

适用于宽带电力线通信的 OFDM 信噪比估计方法

梁 栋,张保会,牛东文,付科源,郝治国

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要: 首先介绍了基于电力线通信的正交频分复用模型,并进行了电力线信道和噪声建模。采用了具有重复结构的同步训练序列,使得频域上 2 个装载了数据的相邻子载波间有 3 个虚拟子载波,再利用虚拟子载波进行数据辅助估计;采用正交频分复用系统频域首尾两端的保护虚拟子载波进行信噪比盲估计。仿真结果表明:进行数据辅助估计时,如果实际信噪比较高,所提算法的精度和 Boumard 算法相近,否则所提算法的精度高于最小均方误差(MMSE)算法和 Boumard 算法;进行信噪比盲估计时,多数情况下,所提算法的精度高于二阶四阶矩(M2M4)算法。

关键词: 电力线; 通信; 信噪比; 正交频分复用; 估计; 建模

中图分类号: TM92

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.017

0 引言

高级量测体系 AMI(Advanced Metering Infrastructure)与智能电网(smart grid)和智能家居(smart home)的快速发展对高速可靠的电力线数据通信提出了更高的要求。自适应正交频分复用 AOFDM(Adaptive Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术为带宽受限的电力线信道提供了高效的数据通信解决方案。AOFDM 中最为关键的参数就是准确的信噪比 SNR(Signal to Noise Ratio)。自适应算法如比特能量分配算法、turbo 码解码以及信道均衡等算法都要求有准确有效的信噪比估计参数。

信噪比估计算法一般分为 2 种:第 1 种是数据辅助(DA)的估计方法(data-aided estimator),该方法使用 OFDM 系统的同步帧或者导频来完成估计;第 2 种是盲估计(blind estimator)算法,该算法建立在有用信号和噪声的统计特性基础上,采用盲估计算法的系统效率更高,然而其估计性能不如数据辅助的估计算法。上述 2 种算法适用于不同场合的通信系统。

单载波通信系统在加性高斯白噪声信道(AWGN)下有许多高效的信噪比估计算法,比如最小均方误差(MMSE)算法、二阶四阶矩(M2M4)算法和最大似然(ML)算法等。这些算法在 AWGN 信道下大多可以直接推广到多载波的 OFDM 系统中。然而对于多径电力线信道而言,频率选择性衰减、严重的电力线背景噪声和脉冲噪声使得以上算法的估计性能严重下降。对于 OFDM 系统的信噪比

估计问题已经引起很多的学者关注^[4-7]。文献[6]针对无线信道中的 MIMO-OFDM 系统提出了一种信噪比估计算法,算法通过 2 段相同的前导序列来估计噪声功率和信号功率,估计值在信噪比低于一定阈值时趋近于-3 dB。文献[7]为中压电力线信道提出了一种基于相位的信噪比估计算法,同样在信噪比较低时估计效果不甚理想。本文提出一种适用于电力线信道的信噪比估计算法。该算法通过使用重复结构同步训练序列中的虚拟子载波或者保护边带的虚载波,可以灵活地进行数据辅助估计或者盲估计,使整个系统高效地完成自适应通信。由于虚载波中只含有噪声信息,所以在频域计算接收信号的二阶矩就能很容易地推导出系统的平均信噪比。算法最多使用 1 个同步训练序列,而且计算复杂度比经典的信噪比估计算法要低。

1 系统模型

1.1 OFDM 系统接收机模型

本节首先介绍了基于电力线通信的 OFDM 系统模型。假设系统已经完成了完美的时间和频率同步,并且循环前缀(cyclic prefix)足够长,以抵消信道时延扩展使得系统没有码间干扰(ISI)和载波间干扰(ICI)。图 1 所示为自适应 OFDM 通过电力线信道的系统框图。

