别经过 IFFT(快速傅里叶逆变换)和 IDWT(离散小波逆变换)进行调制,将信号由频域转换到时域。需要指出的是,在传统的 OFDM 系统中,需要插入 CP 作为保护间隔,并且 CP 的长

收稿日期:2016-11-18
基金项目:区域光纤通信网与区域新型光通信系统国家重点实验室(北京大学)开放课题;光纤通信技术和网络国家重点实验室开放课题(2013OCTN-02,2015OCTN-02)
作者简介:王震(1990—),男,江苏宿迁人。硕士,主要研究方向为电力线通信技术。

度必须大于信道的最大延迟,这样才能有效地消除 ICI^[5]。随后将已调信号进行并/串转换,送入电力线信道,在 AWGN(加性高斯白噪声)的干扰下进行传输。

接收端与发送端相对应,经过串/并转换、FFT 和 DWT、频域均衡和去除导频,最后经 16QAM 解调得到原始发送信号。

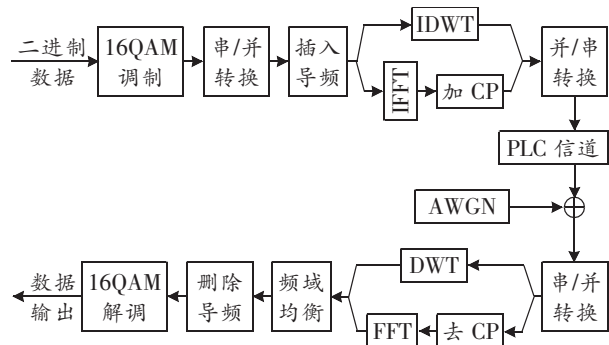


图 1 DWT-OFDM 和 FFT-OFDM 在 PLC 信道下的系统框图

1.2 PLC 信道特性

将电力线作为通信信号的传输媒介时,其具有信号衰减大、噪声干扰强、信道时变和多径传输等特点。根据电力线具有频率选择性衰落的特点,考虑的信号频率范围为 0.5~20 MHz,对电力线信道建模,提出其频率响应表达式^[6]为

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i A(f, d_i) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

式中, i 为路径号; g_i 为路径 i 的加权系数; $A(f, d_i)$ 为衰减系数,其大小由路径长度和频率决定: $A(f, d_i) = e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i}$, 本文取 $k = 1, a_0 = 0, a_1 = 7.8 \times 10^{-10}$; d_i 为路径 i 的长度; τ_i 为路径 i 上的延迟,且有 $\tau_i = d_i \sqrt{\epsilon_i} / c_0$, 其中, c_0 为光速, ϵ_i 为电力线介电常数。具体参数设置如表 1 所示。

表 1 信道的衰减参数

信道参数		
i	g_i	d_i / m
1	0.642	120
2	0.825	140
3	-0.038	160
4	-0.369	180

实践证明该模型是有效可靠的,能够很好地表征电力线信道的传输特性。

4 径电力线信道的幅频响应如图 2 所示。由图可以看出,随着频率的增大,衰减也在增大,并且显现出频率选择性衰落的特点。

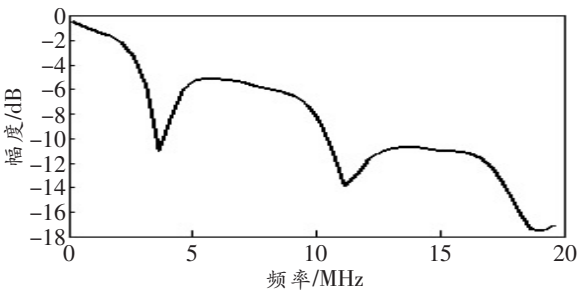


图 2 电力线信道的幅频响应

2 仿真结果与性能分析

在 MATLAB 仿真环境下,分别运用 FFT-OFDM 和 DWT-OFDM 调制方式对上述电力线信道进行仿真比较。选择 4 条路径,使用 AWGN 作为噪声干扰源,两系统使用相同的信号功率。每个 OFDM 符号包含 64 个载波,并且每个子载波的符号映射均采用 16QAM 方式。相应的,FFT 与 DWT 的大小也设置为 64。要指出的是,FFT-OFDM 需添加 1/4 符号长度的子载波作为 CP 的带宽,整个系统传输的字节数为 1.61×10^7 bit。

2.1 AWGN 干扰

首先在不加电力线信道的情况下,对两种系统在不同 SNR(信噪比)下的误码性能进行比较。在 DWT-OFDM 系统中,使用 Haar 小波作为小波基函数。图 3 所示为两种调制方式在 AWGN 干扰下的误码性能,由图可以看出,DWT-OFDM 系统的性能要优于 FFT-OFDM 系统,这是因为在传统的 FFT-OFDM 系统中,需要在每个 OFDM 符号中添加 1/4 符号长度的 CP,在这种情况下,系统会线性增加相同比例的噪声,致使传统 FFT-OFDM 系统的误码性能不如 DWT-OFDM 系统。

