

基于导频辅助的低压电力线通信系统信道估计算法

赵慧冬, 黑 勇, 乔树山, 叶甜春

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 针对低压电力线信道噪声强、衰减大的问题, 基于 OFDM 技术的电力线通信系统采用时域扩充结构, 提高导频数据的可靠性. 确定了在 OFDM 时域扩充结构中应用 LMMSE 准则时最大多径时延的最优取值. 在此基础上提出一种更适合时域扩充系统的信道估计优化算法, 通过利用 OFDM 符号内所有导频参与信道估计从而在低信噪比条件下获得更低的误码率. 仿真结果表明提出的改进算法与传统 LMMSE 算法相比具有更好的信道估计性能, 在信噪比低于 0dB 时改进算法的性能优势更加明显.

关键词: 正交频分复用; 电力线通信; 信道估计; 时域扩充

中图分类号: TN911. 23

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0089-05

Pilot Based Channel Estimation Algorithm for OFDM Low-voltage Power Line Communication Systems

ZHAO Hui-dong, HEI Yong, QIAO Shu-shan, YE Tian-chun

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To suppress the noise and attenuation of power line communications (PLC), OFDM PLC systems use time-domain spread structure which can improve the reliability of pilot and data. This paper Confirms the best value of maximum multipath delay in LMMSE algorithm for time-domain spread structure. An improved channel estimation algorithm utilizing pilots in channel estimation as much as possible is proposed, which performs better than LMMSE algorithm through. Simulation results indicate that the bit error rate (BER) of the proposed algorithm is lower than that of the conventional LMMSE algorithm, especially when signal-to-noise ratio (SNR) is under 0dB.

Key words: OFDM; Power Line Communication; channel estimation; time-domain spread

1 引言

利用电力线进行数据传输的通信方式称为电力线通信(Power Line Communications, PLC)^[1]. 实际中低压电力线通信信道十分恶劣, 表现为信道噪声大、干扰强、负载阻抗变化剧烈以及存在多径效应和频率选择性衰落, 使用单载波技术很难实现电力线载波信号的复原. 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术^[2]采用多载波调制, 能够有效的对抗频率选择性衰落和载波间干扰, 因此基于 OFDM 技术的低压电力线通信系统成为电力线载波通信领域的研究热点.

OFDM 信号通过低压电力线信道后由于衰落和噪声的影响发生失真, 需要有效的信道估计算法进行估计和补偿. 本文中基于 OFDM 技术的低压电力线通信系统的帧结构中采用了时域扩充结构: 在发送端将相同有效数据在一组 OFDM 符号的不同子载波位置上传输, 导频数据位置保持不变, 形成携带相同信息的 OFDM 时域扩充符号; 在接收端提取时域扩充后的这组 OFDM 符号中相同位置处的导频, 求均值后作为这组 OFDM 符号信道估计的输入导频值, 从而有效地提高导频信息可靠性.

本文分析了在 OFDM 时域扩充结构中最大多径时延和误码率的关系, 确定了应用 LMMSE 算法

达到最优性能时最大多径时延的取值. 在此基础上提出一种改进的信道估计算法, 提高了信道估计性能. 仿真结果表明在同样的系统参数和仿真条件下, 改进算法能够取得优于 LMMSE 算法的误码率性能, 尤其是在低信噪比低于 0dB 的高斯白噪声信道中, 采用改进算法后, 系统的误码率能够达到 10^{-6} 数量级, 有效地保证了电力线通信的性能.

2 系统模型

本文采用的基于 OFDM 技术的低压电力线通信系统的帧结构如图 1 所示. 每个 OFDM 数据帧包括一个前导序列 Preamble、一个帧头 Header、一组有效数据 Payload, 同时在 Payload 前也有一个前导序列. 每个前导序列包括 512 个数据, 用于进行能量检测和数据同步. Header 和 Payload 中的每个 OFDM 符号均进行了时域扩充. 在图 1 中 Header 中的 OFDM 符号进行 M 次复制形成一组 OFDM 符号, 同时对组内不同 OFDM 符号上的有效数据位进行循环移位, 导频数据位不变, 即相同的有效数据在相邻 OFDM 符号的不同子载波上传输, 形成 OFDM 时域扩充信号. Payload 包括 L 个 OFDM 符号, 与 Header 相同每个符号也进行 M 次时域扩充, 得到 $L \times M$ 个数据符号.