本文自适应 OFDM 系统中使用重复结构的训

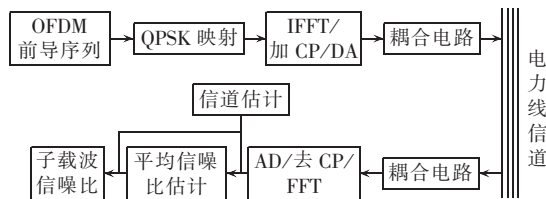


图 1 信噪比估计系统框图

Fig.1 Block diagram of SNR estimation system

训练序列作为前导码来完成同步和信道估计等计算。序列是由 N 个单位幅度的 QPSK 数据符号 $c_m(k)$ 组成,可以记作 $\mathbf{C}_m = [c_m(1), c_m(2), \dots, c_m(k), \dots, c_m(N)]$,其中 N 为逆傅里叶 (IFFT) 运算的长度, $m (=0, 1)$ 表示第 m 个 OFDM 符号, $k (=1, 2, \dots, N)$ 代表第 k 个子载波。本文以 4 段相等的训练序列为例,序列满足:

$$c_m(1) = c_m(N/4 + 1) = c_m(N/2 + 1) = c_m(3N/4 + 1) \quad (1)$$

由于没有 ICI 和 ISI,并且循环前缀比信道冲击响应要长,在接收机完成了同步运算后,频域的接收信号可以表示为:

$$Y_m(k) = \sqrt{S} c_m(k) H_m(k) + \sqrt{W} n_m(k) \quad (2)$$

其中, $n_m(k)$ 为服从零均值方差为 σ_n^2 的复高斯分布; S 为每个子信道上接收信号的功率; W 为噪声的功率; $H_m(k)$ 为电力线信道的频率响应,由式(3)给出。

$$H_m(k) = H(mT, k/T) = \sum_{l=1}^L h_l(mT, \tau_l) e^{-j2\pi k \tau_l / (NT)} \quad (3)$$

其中, $h_l(mT, \tau_l)$ 为第 m 个 OFDM 前导符号在信道第 l 径上的增益系数,满足 $\sum_{l=1}^L |h_l(mT, \tau_l)|^2 = 1$; T 为 OFDM 前导符号的持续时间; L 为电力线信道多径的总径数。

1.2 电力线信道测量与建模

要得出可信的计算与仿真结果,电力线信道的准确测量和建模十分重要。本文采用了基于传输线理论的自下而上的建模方法^[8-10],低压电力线信道网络拓扑、电缆和负载参数在典型的大学办公室环境实测得到。根据文献[8]的方法,电力线网络拓扑被分割成若干个基本单元,每个基本单元的传输函数可以由式(4)计算。

$$H^{(n)}(f) = \frac{U_{el}^{(n)}}{U_{l1}^{(n)}} = \frac{U_{el}^{(n)}}{U_p^{(n)}} \frac{U_p^{(n)}}{U_{l1}^{(n)}} = \frac{1 + \Gamma_{el}^{(n)}}{e^{r_{el}^{(n)} l_p^{(n)}} + \Gamma_{el}^{(n)} e^{-r_p^{(n)} l_p^{(n)}}} \frac{1 + \Gamma_p^{(n)}}{e^{r_p^{(n)} l_p^{(n)}} + \Gamma_p^{(n)} e^{-r_{el}^{(n)} l_p^{(n)}}} \quad (4)$$

其中, $U_{el}^{(n)}$ 和 $U_{l1}^{(n)}$ 分别为第 n 个单元的接收侧与传输侧的相对电压,其他参数与文献[8]中的定义一致。这样系统的总传输函数可以表示为:

$$H(f) = \prod_{n=1}^N H^{(n)}(f) \quad (5)$$

图 2 和图 3 分别给出 5 条有不同传输函数的低压电力线信道的幅频特性图和相频特性图,频率范围为 10 kHz~40 MHz。

噪声建模方面,低压电网的噪声主要包括^[11]:有色背景噪声、周期或非周期性的脉冲噪声和由空间耦合过来的窄带干扰。

实测中有色背景噪声变换相对缓慢,所以自回归 (AR) 模型被用作背景噪声建模;脉冲噪声则使用服从泊松分布的模型。办公室环境下 24 h 实测电力线噪声见图 4。

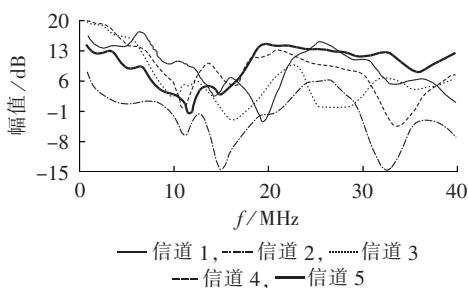


图 2 电力线信道幅频响应

Fig.2 Amplitude-frequency response of power line channel

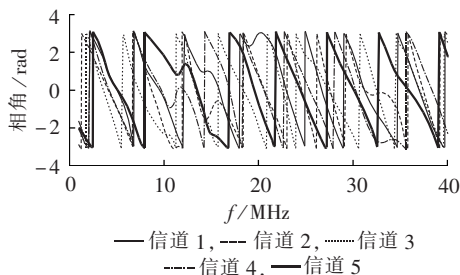


图 3 电力线信道相频响应

Fig.3 Phase-frequency response of power line channel

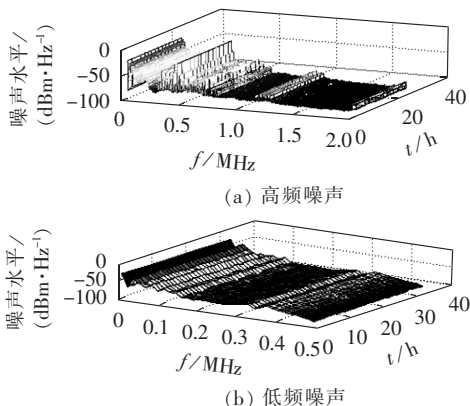


图 4 24 h 实测电力线噪声

Fig.4 Measured power line noise for 24 hours

2 OFDM 信噪比估计算法

基于上述 OFDM 系统模型和电力线信道模型,对接收端第 m 个 OFDM 符号的信噪比估计可以表示为:

$$\rho = \frac{E \left\{ \sum_{k=1}^N \left| \sqrt{S} c_m(k) H_m(k) \right|^2 \right\}}{E \left\{ \left| \sqrt{W} n_m(k) \right|^2 \right\}} = \frac{E \left\{ S \sum_{k=1}^N \left| c_m(k) H_m(k) \right|^2 \right\}}{E \left\{ W \left| n_m(k) \right|^2 \right\}} = \frac{S \sum_{k=1}^N \left| H_m(k) \right|^2}{NW} \quad (6)$$

因为 $\sum_{l=1}^L |h_l(mT, \tau_l)|^2 = 1$, 所以根据帕斯瓦尔定理有 $\sum_{k=1}^N |H_m(k)|^2 = N$, 这样信噪比估计的公式可以写为:

$$\bar{\rho} = \frac{S \sum_{k=1}^N |H_m(k)|^2}{NW} = S/W \quad (7)$$

而每个子载波上的信噪比为:

$$\rho_{\text{sub}} = \bar{\rho} |H_m(k)|^2 \quad (8)$$

最小均方误差(MMSE)的信噪比估计算法是以估计值误差与信道频率响应估计的正交性为基础,其表达式为:

$$\bar{\rho}_{\text{MMSE}} = \frac{S_{\text{MMSE}}}{W_{\text{MMSE}}} = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y(n) C^*(n) \right|^2 \div \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |Y(n)|^2 - \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y(n) C^*(n) \right|^2 \right] \quad (9)$$