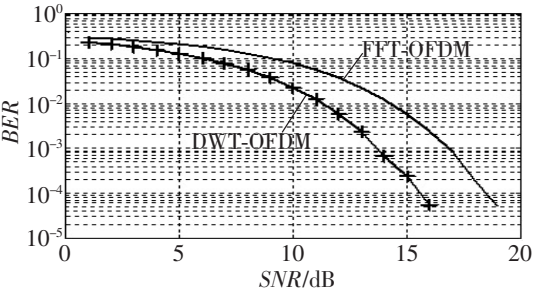


图 3 两种调制方式在 AWGN 下的误码性能

2.2 电力线信道下性能比较

电力线信道主要有时变特性、衰减特性、多径特性和输入阻抗特性等特征。图 4 所示为在电力线信道下,加入高斯白噪声,DWT-OFDM 选择不同的母

小波如 Symlets (sym16)、Haar 或 Daubechies (db8)作为小波基函数与传统的 OFDM 进行比较。

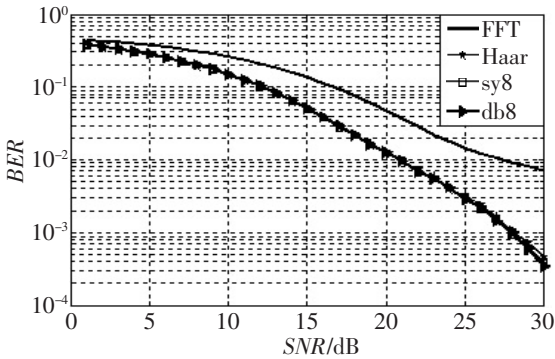


图4 电力线信道下 FFT-OFDM 与 DWT-OFDM (不同小波基)误码性能比较

从图中可以看出,不论使用哪种小波函数作为 OFDM 的基函数,DWT-OFDM 的系统误码性能都要优于 FFT-OFDM 系统,并且在 DWT-OFDM 中,不同的小波基变换具有相似的性能。

2.3 电力线信道下的 PAPR 比较

OFDM 系统有很高的 PAPR。事实上,PAPR 的存在,既降低了发射机功率放大器的效率,也降低了 ADC(模/数转换器)和 DAC(数/模转换器)的信号量化噪声比。PAPR 可表示为

$$PAPR = \frac{\max |x(t)|^2}{E[|x(t)|^2]}, \quad (2)$$

式中, $x(t)$ 为信号表达式,分子为信号功率的峰值,分母为信号功率的平均值。PAPR 的大小取决于子载波的数目。本文使用 CDF(概率累计函数)来描述 PAPR 的分布特性。图5所示为两种调制系统在抵抗 PAPR 方面的性能比较。可以看出,在累计概率取值 $x < 0.5$ 时,DWT-OFDM 系统比 FFT-OFDM 系统减小了近 4 dB 左右的 PAPR。

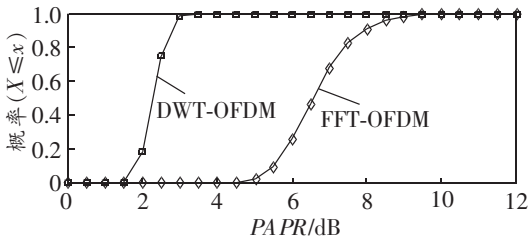


图5 两种调制系统的 CDF 分布

较低的 PAPR 意味着有助于提高 ADC 的信号与量化噪声比,同时降低了发射端硬件的设计要求,减少了 ICI,显示出了 DWT-OFDM 在抗干扰方面的优势。

2.4 电力线信道下对 CFO 的抗干扰能力比较

OFDM 系统对子 CFO(载波频率偏移)较敏感,现实应用中,由于发射机与接收机各自振荡器物理特性的不同,很容易产生不同频率的载波,继而产生多普勒频移 f_d ,最终导致 CFO 的出现^[7]。定义归一化的 CFO 为频率偏差 f_{offset} 与子载波间隔 Δf 的比值,可表示为

$$\epsilon = \frac{f_{\text{offset}}}{\Delta f}, \quad (3)$$

式中, $f_{\text{offset}} = f_c - f'_c$,其中, f_c 与 f'_c 分别为发射机与接收机的载波频率。经计算,大小为 ϵ 的 CFO 会引起 $2\pi n\epsilon$ 大小的相位偏差^[8],且相位偏差与 ϵ 和 n 成正比。这也相当于在频域上产生一个 $-\epsilon$ 的频差。

图6所示为两种调制方式对抗 CFO 的性能比较。由图可知,随着频偏值的增大,OFDM 系统的误码性能随之降低,并且在两种不同强度的 CFO 下,DWT-OFDM 的性能均优于传统的 FFT-OFDM 系统。这主要是由于 DWT-OFDM 比 FFT-OFDM 有较好的频谱特性,对频率偏移的敏感度较低,也说明了 DWT-OFDM 具有较强的抗干扰能力。