本系统中 OFDM 符号的子载波分配如图 2 所

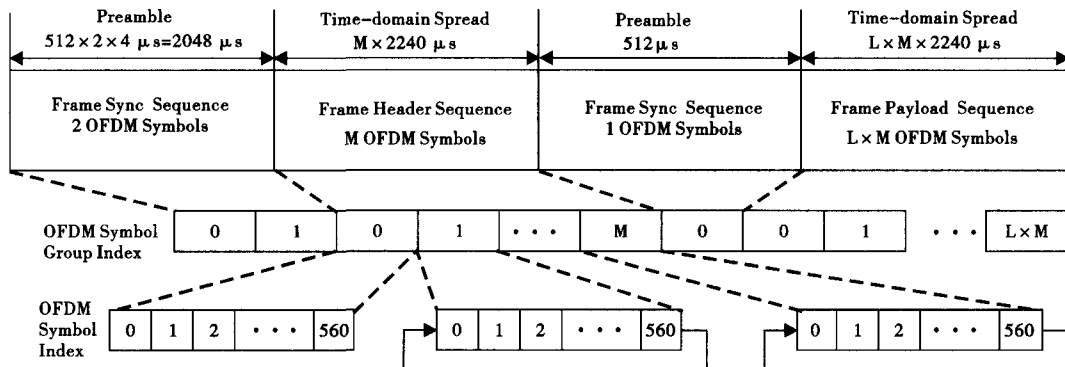


图 1 基于 OFDM 技术的低压电力线通信系统的帧结构

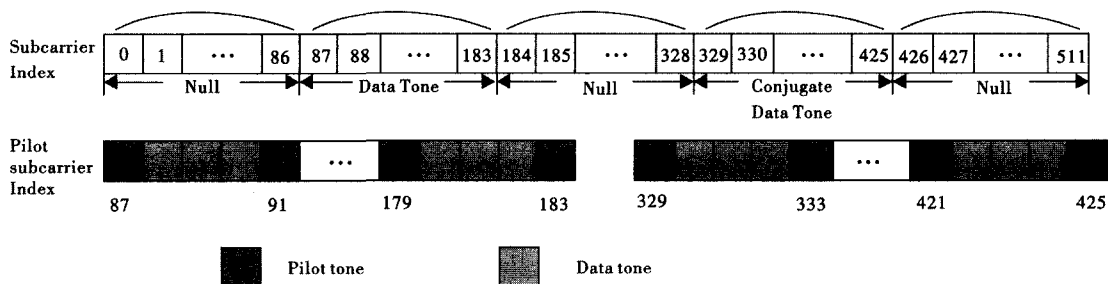


图 2 OFDM 符号子载波分配

示. 一个 OFDM 符号包括 512 个子载波, 其中有 97 个有效子载波, 以及与其共轭对称的 97 个子载波 (D 和 D^*), 其余位置为零载波. 在 97 个子载波中每隔 4 个数据有一个导频. 子载波间隔为 488.28125Hz. 将一个 OFDM 符号中后 48 个子载波前置作为循环前缀. 发送端 OFDM 符号表示成:

$$s_n = [s_n(0), s_n(1), \dots, s_n(N-1)]^T \quad (1)$$

其中 N 是子载波数目.

3 LS 和 LMMSE 信道估计算法

在信道只包含理想加性高斯白噪声的情况下, 接收端 OFDM 符号 y 可以表示成: $y = Xh + n$, 其中 h 是信道冲激响应, n 为噪声. 经过 FFT 后时域信号转换为频域信号 $Y(k)$:

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-i2\pi kn/N} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

最小二乘 (Least Square, LS) 算法是最基本的基于导频的信道估计算法, 其估计准则是使估计值的平方误差最小:

$$\hat{h} = \operatorname{argmin} \|y - Xh\|^2 \quad (3)$$

在只考虑高斯白噪的情况下, 上式可以表示成:

$$\hat{h}_{LS} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4)$$

根据式 (2) 和 (4), LS 信道估计算法表示成:

$$H_{LS} = X^{-1}Y = \begin{bmatrix} Y(0)Y(1)\dots Y(N-1) \\ X(0)X(1)\dots X(N-1) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