其中, $Y(n)$ 、 $C(n)$ 分别为接收信号和原始发送序列的幅值, N 为序列的长度, “*” 表示共轭。

文献[6]为采用 2 段相等结构同步训练序列的 MIMO-OFDM 提出一种新的信噪比估计算法,此方法可以扩展到 SISO-OFDM 系统中,算法可表示为:

$$\bar{\rho}_{\text{Bouard}} = \frac{S_{\text{Bouard}}}{W_{\text{Bouard}}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |\hat{H}(n)|^2 \div \left\{ \frac{1}{4N} \sum_{n=0}^{N-1} \text{abs}[C(n-1) \times (Y(0,n) + Y(1,n)) - C(n)(Y(0,n-1) + Y(1,n-1))]^2 \right\} \quad (10)$$

其中, $Y(k,n)$ 为接收信号中第 $k+1$ 个符号的第 n 个抽样的幅值; $\text{abs}[\cdot]$ 表示取绝对值。

盲信噪比估计中经典的算法有 M2M4 算法,算法对接收信号分别做二阶矩和四阶矩并化简,该算法可以表示为:

$$\bar{\rho}_{\text{M2M4}} = Y \frac{S_{\text{M2M4}}}{W_{\text{M2M4}}} = \sqrt{2E[y^2(i,j)]^2 - E[y^4(i,j)]} \div \{E[y^2(i,j)] - \sqrt{2E[y^2(i,j)]^2 - E[y^4(i,j)]}\} \quad (11)$$

其中, $y(i,j)$ 为第 i 个接收符号的第 j 个抽样值。

本文提出算法用于数据辅助估计时采用系统的同步训练序列。本文使用的同步训练序列在时域上为 4 段相等的结构,这样在频域上 2 个装载了数据的相邻子载波间有 3 个虚拟的子载波。对于有 N 个子载波的 OFDM 系统,虚拟子载波如下:

$$c_m(4i+j)=0 \quad i=0,1,\dots,N/4-1; j=1,2,3 \quad (12)$$

而其余的子载波 $c_m(4i)$ ($i=0,1,\dots,N/4-1$) 为 QPSK 映射后的复数。这样接收信号的二阶矩可以写为:

$$E\{|R_m(k)|^2\} = E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} |y_m(4i)|^2\right\} + E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} \sum_{j=1}^3 |y_m(4i+j)|^2\right\} \quad (13)$$

等式右边的第 1 项可以化为:

$$E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} |y_m(4i)|^2\right\} = \frac{1}{N_L} \sum_{i=0}^{N/4-1} |y_m(4i)|^2 = \frac{1}{N_L} \sum_{i=0}^{N/4-1} |c_m H_m(4i) + n_m|^2 = S + W \quad (14)$$

其中, N_L 为数据子载波的数目。

第 2 项是虚拟子载波二阶矩的期望值:

$$E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} \sum_{j=1}^3 |y_m(4i+j)|^2\right\} = E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} \sum_{j=1}^3 |n_m(4i+j)|^2\right\} = W \quad (15)$$

所以基于虚拟子载波的 OFDM 平均信噪比估计可以写作:

$$\bar{\rho} = S/W = \frac{E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} |y_m(4i)|^2\right\} - E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} \sum_{j=1}^3 |y_m(4i+j)|^2\right\}}{E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} \sum_{j=1}^3 |y_m(4i+j)|^2\right\}} = \frac{E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} |y_m(4i)|^2\right\}}{E\left\{\sum_{i=0}^{N/4-1} \sum_{j=1}^3 |y_m(4i+j)|^2\right\}} - 1 \quad (16)$$

