

文章编号:1000-582X(2011)04-130-04

电力线通信中子载波基的优化选取

李姣军^a, 李 恒^a, 苏理云^b, 李 刚^a

(重庆理工大学 a. 电子信息与自动化学院; b. 数理学院, 重庆 400050)

摘 要:针对电力线信道中的频率弥散特性,研究了采用不同的子载波基对系统抗干扰性能的影响,提出以小波包函数替代正交频分复用(OFDM)中的正弦基作为子载波基进行传输的技术,利用其正交性来对抗电力线信道中的多径干扰与频率选择性衰落特性。通过仿真,分析了采用不同小波包基的小波包调制与 OFDM 的抗干扰性能,结果表明:在信噪比达到一定值时,正交小波包调制技术的抗干扰性能优于半正交小波包调制及 OFDM 技术。

关键词:电力线通信;子载波基;小波包调制(WPM);正交频分复用

中图分类号:TN919

文献标志码:A

Better subcarrier bases for powerline communication system

LI Jiao-jun^a, LI Heng^a, SU Li-yun^b, LI Gang^a

(a. School of Electronic Information and Automation; b. School of Mathematics and Physics, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, P. R. China)

Abstract: To solve the frequency dispersive feature in powerline channel, the authors analyzed the anti-interference performance of modulation schemes with different subcarrier bases, and use orthogonal wavelet packet as subcarrier base instead of sine base in OFDM to suppress multi-path effect and frequency selective fading by its orthogonality in powerline channel. Through experiment, performances of wavelet packet modulation with different wavelet packets and OFDM are analyzed. Experiment results indicate that when the SNR has reached a certain level, orthogonal wavelet packet modulation has better performance than bi-orthogonal wavelet packet and sine base.

Key words: powerline communication; subcarrier bases; wavelet packet modulation; orthogonal frequency division multiplexing

电力线通信(powerline communication, PLC)是指建立在电力输送网基础上的、实现电力通信网络内部节点间及与其他通信网络间通信的系统,由于其覆盖范围广、一线两用、各类用电器均可直接作为网络终端等优势,而成为当前通信研究的一个热点领域。由于电力线工作环境恶劣,在传输高速数据时,信道呈现出衰耗大、时变性强、阻抗变化大等特点,使其成为制约电力线通信发展的瓶颈^[1]。考

虑到电力线介质的传输特性,目前国内外的研究普遍认为以 OFDM 技术为代表的多载波通信系统,因其较高的频谱利用率及良好的抗衰落能力,将会是实现宽带、高速 PLC 系统的关键。与之相关的抗干扰技术与子载波基选取问题也成为了近年来研究的重点^[2-9]。

文献[6]指出,传统的正交频分复用技术(OFDM)采用正弦基作为子载波基,子载波内的信

收稿日期:2010-10-12

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2010BB2320);重庆市教委科技研究资助项目(KJ100810)

作者简介:李姣军(1965-),女,重庆理工大学副教授,主要从事通信信号处理及电力线通信方向研究,

(Tel)13883795809;(E-mail)cqjiao@163.com

号不具备平移正交性,因此在对抗系统时延时需加入循环前缀(CP),导致系统频带利用率和传输速率的损失;文献[7-8]分别提出了一种以 chirp 基替代 OFDM 中的正弦基进行通信的新系统,可以有效的降低多载波通信系统中的载干比(carrier to interference ratio, CIR),但其性能依赖于最优分数阶搜索算法的步长精度。文献[9]则提出了一种基于小波基的调制系统并分析了其在频率选择性衰落信道下的性能,但受限于小波变换本身对高频信号部分无法分解,使得其应用范围受到了一定程度的限制。

在分析电力线信道的多径模型与衰落模型的基础上,研究了子载波基的选取对系统抗干扰性能的影响,给出了频率弥散信道中子载波基的选取原则,提出以小波包函数替代传统 OFDM 技术中所采用的正弦基,利用小波包函数良好的正交性与时频局域性,来获取良好的抗噪声与抗干扰性能,并通过实验仿真,对比了采用不同子载波基系统的 ICI 与 ISI 功率,实验结果验证了本方法的可行性与有效性。

1 电力线信道模型

PLC 网具有众多的节点、分支和不匹配的线路,该类型拓扑结构决定了信号的多路传输特性。受电缆外层绝缘材料的影响,电力线上信号的衰耗随频率的提高和距离的加大而增加,因此,PLC 信道的传输函数可以看作是频率选择性衰落特性与多径传播特性并存的传输函数,可以用 N 条传输路径的叠加及含有延时 τ 、频率 f 、延时 t 、距离 d 、衰耗 A 的方程来表示^[9-10]

