

面向电力线通信的 OFDM 符号定时同步算法

胡正伟, 贺冬梅, 谢志远

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:提出了一种面向电力线通信的改进正交频分复用(OFDM)符号定时同步算法,该算法结合了延迟相关算法受信道多径效应影响小以及本地相关算法具有尖锐相关峰值的优点。以延迟相关算法为主体,将同步过程分解为3个状态;通过设置状态转换条件及超时机制,可有效降低电力线噪声造成定时误判,在延迟相关算法确定的定位状态下搜索本地相关算法的峰值。建立了算法的 MATLAB 仿真模型,在电力线信道模型及噪声条件下,对虚警漏警概率、同步性能、简化算法的影响等指标进行了仿真分析,验证了算法的有效性。

关键词:电力线通信;正交频分复用;前导序列;符号同步

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.021

0 引言

电力线通信 PLC(Power Line Communication)是使用现有电网结构中的电力线作为通信介质的一种通信技术,具有无需重新布线、投资少且覆盖范围广等优点,在负载管理、数据集抄、故障定位、智能家居、灾后通信恢复等领域有着广泛的应用^[1-2]。但由于电力线的信道特性复杂,且受通信频率、网络拓扑、负载种类、负载工作状态及数量、噪声干扰等影响,通信的可靠性受到严重影响。因此提高通信可靠性一直是 PLC 领域的研究热点之一^[3-6]。

由于正交频分复用(OFDM)技术能够实现多载波通信,其可以将快速的串行数据流分解为若干慢速的并行数据流,且能够有效地抵抗多径传输效应造成的频率选择性衰落。此外,不同的载波不仅可以采取不同的调制解调方式,而且可以有选择地关闭某些载波达到功率/速率最优化或避开某些授权频段。目前,大部分 PLC 标准的物理层均采用 OFDM 技术实现数据可靠传输,如 HomePlug AV、DS2/UPA、HD-PLC、IEEE P1901、G.9960 和 G3-PLC 等^[7]标准。

同步技术是 OFDM 系统的关键技术之一,同步性能对 OFDM 系统的性能影响很大^[8-9]。OFDM 系统中的同步主要包括载波同步、样值同步和符号同步3个部分。载波同步是为了实现接收信号的相干解调,样值同步是为了使接收端和发送端的采样频率一致,符号同步是为了区分 OFDM 符号的边界。

目前,符号定时同步方法以延迟相关算法^[10]和

本地相关算法^[11]为主。延迟相关算法的相关峰值具有平台效应,文献[12-13]对其进行了改进,但仍然不能在低信噪比下实现正确同步。本地相关算法虽可获得较为明显的相关峰值,但电力线信道下的脉冲噪声、窄带干扰等增加了定时同步出现误判的概率,因此也不能应对电力线信道的恶劣环境^[14]。文献[14]提出了联合使用延迟相关算法和本地相关算法的同步方法,该方法通过判断本地相关峰值是否大于预设阈值实现定时同步。本地相关峰值由于同时受噪声和信道多径效应的影响,其值较低。与本地相关峰值相比,延迟相关峰值只受到噪声的影响,原因是电力线信道相对于数据传输速率可以看作是慢时变信道。在等同条件下,延迟相关峰值大于本地相关峰值。因此,当阈值相同时,延迟相关算法相对于本地相关算法具有较大的噪声容限,即延迟相关峰值在较宽的信噪比范围内大于阈值,能够降低漏警概率。因为电力线信道的噪声和负载变化导致信噪比具有较大的波动范围,因此延迟相关算法在信号检测方面要优于本地相关算法。

虽然延迟相关算法的相关峰值较大,但其缺点是相关峰值具有平台效应,即延迟相关的峰值与相邻点处的延迟相关值接近,类似一个平台,峰值不明显,同步易受噪声干扰。为了克服该缺点,鉴于本地相关算法具有尖锐相关峰值的特点,本文提出了一种以延迟相关算法实现信号检测,以本地相关算法实现同步位置定位的联合同步算法。

本文方法采用有限状态机将延迟相关算法的同步状态划分为等待、接收和定位3个状态。状态之间的转换条件不是单纯与阈值进行比较,而是判断比较结果是否连续超过某一预设常数值。为了进一步降低噪声造成的状态误触发概率,在接收状态和定位状态中引入超时判断,当超时现象发生时退回到等待状态;在定位状态中搜索本地相关算法的相关值的峰值。

另外,针对“硬件易实现”的需求,本文分析了

收稿日期:2018-04-27; **修回日期:**2019-03-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61601182);河北省创新创业实践基地建设项目(2017CXCY135);河北省科技计划项目(17211704D)