同理,在 OFDM 频域首尾两端的保护虚拟子载波可以用来进行信噪比的盲估计。假设系统频域 $c_m(k)$ ($k=0,1,\dots,t-1$) 和 $c_m(k)$ ($k=N-t+1,\dots,N$) 为虚拟子载波,而其他载波为 QPSK 映射的数据。这样可以由任意一帧不含有训练序列或导频的 OFDM 信号估计得到信噪比:

$$\bar{\rho} = S/W = \frac{E\left\{\sum_{k=t}^{N-t} |y_m(k)|^2\right\} - E\left\{\sum_{k=0}^{t-1} |y_m(k)|^2 + \sum_{k=N-t+1}^N |y_m(k)|^2\right\}}{E\left\{\sum_{k=0}^{t-1} |y_m(k)|^2 + \sum_{k=N-t+1}^N |y_m(k)|^2\right\}} = \frac{E\left\{\sum_{k=t}^{N-t} |y_m(k)|^2\right\}}{E\left\{\sum_{k=0}^{t-1} |y_m(k)|^2 + \sum_{k=N-t+1}^N |y_m(k)|^2\right\}} - 1 \quad (17)$$

每个子载波的信噪比可以由平均信噪比 $\bar{\rho}$ 和信道系数得到:

$$\rho_{\text{sub}} = \frac{|\bar{H}(k)|^2}{W} \bar{\rho} \quad (18)$$

从式(16)、(17)可以看出,本文算法只需要计算接收端训练序列时域各点的能量,然后求比值,只需要 N 次乘法运算,比经典信噪比估计算法式(9)~(11)更加高效,因此更加适用于实际载波系统的硬件实现。同时由等式(14)、(18)可以看出本文算法的估计精度是受虚拟子载波的数目以及信道系统的估计精度影响。

3 仿真实验

信噪比估计算法的仿真采用了蒙特卡洛仿真方法,进行 10 000 次的仿真计算。本文算法用作数据辅助算法时与经典的 MMSE 算法以及 Bouard 算法进行比较,用作盲估计时与经典的 M2M4 算法

做对比。系统参数如下:每个 OFDM 符号采用 1 024 个子载波,循环前缀 84 个采样长度;前导帧包含 2 个训练序列,其中本文算法利用第 1 个训练序列而 Boumard 算法使用全部的 2 个训练序列;在盲估计的系统中同样使用 1 024 个子载波的 OFDM 符号,其中首尾共有 102 个子载波为虚拟子载波。

信噪比估计的性能分析对比在 AWGN 信道(信道 1)和基于实测数据的低压电力线信道(信道 2)中展开;算法的对比结果采用归一化均方误差值(NMSE)来对比:

$$\text{NMSE} = \frac{1}{N_{\text{times}}} \sum_{n=0}^{N_{\text{times}}-1} \left(\frac{\bar{\rho}_n - \rho_{\text{real}}}{\rho_{\text{real}}} \right)^2 \quad (19)$$

其中, $\bar{\rho}$ 为算法得到的平均信噪比估计, ρ_{real} 为真实的信噪比值, N_{times} 为仿真次数。同样归一化偏差值(NB)也可以用来进行估计算法的性能对比:

$$\text{NB} = \frac{1}{N_{\text{times}}} \sum_{n=0}^{N_{\text{times}}-1} \frac{\bar{\rho}_n - \rho_{\text{real}}}{\rho_{\text{real}}} \quad (20)$$

对于每个子载波的归一化均方误差为:

$$\text{NMSE}_{\text{sub}} = \frac{1}{N_{\text{times}}} \sum_{n=0}^{N_{\text{times}}-1} \sum_{k=1}^N \left(\frac{\bar{\rho}_n(k) - \rho_{\text{real}}(k)}{\rho_{\text{real}}(k)} \right)^2 \quad (21)$$

图 5 所示为本文算法与 Boumard 算法、MMSE 算法通过实测电力线信道的平均信噪比均值在数据辅助模式下的对比。仿真结果可见本文算法与 Boumard 算法在实际信噪比大于 -5 dB 的区间估计性能均好于 MMSE 算法,但在实际信噪比低于 -5 dB 的情况下,本文算法具有比其他 2 种算法更好的估计性能。在实际信噪比趋于 $-\infty$ 时, Boumard 算法的估计值趋于 -3 dB。

