

基于 OFDM 电力线载波通信系统同步新方法

罗春风¹, 文劲宇², 杨慧敏², 熊兰²

(1. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种新的符号定时同步判决准则, 并将其应用于低压电力线 OFDM 载波通信系统, 实现了准确的符号同步。将所提出的方法及延迟相关法、改进延迟相关定时同步算法分别应用于实际低压电力线弥散通信网络中, 对比分析结果表明采用提出的新定时同步准则算法克服了改进延迟相关法可能引起误判, 判决阈值选择裕度小这一缺点, 算法更稳定可靠。实际低压电力线信道实验网络测试表明, 新判决准则不仅可以有效地进行 OFDM 系统准确的符号定时同步, 且判决阈值选择裕度大, 计算量较小。

关键词: 低压电力线载波通信; 正交频分复用; 符号定时同步; 延迟相关法; 同步判决准则

A new timing synchronization method for low-voltage OFDM power-line communication system

LUO Chun-feng¹, WEN Jin-yu², YANG Hui-min², XIONG Lan²

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Foshan 528000, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new decision criterion is proposed for timing synchronization and applied in LV OFDM power line which has realized accurate symbol synchronization. The delay and correlation algorithms as well as the new synchronization algorithm proposed are used in a realistic low voltage power line. The performances of three timing synchronization algorithms are compared. It is concluded that the proposed synchronization scheme can settle the possible misjudgment problem of modified delay and correlation algorithm and the condition that the selection margin of decision margin is small, so the algorithm is more steady and reliable. In addition, the proposed approach is advantageous to improve the selection margin of decision threshold and reduce the computation.

Key words: low voltage power-line communication; OFDM; symbol timing synchronization; delay and correlation algorithm; synchronization decision criterion

中图分类号: TN919; TP84 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0028-05

0 引言

正交频分复用 (OFDM) 技术用于低压电力线载波通信可以有效克服电力线弥散信道的多径、频率选择性衰落特性影响。但 OFDM 系统对同步误差的影响相当敏感, 准确的符号定时和频偏估计是实现 OFDM 系统的关键。

载波频率偏差将引起 OFDM 系统严重的子信道间串扰 (ICI); 定时偏差将引入符号间干扰^[1]。虽然在 OFDM 符号间插入适当长度的带循环前缀的保护间隔 (GI) 可以有效地对抗多径时延扩展引起的符号间干扰, 但在低压电力线多径衰落传输通

信网络中, 符号定时同步的精确度关系到 OFDM 系统对信道时延扩展的敏感度, 因此应尽量选择合适的定时同步方法, 以减少符号定时同步的偏差, 同时提高其对频偏和信道影响的鲁棒性。

T.M.Schmidl 和 D.C.Cox 提出的延迟相关同步方法^[2]在噪声突然减小时, m_n 出现较高数值会引起误判, 文献[3]引用的改进延迟相关法在噪声相关度增大时, 很可能会超过设定的判决阈值而引起误判, 阈值选择裕度小。针对上述缺点, 本文采用一种新的符号定时同步准则方法实现了低压电力线 OFDM 载波通信系统的准确符号同步。在基于 OFDM 的 PLC 系统实验环境中对实际的接收信号进行定时同步估计分析。实验结果表明本文提出的新定时同步准则算法克服了改进延迟相关法误判的可能, 判决阈值选择裕度大, 算法更稳定可靠, 且

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-06-0643)

不受频偏影响。

1 基于 OFDM 的 PLC 系统定时同步

由于低压配电网含有各种背景噪声、窄带干扰和脉冲噪声，噪声干扰对 OFDM 定时同步影响很大，因此需要对电力线噪声进行分析，有效滤除带外噪声。

1.1 低压电力线信道噪声特性分析

图 1 给出了本文使用的室内低压电力网载波通信实验系统的结构，该通信网络可以看成由多个节点、分支以及相互不匹配的线路所组成，信号在网络中的多径传输会产生一定的衰减^[4]，由于低压电力线信道的影响，发送信号经过电力线信道叠加各种噪声干扰后，会发生严重的畸变。