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

式中: g_i 为路径 i 的加权系数; A 为衰耗,其特性由长度 d 、频率 f 和衰耗参数 α_0, α_1 和 k 表示,即

$$A(f, d) = \exp[-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d]. \quad (2)$$

如果再用长度 d 与相速 v_p 的比值来表示 τ ,则得到传输函数模型

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \exp[-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_i] \exp(-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}), \quad (3)$$

式(3)是描述典型电力线信道各种复杂传输函数模型的基础。表 1 显示了经过实验所测的衰耗参数与多径参数。

表 1 电力线信道模型参数

衰落参数		多径参数			
$k=1$	i	1	2	3	4
$\alpha_0=0$	g_i	0.64	0.38	-0.15	0.05
$\alpha_1=7.8 \times 10^{-10}$ s/m	d_i /m	200	222.4	244.8	267.5

2 子载波基的选取

2.1 信道干扰分析

事实上,系统受信道的干扰程度由 2 个因素的决定:1)信道的时频特性;2)子载波基的选取。通常情况下,信道的时频特性是给定的,那么可选择改变子载波基来增加系统的抗干扰能力^[4-11]。若不考虑噪声的影响,多载波调制系统中第 i 个子载波所受的干扰可表示为

$$P_i = P_{n,i}^{\text{ICI}} + P_i^{\text{ISI}}, \quad (4)$$

其中: $P_{n,i}^{\text{ICI}}$ 表示第 n 个子载波对第 i 个子载波产生的 ICI 功率; P_i^{ISI} 表示第 i 个子载波内的 ISI 功率,若以 $g_i(t)$ ($i=1, \dots, N$) 表示第 i 个子载波的基, N 表示子载波总数, T_s 表示符号持续时间, τ 表示信道时延, $P_{n,i}^{\text{ICI}}$ 和 P_i^{ISI} 可由如下公式给出

$$P_{n,i}^{\text{ICI}} = \frac{E_s E_h}{T_s^2} \int_{t=0}^{T_s} \left\{ \sum_{n=1}^N \int_{\tau=0}^{\tau} h_i(\tau, t) g_i(t - \tau - T_s) \times \right. \\ \left. e^{-j2\pi n \tau / T_s} d\tau \right\} e^{j2\pi(n-i) \tau (t - T_s) / T_s} dt, \quad (5)$$

$$P_i^{\text{ISI}} = \frac{E_s E_h}{T_s^2} \int_{t=0}^{T_s} \int_{\tau=0}^{\tau} h_i(\tau, t) g_i(t - \tau - T_s) \times \\ e^{-j2\pi \tau / T_s} d\tau dt. \quad (6)$$

其中: $h_i(\tau, t)$ 表示第 i 个子载波的时频特性函数; E_s 为信号发送能量; E_h 是归一化信道能量,其计算公式为:

$E_h = \sum_{k=1}^{N_p} p_k$, p_k 代表接收端 k 个抽头的平均功率,而 N_p 代表抽头数。则最优子载波基的选取问题就可以描述为

$$g_{\text{opt}} = \arg \min_{g_i(t)} \sum_{i=1}^N P_i. \quad (7)$$

2.2 子载波基的优化选取

在频率弥散信道中,理想的子载波基,其时-频局部特性应与信道的时-频局部特性相吻合,也就是说,子载波的频率应是时变的,且能在任意时刻完美分解信号传输过程中的失真^[8]。令 N 表示子载波数。那么,基带信号可表示为

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N x_{t,i} g_i(t), \quad (8)$$

式中: $x_{t,i}$ 表示 t 时刻,第 i 个子载波上的数据符号;

$s(t)$ 经历传输函数为 H , 噪声为 $n(t)$ 的信道后, 接收信号可表示为

$$y(t) = H \cdot s(t) + n(t). \quad (9)$$

接收端通过计算接收信号与子载波基的内积来恢复初始信号

$$\begin{aligned} \bar{x}_{i,i} &= [Hs, g_i] + [n, g_i] = \\ & \sum_{l,i} x_{l,i} [Hg_{l,i}, g_i] + [n, g_i]. \end{aligned} \quad (10)$$

OFDM 技术采用傅立叶基, 当信道被认为是近似时不变且平坦衰落时, 函数 g_i 之间的正交性得以保存, $x_{l,i}$ 较容易恢复, 但当 g_i 经历电力线信道时, 其信号将在时-频域内产生扩展, 造成严重的 ICI 与 ISI。因此, 需要寻找更优的子载波基。