Project supported by the the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China(61601182), Hebei Innovation and Entrepreneurship Practice Base Construction Project(2017-CXCY135) and Hebei Science and Technology Project(17211704D)

联合同步算法的简化方法,分析了计算量及对同步性能的影响。

为了验证本文方法的可行性和有效性,结合电力线信道模型及电力线噪声模型,在 MATLAB 环境下对本文方法进行了建模仿真。

1 延迟相关算法

1.1 延迟相关算法原理

延迟相关算法的原理如式(1)~(3)所示。式(3)可实现信号功率归一化,保证门限值与信号衰减无关。

$$C_n = \sum_{k=0}^{L-1} r_{n+k} r_{n+k+D}^* \quad (1)$$

$$P_n = \sum_{k=0}^{L-1} r_{n+k+D}^2 \quad (2)$$

$$M_n = \frac{|C_n|^2}{P_n^2} \quad (3)$$

其中, n 为数字采样序列标记; r_{n+k} 、 r_{n+k+D} 分别为当前接收数字序列和 D 个时钟周期前的接收数字序列;“*”表示共轭转置; L 为 OFDM 符号长度。

1.2 低计算量延迟相关算法

针对硬件实现,文献[15]对延迟相关算法进行了改进,可以降低硬件资源消耗。

式(4)为 $L=D$ 时由式(1)展开后得到的递推表达式。

$$C_{n+1} = C_n + r_{n+L} r_{n+2L}^* - r_n r_{n+L}^* \quad (4)$$

由于 PLC 中通信数据一般只传输实部,因此得到式(4)的实数表达式(5)。

$$C_{n+1} = C_n + r_{n+L} r_{n+2L} - r_n r_{n+L} = C_n + r_{n+L} (r_{n+2L} - r_n) \quad (5)$$

对于一个新接收的采样符号,只需计算滑入窗口和滑出窗口的符号的乘积,共需 1 次乘法运算和 2 次加法运算,该算法的复杂程度与求和窗口的长度及前导符号的长度无关^[15]。

为了降低信道衰减对符号同步的影响,本文根据文献[15],对接收信号能量 P_n 采用相同的原理进行改进,如式(6)所示。

$$P_{n+1} = P_n + r_{n+2L}^2 - r_n^2 \quad (6)$$

同样,对于一个新接收的采样符号,只需分别计算滑入窗口和滑出窗口的符号的平方,共需 2 次乘法运算和 2 次加法运算。

当通信信号为实数时,式(3)可以不进行平方运算。另外,式(3)的计算结果需与预设阈值 T_h 进行比较,由于硬件实现除法运算速度慢,容易成为系统性能的瓶颈,因此用乘法运算代替除法运算,即将判断是否满足 $M_n = \frac{C_n}{P_n} > T_h$ 转换为 $C_n > T_h P_n$ 。该计算

过程需要 1 次乘法和 1 次比较运算。

低计算量延迟相关算法的计算量为 4 次乘法运算、4 次加法运算、1 次比较运算。

2 本地互相关算法

2.1 本地相关算法原理

本地相关算法的原理是将接收的数字序列 r_{n+k} 与本地的已知前导序列中的 P 符号 t_k 进行相关,原理可由式(7)~(10)表述。

$$C_n = \sum_{k=0}^{L-1} r_{n+k} t_k \quad (7)$$

$$P_n = \sum_{k=0}^{L-1} r_{n+k}^2 \quad (8)$$

$$P_t = \sum_{k=0}^{L-1} t_k^2 \quad (9)$$

$$M_n = \frac{|C_n|^2}{P_n P_t} \quad (10)$$

由式(7)~(10)可以发现,本地相关算法的计算量与式(1)~(4)对应的延迟相关算法的计算量基本相同,但是式(7)无法进行迭代优化,因此每计算一个 C_n 需要 L 次乘法和 $L-1$ 次加法。

2.2 低计算量本地相关算法

为了降低计算量,文献[16]针对式(7)进行了改进。对本地的存储 P 符号进行量化处理,正数量化为 +1,负数量化为 -1。将互相关乘法运算简化成 if 条件判决,可以减少存储 P 符号只读存储器 ROM (Read-Only Memory) 的大小,并且不需要用乘法器,减少硬件资源。文献[7]中的算法改进部分可由式(11)~(13)表示。

$$C_n = \sum_{k=0}^{L-1} r_{n+k} \cdot \text{sign}(t_k) \quad (11)$$

$$\text{sign}(t_k) = \begin{cases} 1 & t_k \geq 0 \\ -1 & t_k < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$r_{n+k} \cdot \text{sign}(t_k) = \begin{cases} r_{n+k} & t_k \geq 0 \\ -r_{n+k} & t_k < 0 \end{cases} \quad (13)$$