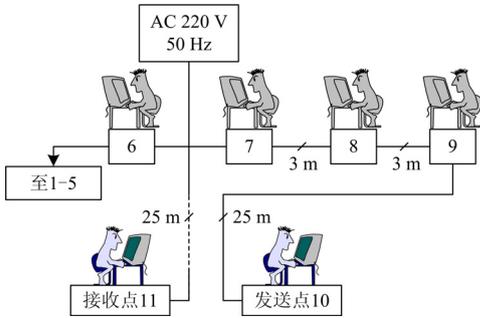


图 1 电力线通信试验网络拓扑图

Fig.1 Powerline communication test network topology

经过耦合器，在接收端（图 1 的接收点 11）接收到的信号如图 2 所示。

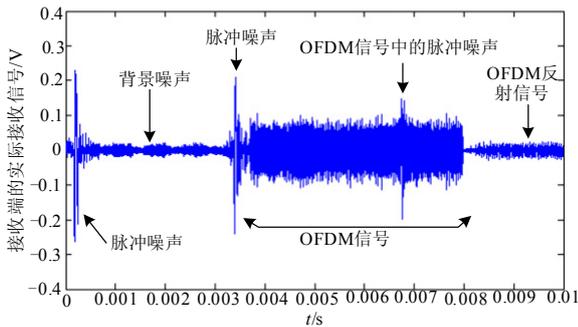


图 2 电力线上的 OFDM 信号和噪声

Fig.2 OFDM signal and noises on powerline

对图 2 所示的接收信号进行分析可知，电力线脉冲噪声具有很大的峰值和功率，背景噪声幅度虽小，但其相关度比较高，这两种噪声在时域上与 OFDM 信号重叠，但其所在的主要频率不与 OFDM 信号频段重合^[5]，因此可以设计带通滤波器滤除噪声。

1.2 OFDM 符号定时同步

OFDM 系统中的符号定时同步就是要检测接收到采样序列的符号起始位置，也就是解决传输帧的定位问题。

对低压电力线多径衰落信道来讲，时域同步通常采用延迟相关准则，是在结构的数据包前设置两个相同的训练符号，利用其相关系数实现定时同步。

1.2.1 延迟相关法

T.M.Schmidl 和 D.C.Cox 针对 OFDM 符号定时同步问题，提出了延迟相关同步方法。我们选择训练符号的频带宽度与 OFDM 符号频带相同，在偶数子载波上有相同的功率谱密度，而在奇次子载波上功率为 0。图 3 是延迟相关算法的示意图。

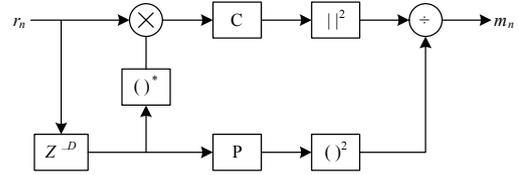


图 3 延迟相关算法信号流程图

Fig.3 Signal flow structure of delay and correlation algorithm

延迟相关定时同步算法如式 (1) 所示。

$$\left\{ \begin{aligned} c_n &= \sum_{k=0}^{L-1} (r_{n+k-L}^* r_{n+k}) \\ p_n &= \sum_{k=0}^{L-1} r_{n+k} r_{n+k}^* = \sum_{k=0}^{L-1} |r_{n+k}|^2 \\ m_n &= \frac{|c_n|^2}{(p_n)^2} \\ \hat{n} &= \arg \max(m_n) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

由于延迟相关法的估值方差较大，存在数据帧定时不确定性因素。另外由于延迟相关算法是用两个相继窗口相关度来除以后一窗口的功率来确定同步的，当后一窗口从信号尾部滑动到噪声处时，噪声功率远小于信号功率，容易使得 m_n 出现较高数值而引起误判。