在探寻电力线通信中的子载波基选取问题时, 越来越多的研究转向了小波及小波包领域, 原因在于小波包函数不仅拥有良好的时-频局部性, 可以有效的对信号进行局部定位, 更因其具备重要的平移正交性与尺度正交性, 即有下面的定理^[12]

定理 1: 设 $\{u_n(x)\}_{n \in \mathbb{N}}$ 是由标准正交尺度函数 φ 导出的小波包函数, 则

$$[u_n(x-j), u_n(x-k)] = \delta_{j,k}, j, k \in \mathbb{Z}. \quad (11)$$

定理 2: 设 $\{u_n(x)\}_{n \in \mathbb{N}}$ 是由标准正交尺度函数 φ 导出的小波包函数, 则

$$[u_{2n}(x-j), u_{2n+l}(x-k)] = 0, l \in \mathbb{N}. \quad (12)$$

定理 1 表明每个小波包函数的非零平移正交性(自正交性), 该性质在小波包调制中可用来消除一定程度的 ISI; 定理 2 表明小波包中的不同函数的非零平移正交性(互正交性)。它可用来消除一定程度的 ICI。

3 仿真与分析

实验时主要参数设置如表 2 所示。

表 2 主要实验参数

参数名称	WPM	OFDM
符号长度	128 bit	128 bit
CP 长度	—	16 bit
调制方式	4-QAM	4-QAM
分解层数	3 层全分解	—
子载波数目	4	4
信道时延	200 ns	200 ns

表 3 显示了采用不同子载波基调制系统的 ICI 与 ISI 功率, 其与信源功率做了归一化处理: $P_{\text{norm}} =$

$10 \lg \frac{P_{\text{interference}}}{P_{\text{signal}}}$, 可以看出: 无 CP 的 OFDM 技术, 其 ICI 与 ISI 联合功率较高, 传输性能较差, 而采用 CP 技术可以有效的降低 OFDM 的干扰功率; 采用正交小波包函数(如 db4, coif4)作子载波基, 由于其良好的自正交及互正交性, 可获得比采用 CP 的 OFDM 技术更高的抗干扰性能; 而半正交小波包函数(如 bior3.5, bior5.5) 由于其只具备互正交性而不具备自正交性, 在对抗 ICI 时可以获得较好的效果, 而在对抗 ISI 时则效果不佳。

表 3 不同系统的归一化干扰功率

参数	ICI 功率 /dB	ISI 功率 /dB	联合功率 /dB	提升 /dB
OFDM(无 CP)	-1.754	-1.357	-3.111	—
OFDM(有 CP)	-4.520	-2.739	-7.259	-4.148
db4-WPM	-5.712	-2.942	-8.654	-5.543
coif4-WPM	-5.771	-2.915	-8.686	-5.575
bior5.5-WPM	-5.759	-1.627	-7.686	-4.275
bior3.5-WPM	-5.687	-1.685	-7.672	-4.261

图 1 是各调制技术在电力线信道模型下进行 10×10^4 bit 的 Monte-Carlo 实验的误码率曲线图, 可以看出: 不加 CP 的 OFDM 技术在电力线信道传输时, 其符号间的正交性几乎被完全破坏, 且信噪比的增加对系统性能的影响并不明显; 采用半正交小波包函数作为子载波基时, 信噪比在 0~8 db 段, 性能与带 CP 的 OFDM 技术大致相当, 当信噪比继续增大时, 可获得约 0.5~1 db 的信噪比增益。而采

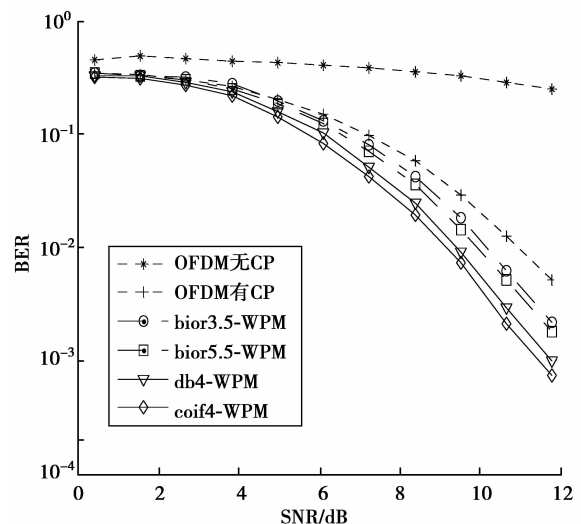


图 1 各调制系统在电力线信道下的误码率曲线图

用正交小波包函数替代正弦基作为子载波进行传输,相比采用CP的OFDM技术,在低信噪比条件下,性能大致相当;但当信噪比持续加大时,在5~10 db段,可以获得约2 db的信噪比增益。