虽然改进后的算法不需要乘法运算,但仍需要 $L-1$ 次加法运算。

式(8)可以采用与式(6)相同的迭代运算实现计算量的降低,则其需要 2 次乘法和 2 次加法。式(9)的结果为定值,可提前计算,作为式(10)的比例因子。

式(10)无法与式(3)一样实现分子、分母约掉平方,因此需要计算 C_n^2 ,同时为了避免使用除法运算,将判断是否满足 $M_n = \frac{|C_n|^2}{P_n P_t} > T_h$ 转换为判断是否满足 $C_n^2 > (T_h P_t) P_n$ 。该计算过程需要 2 次乘法运算

和 1 次比较运算。

低计算量本地相关算法的计算量为 4 次乘法运算、 $L+1$ 次加法运算和 1 次比较运算。

3 延迟相关算法与本地相关算法的性能分析

3.1 同步序列格式及生成

本文采用的同步序列由 8 个 P 符号和 2 个 M 符号构成, M 符号是 P 符号的相反数, 长度为 1 个 OFDM 符号的长度, 即 1 024, 因此同步序列的长度为 10 240 个采样点。P 符号生成算法参考 GDW 11612.41—2016《Q 低压电力线宽带载波通信技术规范第 4-1 部分: 物理层通信协议》, 如式 (14)、(15) 所示。

$$X(k) = \begin{cases} \exp(j2\pi\theta_k/8) & k \in C, 0 \leq k \leq N-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$S_{\text{sync}}(n) = 10^{3/20} \sqrt{N} \operatorname{Re} \{ \text{IFFT}(X(k)) \} \quad 1 \leq n \leq N \quad (15)$$

其中, θ_k 为子载波参考相位; C 为可用子载波集合; N 为 OFDM 子载波数。

3.2 同步位置

图 1 为延迟相关算法和本地相关峰值算法及前后 5 个相邻点的相关峰值。延迟相关算法的平台效应导致同步位置易受噪声干扰, 而本地相关算法具有尖锐的相关峰值, 抗干扰能力明显优于延迟相关算法。

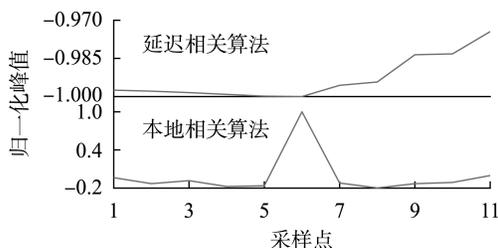


图 1 延迟相关算法与本地相关算法的相关峰值比较

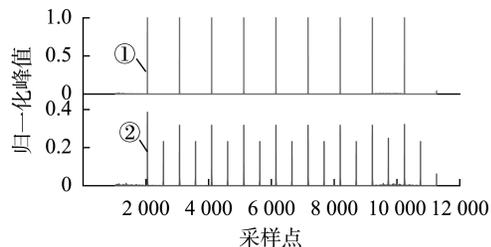
Fig.1 Comparison of correlation peak value between delay correlation and local correlation algorithms

3.3 信道对相关峰值的影响

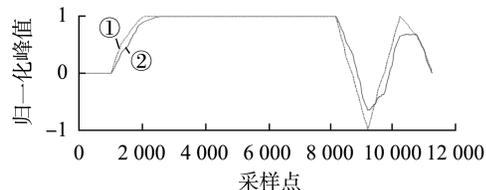
电力线信道具有多径传输效应, 因此经过电力线信道的同步序列与存储在本地的同步序列的相关性会变差。图 2(a)、(b) 分别为在电力线信道模型 REF-CH6^[17] 下本地相关算法和延迟相关算法的波形。图 2(a) 说明经过电力线信道后, 本地相关算法的峰值变小, 而且产生伪峰。图 2(b) 说明延迟相关算法的正相关峰值基本不受信道的影响, 而信号检测主要依赖于正相关峰值。

3.4 噪声对相关峰值的影响

在不同的信噪比条件下, 对本地相关算法的前 7 个峰值进行 10 次随机仿真并求均值, 得到本地相关峰值与信噪比之间的关系曲线。同时, 在本地相



(a) 本地相关算法



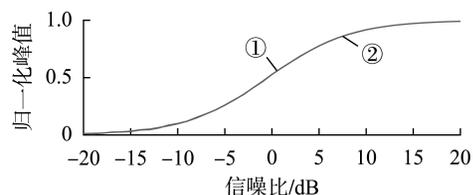
(b) 延迟相关算法

①— 经过电力线信道前, ②— 经过电力线信道后

图 2 信道对相关峰值的影响

Fig.2 Influence of channel on correlation peak value

关峰值点处, 对应地取 7 个延迟相关峰值进行与本地相关算法同样的运算, 得到延迟相关峰值与信噪比之间的关系曲线, 如图 3 所示。从图中可以发现, 噪声对本地相关和延迟相关峰值的影响基本相同。