1.2.2 改进延迟相关法

这种算法采用两个相关窗口中所有采样点的功率作为判决函数，在噪声功率相对比较小，即信噪比比较大时，对信号首端的 m_n 的影响不大。而对于噪声来说， m_n 应该基本不变，找到 m_n 最大值点后，再取两个最大值的 90% 的点，一点位于最大值的左边，一点位于其右边，对三点进行均值运算。

改进延迟相关定时同步算法如式 (2) 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} c_n = \sum_{k=0}^{L-1} (r_{n+k-L}^* r_{n+k}) \\ p'_n = \sum_{k=-L}^{L-1} r_{n+k} r_{n+k}^* = \sum_{k=-L}^{L-1} |r_{n+k}|^2 \\ M = \max\left(\frac{4 \times |c_n|^2}{(p'_n)^2}\right) \\ \hat{n} = \frac{\text{index}(M) + \text{index}1(0.9M) + \text{index}2(0.9M)}{3} \end{array} \right. \quad (2)$$

改进延迟相关法判决准则虽然避免了噪声突然减小时, m_n 出现较高数值而引起误判的几率, 但由于噪声影响, 在噪声的 m_n 波动比较大时, 准确设置 m_n 的门坎值 m_{th} 仍有一定的难度, 阈值选择裕度较小。

1.2.3 符号定时同步延迟相关判决新准则

通过适当设置判决函数, 可以使噪声的 m_n 处于负值, 当训练符号到达后, 由于相关系数增大, 使 m_n 变为正值, 这样就可以解决由于噪声的 m_n 波动而带来 m_n 阈值设置困难的问题。通过对大于 m_n 最大值 M 的 0.9 倍的时标取均值进行准确符号定时。符号定时同步新准则如式 (3) 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_n = \sum_{k=0}^{L-1} (r_{n+k-L}^* r_{n+k}) \\ \varepsilon_n = \sum_{k=-L}^{L-1} r_{n+k} r_{n+k}^* = \sum_{k=-L}^{L-1} |r_{n+k}|^2 \\ m_n = \frac{2 \times (3|\gamma_n| - \varepsilon_n)}{\varepsilon_n}, \quad M = \max(m_n) \\ \hat{n} = \text{mean}\{\text{index}(m_n > 0.9M)\} \end{array} \right. \quad (3)$$

应用这个新准则, 在同步训练符号到达前, 由于噪声相关度较小, $m_n = \frac{2 \times (3|\gamma_n| - \varepsilon_n)}{\varepsilon_n} = \frac{6|\gamma_n|}{\varepsilon_n} - 2$, 因此, 在绝大部分情况下 m_n 为负值, 当第二个窗口内的训练符号与第一个窗口内的训练符号完全相同时, 信号相关度 γ_n 接近于 1, 因此 m_n 的值为:

$$m_n = \frac{2 \times (3|\gamma_n| - \varepsilon_n)}{\varepsilon_n} = \frac{2 \times (3 \times 1 - 2)}{2} = 1$$

可见, 通过这种算法可以提高阈值的设置裕度。

2 同步实验结果

2.1 同步算法的试验及分析

对一组经过硬件带通滤波器后的接收信号分别进行延迟相关法符号定时同步、改进延迟相关法符号定时同步和本文提出的新判决准则符号定时同步。本文选用的这一接收信号中噪声的相关度比较

高。

图 4 为采用延迟相关算法对接收信号进行定时同步检测计算的结果。

图 4 (d) 是对图 4 (b) 中圆圈内部分放大显示的结果, 当接收器检测到信号的 m_n 首次接近 1 时, 判定信号到来, 就可以停止同步检测, 进入下一个通