LS算法易受到高斯白噪声和ICI的影响,因此其估计的准确性受到很大限制,而基于最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)准则^[3-4]的信道估计算法对高斯白噪和ICI都有很好的抑制作用,性能优于LS估计算法。但MMSE算法的复杂度太高,实现困难,因此一种简化的低阶线性最小均方误差(Low-rank Linear MMSE, LMMSE)算法^[5-7]受到广泛应用。LMMSE算法的核心思想是利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)得到最优的低阶估计器,在降低复杂度的同时其算法性能与MMSE近似。

由式(4)得到LMMSE算法的信道估计值为:

$$H_{LMMSE} = R_{HH}(R_{HH} + \sigma_n^2(XX^H)^{-1})^{-1}H_{LS} \quad (6)$$

$$R_{HH} = E\{HH^H\} \quad (7)$$

R_{HH} 是信道冲激响应的自相关矩阵, σ_n^2 是加性高斯白噪声的方差。进一步降低算法的复杂度,将 $(XX^H)^{-1}$ 用它的期望来代替: $E\{(XX^H)^{-1}\} = E\left\{\left|\frac{1}{x_k}\right|^2\right\}I$, 其中 I 是单位矩阵。

定义信噪比是 $SNR = \frac{E\{|x_k|^2\}}{\sigma_n^2}$, 同时定义 $\beta =$

$\frac{E\{|x_k|^2\}}{E\left\{\left|\frac{1}{x_k}\right|^2\right\}}$, 那么公式(6)简化为:

$$\hat{H} = R_{HH}\left(R_{HH} + \frac{\beta}{SNR}I\right)^{-1}H_{LS} \quad (8)$$

自相关矩阵表示成 $R_{HH} = [r_{m,n}]$, 进一步通过数学运算得到:

$$r_{m,n} = \frac{1 - e^{-L(1/\tau_{rms} + 2\pi j(m-n)/N)}}{\tau_{rms}\left(1 - \exp\left(\frac{-L}{\tau_{rms}}\right)\right)\left(\frac{1}{\tau_{rms}} + \frac{2\pi j(m-n)}{N}\right)} \quad (9)$$

4 改进的信道估计算法

在OFDM低压电力线通信系统中,时域扩充后相同有效数据被分配到一组OFDM符号的不同子载波上,导频数据仍处在相同的子载波上。接收端将同一组时域扩充数据的导频信息提取出来,得到导频的信道响应值 H_{LS} , 对相同位置处的导频信道响应进行平均,其均值作为信道估计的导频输入信息,如公式(10):

$$\hat{H}_p = \frac{\sum_{k=0}^M H_{LS}(k)}{M} \quad (10)$$

其中 M 为时域扩充次数, $\hat{H}_p$ 是用于信道估计的导频均值。通过时域扩充结构将导频进行了重复和平均从而提高了导频的可靠性。

基于LMMSE准则的最佳滤波器是维纳滤波器^[8], 由Wiener-Hopf方程得到维纳滤波器最佳系数的表达式:

$$\omega_{l,k}^T = \theta_{l,k}^T \Phi^{-1} \quad (11)$$

通过引入第一类零阶贝塞尔函数,系数 ω 的表达式由平均信噪比SNR、最大多径时延 τ_{rms} 和滤波器阶数 tap 决定。平均信噪比一般可设定为常数,因此维纳滤波器系数 ω 由 τ_{rms} 和 tap 决定,不同的 ω 会影响LMMSE的信道估计性能。

在应用中 tap 一般为定值,当式(9)中的 τ_{rms} 等于理论最大多径时延的时候,算法的性能最好,当 τ_{rms} 大于或小于理论值时算法性能均会下降。在信噪比较高的情况下,误码率随 τ_{rms} 而改变的趋势非常明显。但实际低压电力线信道中由于噪声的影响,信号的信噪比非常低, τ_{rms} 等于理论最大多径时延时获得的误码率性能改善非常小, τ_{rms} 对误码率的降低几乎没有贡献。在这种极端恶劣的信道环境下, LMMSE算法不能满足电力线通信的要求。本文针对OFDM时域扩充结构的特点对LMMSE算法进行改进。

时域扩充改变了性能最优时 τ_{rms} 与误码率之间的对应关系。在时域扩充次数为 M 的OFDM符号中,相同的有效数据在不同子载波上被传输 M 次,随着导频可靠性的提高当一个OFDM符号中更多的导频参与信道估计时其加权后能够有效提升信道估计效果。式(9)中 τ_{rms} 的取值受到参与信道估计的导频个数及其加权参数的影响,因此时域扩充次数影响达到最佳误码率性能时的 τ_{rms} 取值。随着时域扩充次数的提高,达到最佳性能时 τ_{rms} 的取值逐渐远离理论最大多径时延;当时域扩充次数增大到一定值的时候, τ_{rms} 等于零时的误码率最低,即误码率随 τ_{rms} 的增大而增大。上述分析修正了在时域扩充结构中最大多径时延和LMMSE信道估计性能的关系。