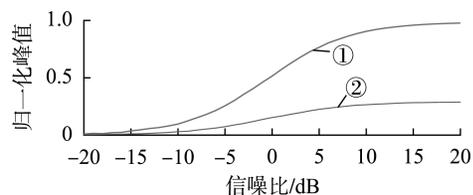
①— 本地相关算法, ②— 延迟相关算法

图 3 噪声对相关峰值的影响

Fig.3 Influence of noise on correlation peak value

3.5 噪声及信道对相关峰值的影响

图 4 为同时考虑噪声及信道影响时得到的相关峰值波形。可以发现同等条件下, 延迟相关算法具有比本地相关算法大的相关峰值。



①— 延迟相关算法, ②— 本地相关算法

图 4 噪声和信道对相关峰值的共同影响

Fig.4 Common influences of noise and channel on correlation peak value

3.6 简化算法对相关峰值的影响

延迟相关算法的简化算法不会影响相关峰值的大小, 因此不会造成性能损失。本地相关算法由于对本地存储数据进行了处理, 虽然降低了计算量, 但影响了同步性能, 表现为相关峰值幅度降低。图 5 比较了本地相关理论算法与简化算法在不同信噪比

条件下的相关峰值,可以发现采用简化算法虽然降低了计算量,但损失了约 40%的相关峰值幅度。

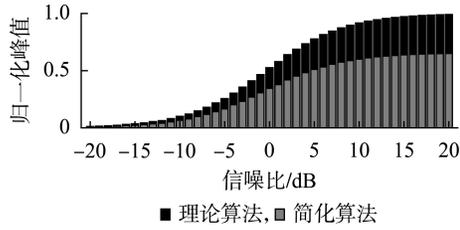


图 5 简化本地相关算法归一化相关峰值

Fig.5 Normalized correlation peak value of simplified local correlation algorithm

4 延迟相关与本地相关联合改进算法

改进联合算法的原理如图 6 所示。

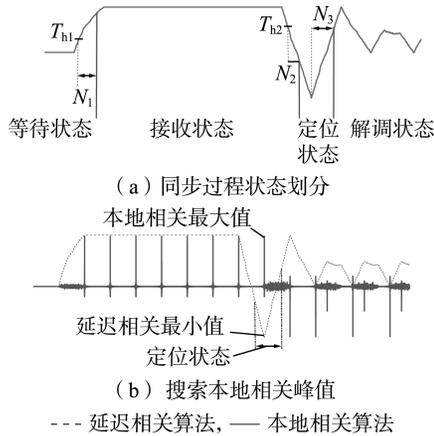


图 6 联合改进算法的原理

Fig.6 Principle of improved joint algorithm

图 6(a) 描述了延迟相关算法的同步过程状态划分,整个同步过程包含 3 个状态,即等待状态、接收状态、定位状态。解调状态是同步过程的后续状态。接收机在等待状态中判断接收信号的 M_n 是否连续 N_1 次大于阈值 T_{h1} ,若满足条件,则判定为有效通信信号到来,进入接收状态。在接收状态中继续判断 M_n 的取值,若连续 N_2 次小于阈值 T_{h2} ,则进入定位状态。定位状态中,进行 M_n 最小值搜索,并判断 M_n 的取值是否连续 N_3 次大于所确定的最小值,若满足条件,则定位成功,进入解调状态。搜索到的最小值对应的时刻作为同步的参考点。

在图 6(a) 状态划分基础上,引入本地相关算法,并在定位状态搜索本地相关算法的峰值,以本地相关算法的峰值时刻作为同步基准。而延迟相关算法的峰值只用来进行状态转换的判定条件。由于延迟相关算法延迟了 1 个符号周期,定位状态中搜索的是本地相关的最大值,如图 6(b) 所示。

联合改进算法的工作流程如附录中的图 A1 所示。从图中可以看出,从等待状态到解调状态需要满足 5 个条件,若满足 5 个条件的概率分别为 p_1 、

p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 ,则进入解调状态的概率 $p = p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$,而且阈值判决条件为连续累计比较,相对于单次比较情况, p_1 、 p_3 、 p_5 的概率要小。因此可以降低随机噪声造成进入解调状态的概率,即虚警概率。