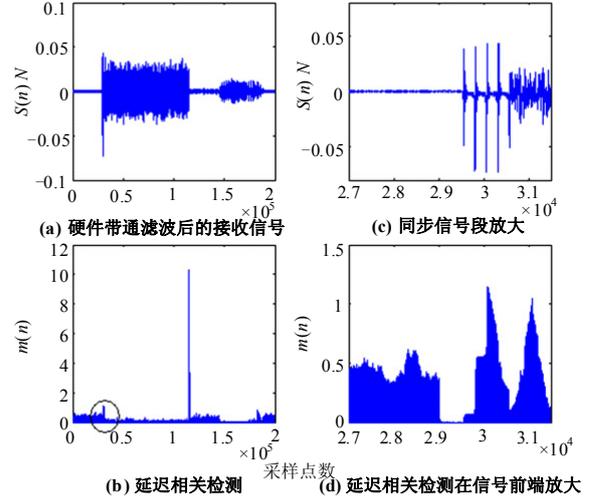


图 4 延迟相关法同步试验结果

Fig.4 Delay and correlation algorithm synchronization results

图 4 (c) 是与图 4 (d) 对应的经滤波后的实际信号的一部分, 经过滤波后噪声部分的 m_n 值在 0.5 左右。 m_n 的第一个尖峰出现在两个同步训练符号中间位置, 数值在 (1, 1.2) 范围内, 第二个尖峰是由于两个用于信道估计的相同训练符号引起的, 由于信道估计用的训练符号也是相同的, 因此信号的 m_n 值达到 1 左右。从图 4 (b) 可以看出 m_n 的最大峰值出现在 OFDM 信号的末端, 这是由于延迟相关算法是用两个相继窗口相关度除以后一窗口的功率, 当后一窗口从信号尾部滑动到噪声处时, 噪声功率远小于信号功率, 因此使得 m_n 值很高, 但这不影响设计的信号的同步过程。经过多个样本信号测试试验表明, 在信号首端 m_n 值通常在 (1, 1.2) 范围内, 噪声的 m_n 值不超过 0.8, 因此可以设置 m_n 值阈值为 $m_{th} = 0.9$ 。

图 5 为采用改进延迟相关算法对接收信号进行定时同步检测计算的结果。

从图 5 中可以看出, m_n 最大值处在信号的首端, 避免了如图 4 (c) 所示的信号末端 m_n 出现最大峰值的情况。同时改进延迟相关方法可以避免噪声突然减小时, m_n 出现较高数值而引起误判的几率。对多个样本测试试验发现在信号首端 m_n 值在 0.8 以上, 但不会超过 1。在噪声处 m_n 数值不超过 0.6,

m_n 阈值 m_{th} 可以在 0.6~0.8 范围内选择, 阈值 m_{th} 可选择裕度小, 可以设置 m_n 阈值为 $m_{th}=0.7$ 。但是当噪声相关度再稍微增大时, m_n 数值很可能会超过设定的判决阈值 m_{th} 而引起误判。