本文提出一种更适合时域扩充结构的优化信道估计算法。通过分析电力线信道的特点发现:电力线信道某些频段上存在较大衰落^[9], 处于这些严重衰落频段上的导频数据严重失真,使用这些导频进行信道估计会带来较大的误差,使得LMMSE算法的性能较差。针对这一问题,通过利用OFDM符号内所有导频进行信道估计,在时域扩充和低信噪比的

共同影响下,能够得到优于原始 LMMSE 的性能. 根据上述分析改进算法的信道估计值表达式为:

$$H_{\text{pro}} = \omega_{l,k}^T \hat{H}_p \quad (12)$$

ω 表达式中的 tap 取值需要最大程度体现时域扩充和所有导频数据的优势,即改进算法估计值的表达式为:

$$H_{\text{pro}} = \omega_{\text{tap}=N_p}^T \hat{H}_p \quad (13)$$

令 $\omega = \frac{\gamma}{N_p}$, 其中 γ 是系数, N_p 是一个 OFDM 符号内的导频数目,表达式简化为:

$$H_{\text{pro}} = \frac{\gamma}{N_p} \hat{H}_p \quad (14)$$

式中优化了 τ_{rms} 和 tap 的取值,利用时域扩充导频数据的平均和 OFDM 符号内所有频域导频数据,增加信道估计的可靠性,减小估计误差,因此在 OFDM 时域扩充系统中改进算法优于 LMMSE 算法的性能.

5 仿真结果

根据表 1 设定的系统仿真参数对信道估计改进算法进行仿真,并与文献[5]中 LMMSE 算法的性能进行对比. 本文采用的 OFDM 低压电力线通信系统使用的低频段载波带宽是 48kHz,一个 OFDM 符号内有 512 个子载波.

表 1 系统仿真参数

系统带宽/kHz	48
载波起始频率/kHz	41.748046875
载波结束频率/kHz	89.111328125
采样点持续时间/ μs	4
载波间隔/kHz	0.488281250
FFT 点数	512
调制模式	BPSK

仿真信道采用两种信道环境,信道 1 是 AWGN 和多径信道,其归一化最大多径时延是 11. 信道 2 采用表 2 给出的信道模型参数. 该模型模拟了实际电力线信道,包括背景噪声、时域脉冲噪声、频域脉冲噪声、定时频偏和多径等非理想因素参数.

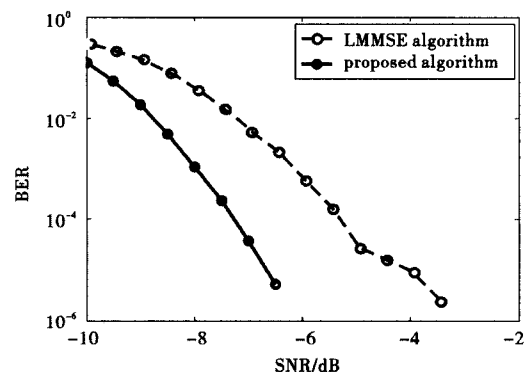
时域扩充次数等于 5, τ_{rms} 取值均为零,在系统仿真参数相同的条件下,对 LMMSE 算法和改进算法进行误码率仿真. 基于信道 1 的仿真曲线如图 3 (a). 改进算法的误码率明显低于文献[5]中的

表 2 信道模型参数

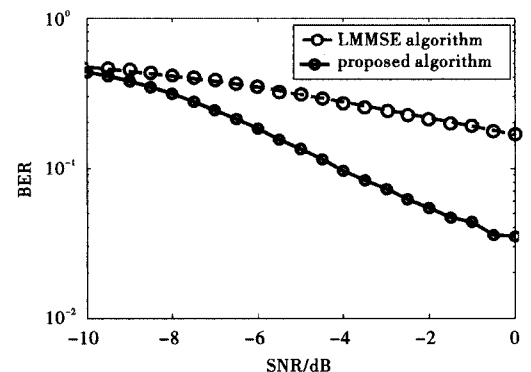
归一化最大多径时延	11
时域脉冲噪声长度/ μs	64
时域脉冲噪声间隔/ms	8
频域噪声带宽/kHz	2
频域噪声间隔/kHz	3
高斯白噪/dB	-10~0
采样频偏/ppm	140

LMMSE 算法,取得相同的误码率时改进后的算法能够将信噪比提高 1dB 以上. 使用表 2 的信道模型参数进行仿真如图 3(b). 在信噪比低于 0dB 时改进算法的误码率远远低于 LMMSE 算法.