图 6 和图 7 所示为不同数据辅助算法的归一化均方误差和归一化偏差对比图。可见在实际信噪比较高的情况下本文算法与 Boumard 算法有近似的估计精度,而在实际信噪比较低的情况下本文算法的误差要小于另外 2 种算法,在 -20 dB 下算法的归一化偏差也很小。

图 8 和图 9 显示了不同算法在盲估计模式下的性能对比。图 8 所示为信噪比的估计均值对比,图 9 为归一化均方误差对比。盲估计可以用在信噪比估计的跟踪模式或者其他对精度要求较低场合。本文算法与 M2M4 算法在 1 个 OFDM 符号内均使用 102 个虚拟子载波,算法在实测电力线信道中实现。可见在大多数情况下,本文算法的估计精度要高于经典的 M2M4 算法。

图 10 所示为各算法在不同的信道下的归一化均方误差的对比。同其他算法相比本文算法在电力线信道和 AWGN 信道下均显示出较好的估计性能,更加接近克拉美罗界。

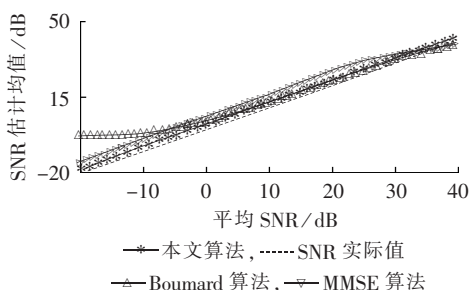


图 5 不同数据辅助算法的平均信噪比估计均值

Fig.5 Mean of SNR estimated by different DA algorithms

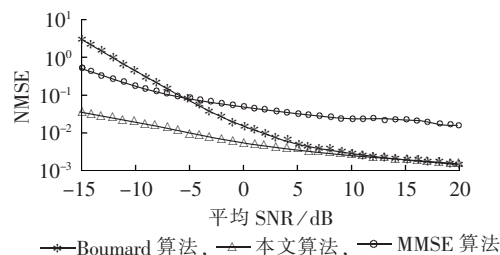


图 6 不同数据辅助算法的信噪比估计归一化均方误差

Fig.6 NMSE of SNR estimated by different DA algorithms

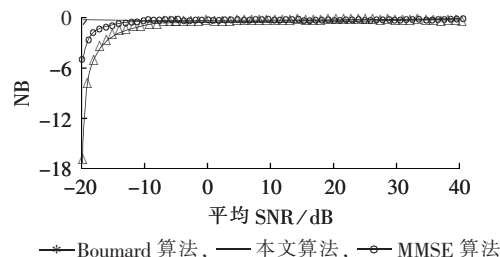


图 7 不同数据辅助算法的信噪比估计归一化偏差

Fig.7 NB of SNR estimated by different DA algorithms

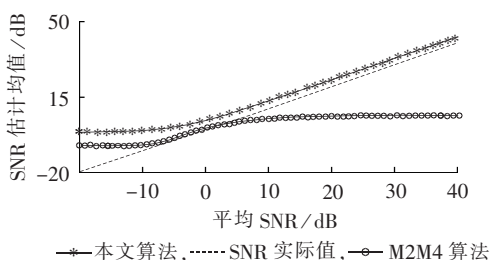


图 8 不同盲估计算法的平均信噪比估计均值

Fig.8 Mean of SNR estimated by different blind estimation algorithms

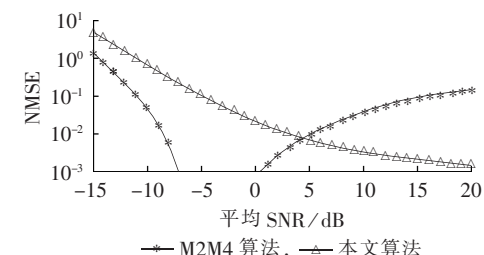


图 9 不同盲估计算法的信噪比估计归一化均方误差

Fig.9 NMSE of SNR estimated by different blind estimation algorithms

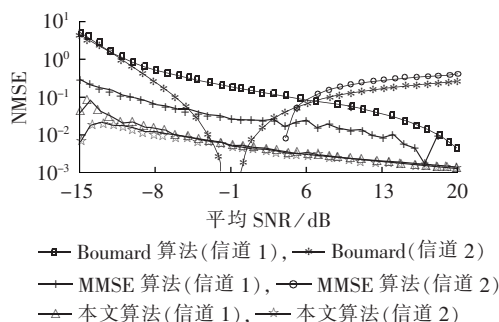


图 10 信道 1 和信道 2 的信噪比估计归一化均方误差

Fig.10 NMSE of estimated SNR of channel 1 and channel 2

4 结论

自适应 OFDM 为带宽受限的电力线通信提供了高效的频带利用率和更高速的比特率。准确并且灵活的信噪比估计算法是实现自适应 OFDM 的前提和基础。研究适用于电力线信道特点的信噪比估计算法对改善宽带电力线的通信质量有非常重要的意义。

本文针对电力线信道下自适应 OFDM 系统中的信噪比估计问题,提出一种基于虚载波的算法。该算法使用频域中的虚拟子载波信息,通过计算接收信号的二阶矩来完成信噪比的推导,可以灵活运用需要数据辅助估计和盲估计的情况。计算机仿真结果表明本文算法在实测电力线信道下有较高的估计精度,同时算法复杂度相对较低,是一种适用于实际系统的信噪比估计方法。

参考文献:

- [1] DOSTERT K M. Power lines as high speed data transmission channels modeling the physical limits[C]//International Symposium on Power Line Communications and Its Application (ISPLC1998). Sun City, Japan: IEEE, 2000: 585-589.
- [2] YANG Xiaoxian, ZHENG Tao, ZHANG Baohui, et al. Channel model and measurement methods for 10 kV medium-voltage power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 129-134.
- [3] ZHENG Tao, YANG Xiaoxian, ZHANG Baohui. Broadband transmission characteristics for power-line channels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1905-1911.
- [4] PAULUZZI D, BEAULIEU N. A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(10): 1681-1691.
- [5] BEAULIEU N, TOMS A, PAULUZZI D. Comparison of four SNR estimators or QPSK modulations[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(2): 43-45.
- [6] BOUMARD S. Novel noise variance and SNR estimation algorithm for wireless MIMO OFDM system[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2003: 1330-1334.