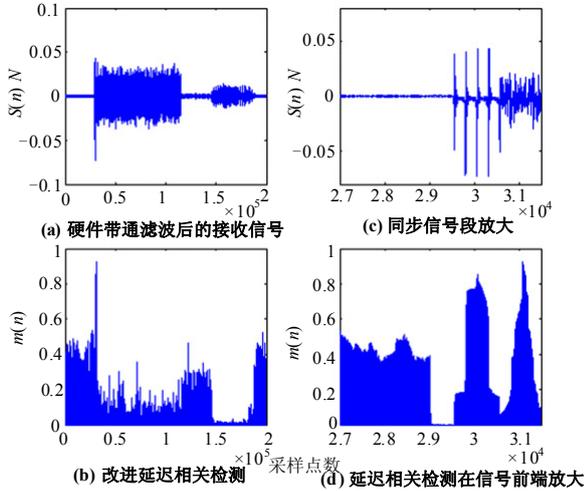


图 5 改进的延迟相关法同步试验结果

Fig.5 Modified delay and correlation algorithm experiment results

图 6 为采用延迟相关判决新准则对接收信号进行定时同步检测计算的结果。

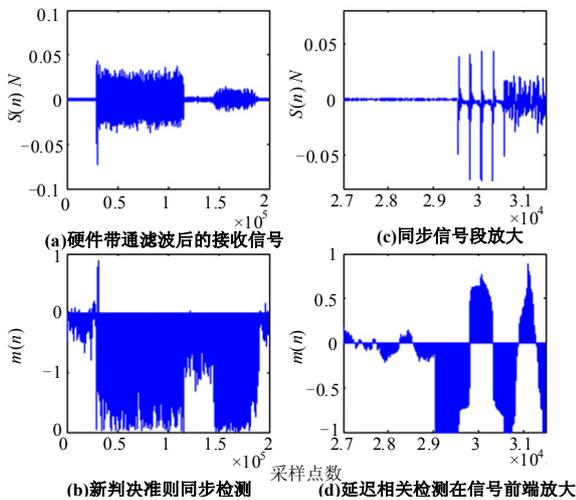


图 6 判决新准则同步试验结果

Fig.6 Modified new metric algorithm experiment results

从图 6 中可以看出, 在信号到达之前, m_n 基本为负值, 即使在个别相关度较高的噪声信号段, 其 m_n 值也在 0.2 以下, 而训练符号处的 m_n 最大值为 0.8, 这样就可以解决由于噪声的 m_n 波动而带来阈值设置困难的问题。可以设置 m_n 阈值为 0.3~0.7 范围内。采用本文提出的新判决准则, 即使噪声相关度增大时, 也不会轻易超过设定的判决阈值而引起

误判。

针对这种接收信号中噪声的相关度比较高的情况, 这时如果采用改进延迟法, 在信号到达之前的 m_n 值本身就有一定的波动, 其值接近 0.6, 如图 5(d) 所示, 而在训练符号处的 m_n 最大值为 0.85, 因此当噪声相关度再稍微增大时, 很可能会超过设定的判决阈值而引起误判。

另外, 采用本文提出的新判决准则也可以避免噪声突然减小时, m_n 出现较高数值而引起误判的可能性。因此新判决准则法更稳定可靠。对多个样本测试试验发现, 在信号首端, m_n 值都达到 0.8 以上, 但不会超过 1。在噪声处 m_n 数值不超过 0.2。因此可以将 m_n 的阈值设置为 $m_{th}=0.6$ 。

2.2 三种同步算法定时估计特性比较

信号参数估计的质量通常用其偏差和方差来度量^[6]。在图 1 所示低压电力线实验环境中, 对同一发送信号, 通过改变发送信号的幅值, 即改变发送信号的发送功率来改变信号的比特信噪比 (SNR), 测试不同同步方法下 OFDM 载波通信系统信号传输过程中的定时估计偏移。图 7 给出了分别采用延迟相关、改进延迟相关和本文提出的定时同步新判决准则算法情况下定时偏移估计的均值和方差曲线。

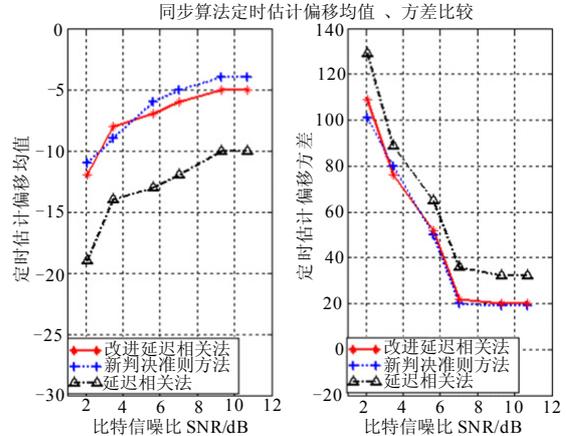


图 7 同步方法的定时估计偏移比较

Fig.7 Comparison of timing offset to different synchronization

从图 7 可以看出, 改进延迟相关算法的定时偏移估计均值曲线比延迟相关法更接近零坐标轴, 本文提出的新判决准则方法与改进延迟相关法的定时偏移估计均值曲线很接近; 从定时偏移估计方差曲线可以看出, 本文提出的延迟相关新判决准则算法的定时偏移估计方差比另外两种方法的方差小, 正确符号定时概率大于延迟相关同步算法。通过比较可以看出, 本文提出的新判决准则同步算法不但能