考虑到预设阈值设置的主观性,可能会造成虚警和漏警,一般阈值的取值偏向虚警概率高些。为了降低虚警概率,本文所提改进联合算法在接收状态和定位状态中引入了超时判断,可以消除由噪声引起的状态跳变。此外,可以在协议层通过判断数据帧格式过滤虚警信息。

5 建模仿真

基于 MATLAB 软件建立验证本文同步算法的 PLC 系统仿真模型。

5.1 OFDM 参数设置

OFDM 参数如表 1 所示。

表 1 OFDM 参数

Table 1 OFDM parameters

参数	取值	参数	取值
符号长度	1 024	使用子载波编号	81—496
CP 长度	458	前导序列长度	10 240
总子载波数	512	Payload 个数	6
总子载波编号	1—512	子载波调制解调方式	DBPSK
使用子载波数	416	信号带宽	10 MHz

5.2 同步算法参数设置

表 2 给出了 PLC 系统仿真模型中同步算法的参数取值。为了比较本文方法与文献[14]方法的性能,取 $T_{h1} = -T_{h2} = t_h$ 。 N_1 、 N_2 、 N_3 以及接收状态超时和定位状态超时的数值主要是为了克服噪声造成的虚警影响: N_1 一般取 1 个 OFDM 符号的长度, N_2 的取值要小于 T_{h2} 与相关峰值之间的采样点数, N_3 的取值约为 OFDM 符号长度的 1/2;接收状态超时数值要大于帧长度;定位状态超时时要大于 OFDM 符号长度。

表 2 同步算法参数

Table 2 Parameters of synchronization algorithm

参数	取值	参数	取值
T_{h1} 、 t_h	0.01、0.02、0.06、0.1	N_3	500
N_1	1 024	接收状态超时	10 240
T_{h2}	$-T_{h1}$	定位状态超时	5 000
N_2	20		

5.3 电力线信道模型

电力线信道具有多径传播特性,可由式(16)进行描述。

$$y = \sum_{i=1}^{N_p} g_i e^{(-a - 2\pi i \sqrt{\epsilon_r/c_0}) d_i f} \quad (16)$$

其中, N_p 为多路径传播数量; g_i 、 d_i 分别为路径 i 的

权重因子和长度; a 为衰减因子; ε_r 为介电常数; f 为通信频率; c_0 为光速。

本文电力线信道模型采用由 OPERA 项目定义的室外低压电力线接入网信道模型^[17]。OPERA 项目定义了 9 种模型, 共分为以下 4 类:

- a. 150 m 类, REF-CH1—REF-CH3;
- b. 250 m 类, REF-CH4—REF-CH5;
- c. 350 m 类, REF-CH6—REF-CH8;
- d. 理论模型, REF-CH9。

其中, 150 m 类、250 m 类、350 m 类模型均是过实测数据得出的模型。

限于篇幅, 本文以参考信道 REF-CH6 为例展示仿真结果。不同的信道对信号的衰减程度不同, 区别在于阈值影响的信噪比范围不同, 但趋势一致。

5.4 噪声模型

本文噪声模型选用模拟电力线噪声常用的 Middleton 的 Class-A 模型^[18]。式(17)为脉冲噪声电压为 V_{noi} 的概率密度函数表达式。

$$p(V_{noi}) = \sum_{m=0}^{\infty} P_m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left(-\frac{V_{noi}^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (17)$$

$$P_m = \frac{e^{-A} A^m}{m!}, \quad \sigma_m^2 = \sigma^2 \frac{m/A + \Gamma}{1 + \Gamma} = \sigma_i^2 \frac{m}{A} + \sigma_g^2$$

$$\Gamma = \sigma_g^2 / \sigma_i^2, \quad \sigma = \sigma_g^2 + \sigma_i^2$$

其中, A 为脉冲指数; σ 为总的噪声功率; σ_g^2 、 σ_i^2 分别为高斯噪声和冲击噪声的功率。

在实现噪声模型时, 采用在高斯背景噪声的基础上叠加冲击噪声的方式, 可以设置冲击噪声叠加的时间间隔和幅度, 得到不同的噪声模型。

本文采用脉冲到达间隔为 10 个采样点、脉冲幅度为随机取值, 且满足 $\Gamma = 0.01$ 条件的电力线信道噪声模型。

5.5 同步算法模型

为了与本文给出的联合同步算法进行对比, 同时实现了以下 4 种同步算法:

- a. method1, 文献[14]给出的联合同步算法;
- b. method2, 本文给出的联合同步算法;
- c. method3, 原理同本文联合同步算法, 不同之处在于定位状态时搜索延迟相关峰值;
- d. method4, 将 method3 进一步简化, 在等待状态中若判断接收信号的 M_n 大于阈值 T_{h1} 或小于阈值 T_{h2} , 则立即进入下一状态。

5.6 仿真结果分析

5.6.1 虚警漏警分析

在参考信道为 REF-CH6、信噪比为 -10 dB 的条件下, 设置阈值的取值范围为 [0.01, 0.1], 模型其他参数不变, 通信 100 次得到的漏警和虚警仿真结果如图 7 所示。

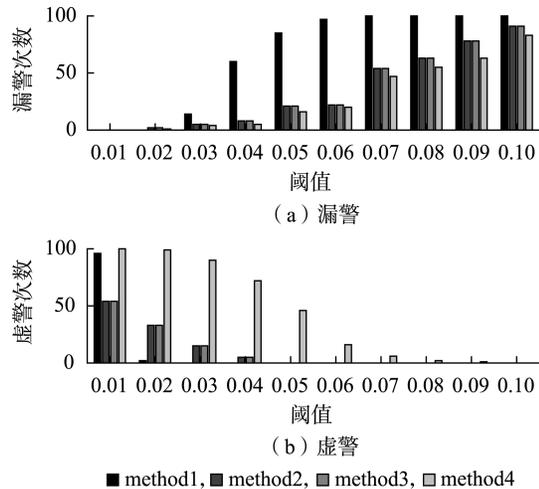


图 7 虚警漏警仿真结果

Fig.7 Simulative results of false alarm and missed alarm

a. 比较图中采用 method1 和 method2 得到的结果可见, 阈值的设置对 method1 的虚警和漏警概率影响较大, 若阈值选择不合适, 则会导致高虚警、漏警概率, 造成同步错误;

b. method2 与 method3 采用相同的状态转换方法, 所以具有相同的虚警、漏警概率;

c. 比较图中采用 method2 与 method4 得到的结果可见, 本文采用的延迟相关状态转换方法可以有效降低虚警概率。

5.6.2 同步结果分析

图 8 给出了 4 种不同阈值条件下的同步仿真结果, 由图可见, method1 和 method2 的同步性能远优于 method3 和 method4。

当 $t_h = 0.01$ 时, method2 同步性能优于 method1, 这主要是因为阈值过低, method1 的虚警较高, 造成误同步。随着信噪比的提高, 相关峰值增大, 噪声减小, 虚警概率下降, 误同步次数下降。当 t_h 分别取为 0.02、0.06、0.1 时, 在信噪比为 -15 ~ -7 dB 的阶段, method1 和 method2 的同步错误次数不仅没有下降, 反而随着阈值的增加而上升, 这是因为随着阈值的增加, 误同步主要由漏警概率上升导致。比较 method1 和 method2 可以发现, 在低信噪比阶段, method2 的同步性能要优于 method1。这个阶段的分界点和阈值有关, 随着阈值的升高, 分界点向高信噪比移动; 当 t_h 为 0.02、0.06、0.1 时, 转折点分别为 -9 dB、-5 dB、-1 dB。当信噪比大于分界点时, method1 的同步性能优于 method2, 当信噪比低于分界点时, method1 的同步性能迅速恶化。

当参考信道改变时, 具有相同阈值条件下, 分界点不同。原因是信噪比与相关峰值的有关, 而相关峰值在不同的信道条件下具有不同的取值, 即噪声容限不同。

经过以上分析可以得出以下结论:

- a. 当取相同阈值时, 相比于文献[14], 本文方

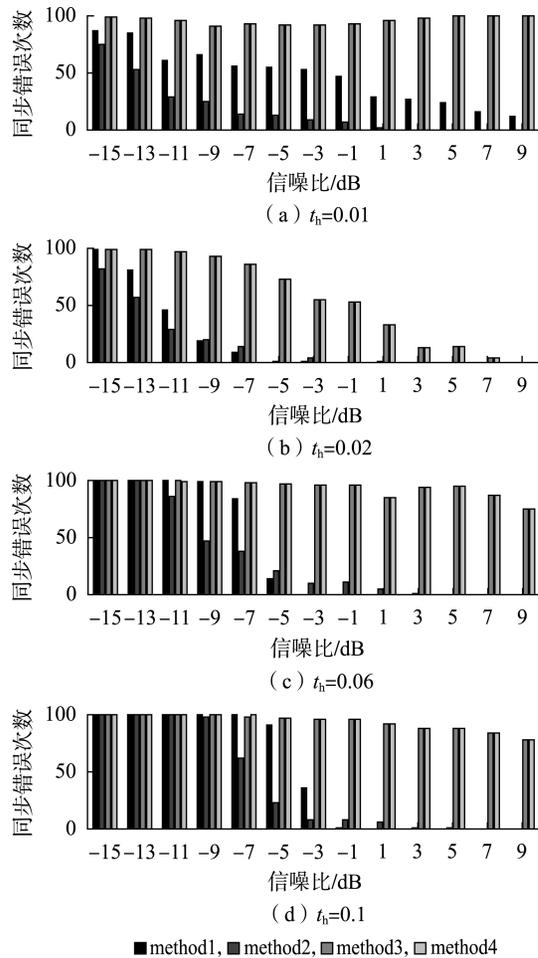


图 8 同步仿真结果

Fig.8 Results of synchronization simulation

法在低信噪比条件下的同步性能更好,但在信噪比较高时同步性能略差;

b. 针对固定阈值,本文方法可以在较宽的信噪比范围内具有较好的同步性能,比较适用于信噪比具有较大的波动范围的 PLC 应用场合,而文献 [14] 的同步方法随着信噪比的变化,同步性能波动较大。

5.6.3 简化算法实现分析

将采用本地相关算法、延迟相关算法的简化算法应用到 method2 中,并命名为 method2-simple。method2 与 method2-simple 在 t_h 为 0.01 和 0.1 时的同步性能分别如图 9(a) 和 (b) 所示,由图可见采用简化算法的同步算法的性能相比与原始算法要差些,原因是简化算法对本地的存储 P 符号做量化处理。

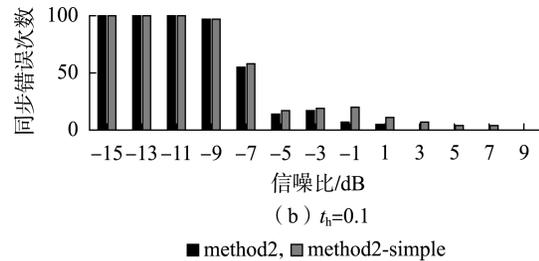
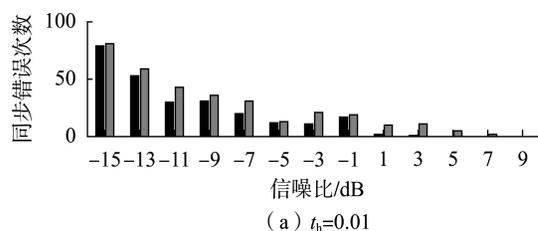


图 9 简化算法对同步性能的影响

Fig.9 Influences of simplified algorithm on synchronization performance

6 结语

本文给出了一种延迟相关算法与本地相关算法结合实现 OFDM 符号同步的方法,其能够在较宽的信噪比范围内具有稳定的同步性能,适用于信噪比波动较大的 PLC 场合。此外,简化算法容易实现实际工程应用。

本文算法以固定阈值作为前提条件,因此如何根据信噪比条件调整动态阈值是后续研究的重点内容之一。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 胡正伟,谢荣圆,谢志远. 基于 QoS 参数的电力线信道状态映射方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):159-165.
HU Zhengwei,XIE Rongyuan,XIE Zhiyuan. Mapping of PLC channel status to QoS parameter[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):159-165.
- [2] GALLI S,SCAGLIONE A,WANG Z F. For the grid and through the grid;the role of power line communication in the smart grid[J]. Proceedings of the IEEE,2010,99(6):998-1027.
- [3] MATANZA J,ALEXANDRES S,RODRÍGUEZ-MORCILLO C. Advanced metering infrastructure performance using European low-voltage power line communication networks[J]. IET communications,2014,8(7):1041-1047.
- [4] GIANAROLI F,PANCALDI F,VITETTA G M. The impact of statistical noise modeling on the error-rate performance of OFDM power-line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(6):2622-2630.
- [5] 胡正伟,谢志远,郭以贺,等. 基于终端通信质量的 10 kV 电力线通信组网方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):144-150.
HU Zhengwei,XIE Zhiyuan,GUO Yihe,et al. 10 kV power line communication networking based on communication quality between terminals[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):144-150.
- [6] GALLI S,SCAGLIONE A,WANG Z F. For the grid and through the grid;the role of power line communication in the smart grid[J]. Proceedings of the IEEE,2010,99(6):998-1027.
- [7] FERREIRA H C. Power line communications;theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines[M]. New York,USA:John Wiley and Sons Publication,2010:365-410.
- [8] 刘晓胜,刘佳生,孙贺,等. 用于电力线通信系统的 OFDM 定时同步算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):179-183.
LIU Xiaosheng,LIU Jiasheng,SUN He,et al. OFDM timing syn-