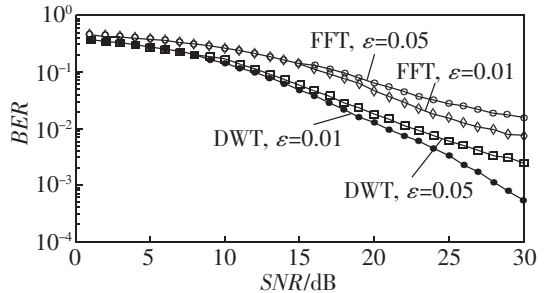


图6 两种调制方式对抗 CFO 的性能比较

3 结束语

本文给出了基于 DWT-OFDM 和 FFT-OFDM 的系统在电力线信道下的性能比较,建立了两种调制系统在电力线信道下的通信系统模型。基于 MATLAB 仿真,验证了在 AWGN 和电力线信道环境中,DWT-OFDM 具有优越的误码性能。在 PAPR 和对抗 CFO 方面,DWT-OFDM 也展现出了较好的性能。仿真结果表明,在 PLC 系统中,无论是频带利用率,还是抗干扰性能等方面,采用基于 DWT 的 OFDM 系统均比传统 OFDM 系统具有很大的优势。

参考文献:

- [1] IEEE Std. 5678772-2010, IEEE Standard for Broad-band over Power Line Networks: Medium Access

- Control and Physical Layer Specifications [S].
- [2] Baig S, Mughal M J. A Frequency Domain Equalizer in Discrete Wavelet Packet Multitone Transceiver for In-Home PLC Lans [C]//IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications 2007. Pisa, Italy;IEEE, 2007;181—186.
- [3] Asif R, Abdalhameed R A, Anoh O O, et al. Performance Evaluation of DWT-OFDM and FFT-OFDM for Multicarrier Communications Systems using Time Domain Zero Forcing Equalization [J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 51(4):34—38.
- [4] 韩越, 黑勇, 乔树山. 基于小波变换的 OFDM 与传统 OFDM 在电力线信道下的性能对比 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19):4667—4671.
- [5] Wang G, Gao F, Zhang X, et al. Superimposed Pilot Based Joint CFO and Channel Estimation for CP-OFDM Modulated Two-Way Relay Networks [C]//Global Telecommunications Conference 2010. Miami, Florida, USA;IEEE, 2010;1—5.
- [6] Mousavi S, Kiani A, Zanj B, et al. Performance evaluation of DWT-OFDM in multipath PLC channel under impulsive and narrowband noise [C]// ISPLC 2012. Harrisburg, USA;IEEE, 2012;356—361.
- [7] Hariprasad N, Sundari G. Performance comparison of DWT OFDM and FFT OFDM in presence of CFO and Doppler effect [C]//International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies 2014. Florence, Italy;IEEE, 2014;567—570.
- [8] 孙锴, 黄威. MIMO-OFDM 无线通信技术及 MATLAB 实现 [M]. 北京:电子工业出版社, 2013:132—133.

(上接第 4 页)

- [7] Kobayashi T, Takara H, Sano A, et al. 2×344 Tb/s propagation-direction interleaved transmission over 1500-km MCF enhanced by multicarrier full electric-field digital back-propagation [C]// ECOC 2013. London, UK;IEEE, 2013;1—3.
- [8] Takara H, Sano A, Kobayashi T, et al. 1.01-Pb/s ($12 \text{ SDM}/222 \text{ WDM}/456 \text{ Gb/s}$) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency [C]//ECOC 2012. Amsterdam, Netherlands;IEEE, 2012;Th. 3. C. 1.
- [9] Puttnam B J, Luis R S, Klaus W, et al. 2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb [C]// ECOC 2015. Valencia, Spain;IEEE, 2015;1—3.
- [10] Wang J, Li S, Luo M, et al. N-dimensional multiplexing link with 1.036-Pbit/s transmission capacity and 112.6-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM-8QAM signals over 368 WDM pol-muxed 26 OAM modes [C]//ECOC 2014. Cannes, France;IEEE, 2014;1—3.
- [11] Gong J, Xu J, Luo M, et al. All-optical wavelength conversion for mode division multiplexed superchannels [J]. Optics Express, 2016, 24(8):8926—8931.
- [12] Luo M, Mo Q, Li X, et al. Transmission of 200 Tb/s ($375 \times 3 \times 178.125 \text{ Gb/s}$) PDM-DFTS-OFDM-32QAM super channel over 1 km FMF [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2015, 8(4):1—8.
- [13] Yang Q, He Z X, Zhu Y, et al. Coherent optical DFT-spread OFDM transmission using orthogonal band multiplexing [J]. Optics Express, 2012, 20(3):2379—2385.
- [14] Li Cai, Yang Qi, Jiang Tao, et al. Investigation of Coherent Optical Multi-band DFT-S OFDM in Long Haul Transmission [J]. IEEE Photon Techno Lett, 2012, 19(24):1704—1707.