- [7] TRACHANNAS I, DOSTERT K, FLIEGE N J. Phase based SNR estimation in OFDM over the medium voltage network[C]//Proceedings of the 14th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Riode Janeiro, Brazil: IEEE, 2010: 188-193.
- [8] TONELLO A, ZHENG T. Bottom-up transfer function generator for broadband PLC statistical channel modeling[C]//International Symposium on Power Line Communications and Its Application, 2009. Dresden, Germany: IEEE, 2009: 7-12.
- [9] MENG H, CHEN S, GUAN Y L, et al. Modeling of transfer characteristics for the broadband power line communication channel[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1057-1064.
- [10] GALLI S, BANWELL T. A novel approach to the modeling of the indoor power line channel part II: transfer function and its properties[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1869-1878.
- [11] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the power line channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(4): 553-559.
- [12] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks[C]//International Symposium on Power Line Communications and Its Application (ISPLC2000). Limerick, Ireland: IEEE, 2000: 131-138.
- [13] ZHANG Youbing, CHENG Shijie. A novel multicarrier signal transmission system over multipath channel of low voltage power line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1668-1672.
- [14] ATHANASIOS D, KALIVAS G. SNR estimation for low bit rate OFDM systems in AWGN channel networking[C]//IEEE 2006 International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies: ICN/ICONS/MCL06. Mome, Sweden: IEEE, 2006: 193-198.
- [15] 任光亮, 罗美玲, 常义林. OFDM 系统信噪比估计新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(5): 693-696.
- REN Guangliang, LUO Meiling, CHANG Yilin. Novel SNR estimation algorithm for OFDM systems[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(5): 693-696.
- [16] 陈长德, 刘海涛, 张保会. OFDM 调制技术在宽带高速电力线通信中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 55-59.
- CHEN Changde, LIU Haitao, ZHANG Baohui. Application of OFDM modulation in power line telecommunication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 55-59.
- [17] 郭静波, 王赞基. 低压配电网扩频信号传输特性及通信系统实现对策[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 78-82.
- GUO Jingbo, WANG Zanjie. Spread spectrum signal transmission over low voltage distribution networks and realization counter measures of the communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 78-82.