达到文献[3]所用改进延迟相关法的同步效果(通过定时偏移估计方差曲线基本一致可以得出),而且更重要的是成功解决了改进延迟相关法可能会引起误判,阈值 m_{th} 选择裕度小这一缺点。同时与改进延迟相关算法比较,新判决准则算法计算量更小,判决阈值选择裕度更大。

3 结语

本文提出一种符号定时同步新判决准则,采用该定时同步新方法实现了低压电力线 OFDM 载波通信系统的准确符号同步。在基于 OFDM 的 PLC 系统的实验环境中对真实的接收信号分别进行延迟相关法、改进延迟相关法和本文提出的新同步方法的定时同步性能对比分析,实验测试结果表明延迟相关法在噪声突然减小时容易产生误判,而改进延迟相关同步算法则通过采用计及双窗口功率均值和符号定时估计均值的措施,避免了判决函数值异常增大引起误判的可能性,但在噪声的相关度比较高的情况下,噪声 m_n 数值波动很可能会超过设定的判决阈值 m_{th} 而引起误判,同时判决阈值裕度选择小,本文采用定时同步新判决准则不但克服了延迟相关法判决函数值异常增大引起误判的缺陷,而且判决阈值裕度比改进延迟相关法大,计算量也相对较小。本文提出的符号定时同步新算法稳定可靠、精度高,是一种有效的低压电力线 OFDM 载波通信系统符号定时同步方法。

参考文献

[1] Schmidl T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Trans on Communications, 1997, 45 (12): 1613-1621.
 [2] Schmidl T M, Cox D C. Low-complexity burst

synchronization for OFDM[C]. //IEEE International Conference on Communications. 1996: 1301-1306.
 [3] 罗春风,程时杰,熊兰,等. 低压电力线 OFDM 载波通信系统符号定时同步方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (9): 65-71.
 LUO Chun-feng, CHENG Shi-jie, XIONG Lan, et al. Timing synchronization methods for low-voltage OFDM power line communication system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (9): 65-71.
 [4] 姜霞, Guimbis J N, 程时杰. 低压配电网载波通信噪声特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (11): 30-35.
 JIANG Xia, Guimbis J N, CHENG Shi-jie. Noise characteristics investigation in low voltage powerline communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (11): 30-35.
 [5] HE Hai-bo, CHENG Shi-jie, ZHANG You-bing, et al. Analysis of reflection of signal transmitted in low-voltage powerline with complex wavelet[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004,19 (1): 86-91.
 [6] Proakis J G. Digital communications fourth edition[M]. Singapore: McGraw-Hill International: Electrical Engineering Series, 2001.

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2009-12-05

作者简介:

罗春风(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统载波通信和继电保护运行管理; E-mail: winds8@sohu.com

文劲宇(1970-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制;

杨慧敏(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。

(上接第 27 页 continued from page 27)

SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, SONG Guo-bing, et al. Adaptive earth fault distance relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (17): 54-58.
 [9] 索南加乐,宋国兵,许庆强,等. 任意长度数据窗幅频特性一致的正交相量滤波器设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 45-49.
 SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, XU Qing-qiang, et al. The design of orthogonal phase filter with identical magnitude-frequency characteristics and optional data-window[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 45-49.
 [10] 沈冰,何奔腾,张武军. 新型自适应距离继电器[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7): 39-44.

SHEN Bing, HE Ben-teng, ZHANG Wu-jun. New type adaptive distance relay with improved performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (7): 39-44.

收稿日期: 2009-10-12; 修回日期: 2009-11-11

作者简介:

康小宁(1968-),男,副教授,研究方向为电力系统自动化和继电保护技术;

赵选宗(1985-),男,硕士研究生,研究方向为自适应继电保护; E-mail: xuanzong0329@163.com

索南加乐(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护领域的研究。