4 结 论

采用正交小波包函数作为子载波基的小波包调制技术是对基于傅立叶变换的OFDM技术的发展与改进,它不仅能满足各子载波间的正交性要求,而且在1个子载波内还具有平移正交性,兼具更强的抗干扰性与固有的多速率特性,可以有效消除信道所带来的码间干扰与邻近信道干扰,降低系统误码率。仿真结果表明:在电力线信道传输条件下,采用正交小波包函数作为子载波基,可以获得更优的抗ICI与ISI性能;在信噪比达到一定值时,正交小波包调制技术的误比特率性能优于半正交小波包调制及OFDM技术。

参考文献:

- [1] 马强,陈启美,李勃. 跻身未来的电力线通信:回顾与展望[J]. 电力系统自动化,2003,27(3):72-76.
MA QIANG, CHEN QI-MEI, LI BO. Power line communication in the future part one: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(3):72-76.
- [2] LIU Q, ZENG Q A. Multi-band OFDM and p-persistent CSMA/CD-based indoor powerline communication (PLC) systems [C]//IEEE International Conference on Ubiquitous and Future Networks, June 8, 2009, Hong Kong, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 235-239.
- [3] CHEN S X, CHEN X D, PARINI C. Measurement and simulation of powerline channel using OFDM for UWB communication [C/OL]//IEEE International Symposium on Powerline Communications and Its Applications, Dresden, March 29-April 1 [2009-05-08]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4913408&tag=1.
- [4] REN R, ZHU S H, LUO Y Q. Multi-carrier modulation and multi-scaling distinguishable system based on adaptive orthogonal wavelet packet [C/OL] International Conference on Signal Processing and Communications, Dublin, December 11-14, 2004[2005-06-27]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1458394.
- [5] KUMBASAR V, KUCUR O. Better wavelet packet tree based WOFDM for multipath powerline channel [J]. Computers and Electrical Engineering, 2010, 36(3):397-403.
- [6] KHAN U, BAIG S, MUGHAL M J. Performance comparison of wavelet packet modulation and OFDM for multipath wireless channel [C/OL]//The 2nd International Conference on Computer, Control and Communication, Karachi, February 17-18, 2009[2009-05-05]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04909207>.
- [7] WANG H Q, MA H. MIMO OFDM systems based on the optimal fractional fourier transform [J]. Wireless Personal Communications, 2009,55(2):265-272.
- [8] YANG Q, TAO R, WANG Y, et al. MIMO OFDM system based on fractional Fourier transform and selecting algorithm for optimal order [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(9): 1360-1371.
- [9] MITTAL V, GAUTAM Y, MALLIK R K, et al. Analysis of wavelet modulation in frequency-selective fading [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2007, 50(6):3818-3826.
- [10] RAUGI M, TUCCI M. Power-line communications channel estimation and tracking by a competitive neural network [J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2006, 52(4): 1213-1219
- [11] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the powerline channel [J]. IEEE Transactions on Communications,2002, 50(4):553-559.
- [12] YEN R Y, LIU H Y, WU C M. Correlation between ICI and the carrier signal in OFDM under doppler spread influence [C/OL] //The IEEE 17th Conferences on Signal Processing and Communication Applications, Antalya, April 9-11, 2009 [2009-06-26]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5136568.
- [13] LAKSHMANAN M K, NIKOOKAR H. A review of wavelets for digital wireless communication [J]. Wireless Personal Communications, 2006, 37(3/4):387-420.
- [14] 郝久玉,王可,王小梅,等. 基于小波包变换的多载波通信系统的实现[J]. 天津大学学报, 2007, 40(1): 24-27.
HAO JIU-YU, WANG KE, WANG XIAO-MEI, et al. Implementation of wavelet packet transform-based multicarrier communication system [J] Journal of Tianjin University,2007, 40(1): 24-27.
- [15] LI W H, WANG R, ZHAO Y H, et al. Bi-orthogonal wavelet packet based multicarrier modulation [C/OL]// Proceedings of 2001 International Conferences on Info-tech and Info-net, Beijing, China, 2001[2002-08-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=983621.