作者简介:

梁 栋(1982-),男,山西临汾人,博士研究生,主要从事智能电网与电力线通信方面的研究(E-mail: jxgd.ld@stu.xjtu.edu.cn);

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,从事电力系统继电保护、电力市场环境下的安全性和经济性的统一、安全稳定控制和电力系统通信等方面的研究(E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn);

郝治国(1976-),男,内蒙古鄂尔多斯人,讲师,主要从事电力系统继电保护、安全稳定控制等方面的研究。

SNR estimation in OFDM for broadband power line communication

LIANG Dong,ZHANG Baohui,NIU Dongwen,FU Keyuan,HAO Zhiguo

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: The model of OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system based on power line communication is introduced and the channel and noises of power line communication are modeled. Since the synchronization training sequence with repeated structure is applied,there are three virtual sub-carriers between every two data-loaded adjacent sub-carriers in frequency-domain,which can be used in data-aided estimation. The guard virtual sub-carriers at both ends of OFDM system in frequency-domain are used in blind SNR(Signal to Noise Ratio) estimation. Simulative results show that,in data-aided estimation,the precision of the proposed algorithm is similar to that of Boumard algorithm if the actual SNR is relatively high,otherwise it is higher than that of MMSE algorithm or Boumard algorithm;in blind SNR estimation,it is higher than that of M2M4 algorithm in most conditions.

Key words: power line; communication; signal to noise ratio; OFDM; estimation; model buildings

(上接第 90 页 continued from page 90)

国电机工程学报,2010,30(25):17-22.

WANG Min,DING Ming. Probabilistic evaluation of static voltage stability taking account of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):17-22.

[25] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社,1990.

[26] 范荣奇,陈金富,段献忠,等. 风速相关性对概率潮流计算的影响分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):18-22,76.

FAN Rongqi,CHEN Jinfu,DUAN Xianzhong,et al. Impact of wind speed correlation on probabilistic load flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(4):18-22,76.

[27] 胡泽春,王锡凡,张显,等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):26-33.

HU Zechun,WANG Xifan,ZHANG Xian,et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):26-33.

作者简介:

郭效军(1965-),男,江苏南京人,高级工程师,主要从事电力自动化设备的研制及管理工作(E-mail:xiaojun-guo@sac-china.com);

蔡德福(1987-),男,江西赣州人,博士研究生,主要研究方向为含可再生能源发电和电动汽车充电负荷的电力系统运行分析。

Comparison of probabilistic load flow calculation based on cumulant method among different series expansions

GUO Xiaojun¹,CAI Defu²

(1. Guodian Nanjing Automation Co.,Ltd.,Nanjing 210032,China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: PLF-CM(Probabilistic Load Flow calculation based on Cumulant Method) performs linearization at the operating point of power system to quickly obtain the distribution of system state variables. Large-scale integration of wind power and photovoltaic power enhances the variation of power system load flow and different series expansions are suitable for different distribution types of system state variable. With a power system with wind/photovoltaic power as the analysis object,the calculative results by Monte Carlo method as the references and the average root mean square of the cumulative distribution of output random variable as the evaluation index,the accuracy of PLF-CM are compared among various input random variables and different series expansions,and the causes of its errors are analyzed.

Key words: cumulant method; Monte Carlo method; probabilistic load flow; series expansion; wind power; photovoltaic power