- chronization algorithm for power line communication system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 179-183.
- [9] 李鹏飞, 胡国荣. 电力线 OFDM 通信系统的自适应定时同步阈值选择方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 93-96, 129. LI Fengfei, HU Guorong. An adaptive threshold selection method for timing synchronization of OFDM-based power line communication system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 93-96, 129.
- [10] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [11] BOUTROS J, BUDA F, LEMOIS E, et al. Burst and symbol timing synchronization for the upstream channel in broadband cable access systems [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'02). New York, NY, USA: IEEE, 2002: 1490-1495.
- [12] 王勇, 徐娟娟. OFDM 电力线载波通信系统中同步技术研究 [J]. 电测与仪表, 2010, 47(4): 35-39. WANG Yong, XU Juanjuan. Study and analysis on synchronization for OFDM based power line communication systems [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(4): 35-39.
- [13] 罗春风, 文劲宇, 杨慧敏, 等. 基于 OFDM 电力线载波通信系统同步新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 28-32. LUO Chunfeng, WEN Jinyu, YANG Huimin, et al. A new timing synchronization method for low-voltage OFDM power line communication system [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 28-32.
- [14] 李春阳, 黑勇, 乔树山. OFDM 电力线载波通信系统的定时同步和模式识别 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 58-60. LI Chunyang, HEI Yong, QIAO Shushan. Timing synchronization and mode identification for OFDM based power line carrier communication systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 58-60.
- [15] 李树青, 冯恒. 应用于 G3-PLC 的帧同步算法的设计与实现 [J]. 电子科技, 2012, 25(5): 137-141. LI Shuqing, FENG Heng. Design and realization of frame synchronization used in G3-PLC [J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(5): 137-141.
- [16] 何世彪, 张青, 韩彦净, 等. OFDM 同步与信道估计研究及 FPGA 实现 [J]. 计算机工程, 2013, 39(5): 288-292. HE Shibiao, ZHANG Qing, HAN Yanjing, et al. Research on synchronization and channel estimation of OFDM and FPGA implementation [J]. Computer Engineering, 2013, 39(5): 288-292.
- [17] FERREIRA H C, LAMPE L, NEWBURY J, et al. Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines [M]. New York, USA: John Wiley and Sons Publication, 2010: 445.
- [18] SPAULDING D, MIDDLETON D. Optimum reception in an impulsive noise environment-part I: coherent detection [J]. IEEE Transactions on Communications, 1977, 25(9): 910-923.

作者简介:



胡正伟

胡正伟 (1978—), 男, 山东昌邑人, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力线通信技术 (E-mail: hzwwizard@hotmail.com);

贺冬梅 (1994—), 女, 内蒙赤峰人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力线通信技术 (E-mail: 1301395540@qq.com);

谢志远 (1964—), 男, 河北辛集人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力线通信及智能信息传感技术 (E-mail: zhiyuanxie@263.net)。

OFDM symbol timing synchronization algorithm for PLC

HU Zhengwei, HE Dongmei, XIE Zhiyuan

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: An OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) symbol timing synchronization algorithm for PLC (Power Line Communication) is proposed, which combines the advantages that the delay correlation algorithm is slightly affected by channel multipath effect and local correlation algorithm has sharp correlation peak. The synchronization process is divided into three states according to the delay correlation algorithm. Timing misjudgment caused by the power line noise is effectively reduced by setting the state transition condition and timeout mechanism. The peak of the local correlation algorithm is searched under the location determined by the delayed correlation algorithm. MATLAB simulation model of the proposed algorithm is built, under the condition of power line channel model and noise, the probability of false alarm & missing alarm, synchronization performance and influence of simplified algorithm are simulated and analyzed, and the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: power line communication; OFDM; leading sequence; symbol synchronization

附录

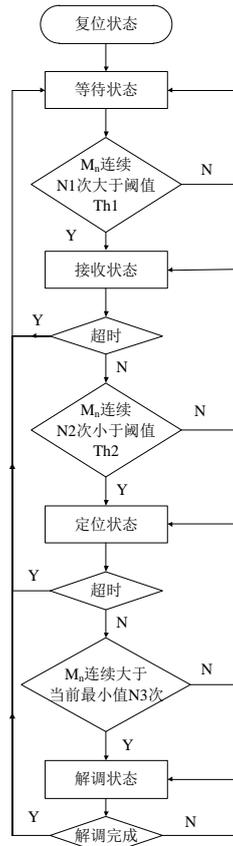


图 A1 改进联合算法流程图

Fig.A1 Flowchart of improved joint algorithm