从中可以看出,在信噪比极低并存在多种脉冲噪声等非理想因素的信道中,在 OFDM 时域扩充系统中使用本文提出的信道估计算法能够有效降低误码率,提高系统性能.



(a)



(b)

图 3 改进算法和 LMMSE 算法的误码率

6 结束语

本文提出一种改进的信道估计算法. 利用所有导频数据信息进行信道估计,从而提高了信道估计

的性能。仿真结果表明,在高斯白噪及多径信道下,在信噪比低于0dB时,本文算法相比LMMSE算法能够将误码率降低;同时,在各种噪声和非理想因素存在的信道中,文中算法的误码率性能优于LMMSE算法。

参考文献:

- [1] Razazian K, Umari M, Kamalized A. G3-PLC Specification for powerline communication: overview, system simulation and field trial results[C]// IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Rio de Janeiro, Brazil, 2010: 313-318.
- [2] Henrik Schulze, Christian Luders. Theory and applications of OFDM and CDMA[M]. West Sussex, U. K.: John Wiley & Sons Ltd, 2005: 145-152.
- [3] Guo D, Shamai S, Verdu S. Mutual information and minimum mean-square error in gaussian channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(4): 1261-1282.
- [4] Coleri S, Ergen M, Puri A, et al. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems[J]. IEEE Transaction on Broadcasting, 2002, 48(3): 223-229.
- [5] Galih S, Karlina R, Irawan A. Low complexity partial sampled MMSE channel estimation for downlink OFDMA IEEE 802.16e system[C]// International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Kamazawa, Japan, 2009: 192-166.
- [6] Meng-Han Hsieh, Che-Ho Wei. Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channel [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(1): 217-225.
- [7] Patel A, Kosko B. optimal mean-square noise benefits in quantizer-array linear estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(12): 1005-1009.
- [8] Hoeher P, Kaiser S, Robertson P. Two dimensional pilot symbol aided channel estimation by wiener filtering[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Munich, Germany, 1997(3):1845-1848.
- [9] Cabral H A, Vitor U R C, de Melo M T. Analysis of noise and transfer function characteristics in a three-phase electrical infrastructure[C]// IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Rio de Janeiro, Brazil, 2010: 137-141.

作者简介:



赵慧冬 女,(1984—),博士研究生.研究方向为低压电力线通信系统、专用集成电路设计。

黑勇 男,(1974—),研究员,博士生导师.研究方向为数字通信系统、极低功耗集成电路设计。

乔树山 男,(1981—),副研究员.研究方向为低压电力线通信系统、专用集成电路设计。

叶甜春 男,(1965—),研究员,博士生导师.研究方向为集成电路设计与应用、纳米加工与制造技术、新型器件。

(上接第88页)

- [5] Tsai C Y, Chen T C, Chen T W, et al. Band-width optimized motion compensation hardware design for H. 264/AVC HDTV decoder [C]// ISCAS 2005. Kobe, Japan, 273-276.
- [6] Zhang N R, Li M, Wu W C. High performance and efficient bandwidth motion compensation VLSI design for H. 264/AVC Decoder [C]// ICSICT. China: Shanghai, 2006: 1896-1898.
- [7] Horow ITZ M, Joch A, Kossentin I F, et al. H. 264/AVC baseline profile decoder complexity analysis [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems Video Technology, 2003, 13(7): 704-716.
- [8] 刘立峰,方向忠,低运算复杂度的 H_264 解码器运动补偿模块 [J]. 电视技术,2011,35(9): 23-26.

作者简介:

姜峰 女,(1987—),硕士研究生.研究方向为视频编解码算法及其DSP实现。

尚书林 男,(1978—),高级工程师.研究方向为视频、图像编解码及其嵌入式系统实现。

梁利平 男,(1969—),研究员.研究方向为高性能多核DSP及SOC。