

# 基于超混沌系统的正交频分复用时频同步算法

唐良瑞, 左琪

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

## Time and Frequency Synchronization Algorithm Using Hyperchaotic System for OFDM Systems

TANG Liang-rui, ZUO Qi

(School of Electric & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** As the low-voltage power line channel suffers serious noise interference and multipath fading, and the traditional synchronization algorithm has the disadvantages of weak security and decimal carrier frequency offset estimation is sensitive to multipath fading, a time and frequency orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) synchronization algorithm applicable to the low-voltage power line communication was introduced. The sequences generated by hyperchaotic system was used to construct the synchronization training sequences first, then, a new timing error estimation and decimal carrier frequency offset estimation was presented, the integer carrier frequency offset estimation was completed based on the cycle shift last. Theoretical analysis demonstrates that the combination of the sensitivity of chaotic system to initial condition and the proposed algorithm profoundly enhances the security of the OFDM system. Simulation results show the high-accuracy of the timing offset estimation and excellent performance of the frequency offset estimation, and the effective opposability to the strong noise and serious multipath fading.

**KEY WORDS:** orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system; low voltage power-line; timing offset estimation; frequency offset estimation; hyperchaotic system; security

**摘要:** 针对低压电力线信道噪声干扰强、多径衰落严重, 而传统同步算法保密性弱、小数倍载波频偏估计易受多径衰落影响的缺点, 提出一种适合于低压电力线通信信道的正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)时频同步算法。将超混沌系统生成的混沌序列用于构造同步训练序列, 提出新的定时偏差估计和小数倍频偏估计的算法, 在延续循环移位的思想的基础上完成整数倍频偏估计。

理论分析表明, 混沌系统对初始值的敏感性与所提出的算法相结合, 可极大地增强系统的保密性。仿真结果表明, 所提出的定时偏差估计准确率高、频偏估计性能更优, 能有效地对抗低压电力线通信信道的强噪声和多径衰落。

**关键词:** 正交频分复用系统; 低压电力线; 定时偏差估计; 频偏估计; 超混沌系统; 保密性

## 0 引言

目前, 众多学者正在研究利用低压电力线作为通信信道实现数据的高速传输, 但低压电力线信道不仅频率衰落严重、受各种噪声的干扰, 而且信号在传输过程中的反射和折射会造成严重的多径效应<sup>[1]</sup>。正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)是一种多载波调制技术, 它将高速串行数据流分配到传输速率相对较低的若干个子信道上进行并行传输, 具有频偏利用率高、抗多径和符号干扰能力强等优点, 已成为低压电力线通信系统的关键技术; 但作为一种正交的多载波调制系统, 它对定时偏差和频率偏差非常敏感, 其中定时偏差会引起符号间干扰和输出信号的相偏, 频率偏差会导致子信道间的干扰, 破坏子信道之间的正交性, 从而导致系统性能下降<sup>[2-4]</sup>。因此, 实现快速、精确、可靠的同步是该系统的关键。

目前, 同步算法是 OFDM 系统中的一个研究热点。许多文献对此进行了探讨, 可以归结为 2 类: 第 1 类是数据辅助估计算法<sup>[5-11]</sup>; 第 2 类是非数据辅助估计算法(盲估计)<sup>[12-14]</sup>。其中第 1 类比第 2 类估计精度要高, 但训练序列的加入降低了系统的有效传输效率, 而以牺牲较小的传输效率为代价来提高同步的精度是值得的。常规的训练序列由线性移位反馈寄存器产生, 其缺陷是: 码数量有限, 且产

基金项目: 国家自然科学基金项目(60402004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60402004).

生码的特征多项式容易获得，保密性差；另外随着训练序列周期的增长所需的存储容量和实现的电路单元都要大大增加。而混沌序列只由非线性映射和初始值决定，容易产生和存储，保密性好，可产生长周期的序列，具有良好的相关性和伪随机特性。现已有大量的混沌系统<sup>[15-17]</sup>，其中较经典的是改进的 Logistic 混沌系统<sup>[18]</sup>，该系统的映射是一维非线性映射，电路实现容易，产生的混沌序列较简单。与一般混沌系统相比，超混沌系统具有 2 个或 2 个以上的正李亚普诺夫指数，相轨在更多方向上分离，其动力学行为更加复杂，这对提高同步算法安全性的研究具有重要意义。

文献[8]是一种基于训练序列的 OFDM 同步算法，该算法的同步训练序列是利用实伪随机序列经过快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)后的  $N$  个数据点具有共轭对称特性，完成符号同步，然后通过最大似然算法估计小数倍频偏，在频域上通过循环移位相关获得整数倍频偏。由于低压电力线信道的多径效应，部分的循环前缀区间将受到码间干扰(inter-symbol interference, ISI)破坏，使得文献[8]算法的小数倍频偏估计性能恶化，继而影响整数倍频偏估计，且保密性非常弱。本文针对以上缺陷，将超混沌序列替代文献[8]中的实伪随机序列，并提出新的符号同步和小数倍频偏估计算法，整数倍频偏延续文献[8]中提出的循环移位相关的思想。仿真结果表明，本文算法保密性更强，频偏估计精度更高，能很好地对抗低压电力线信道的多径效应，且估计范围可达整个带宽。

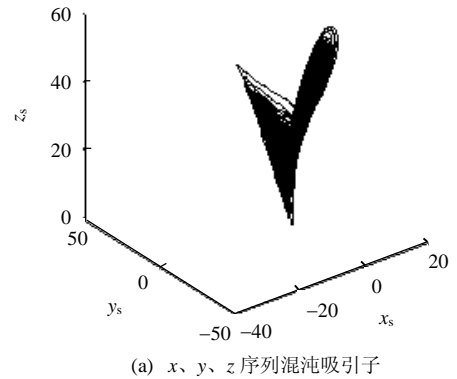
### 1 超混沌系统及其混沌序列的分析

本文采用文献[15]中的超混沌系统，系统方程如下：

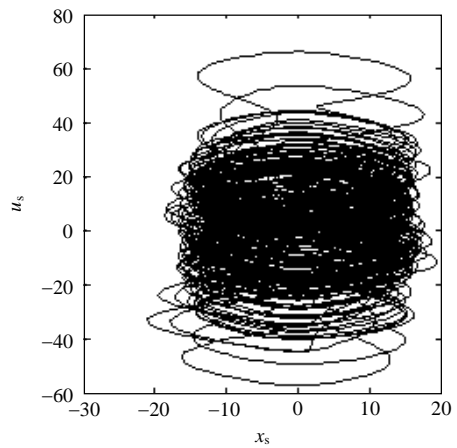
$$\begin{cases} \dot{x} = a(-x + y) \\ \dot{y} = cx - y - xz + u \\ \dot{z} = xy - bz \\ \dot{u} = -dx \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\dot{x}$ ， $\dot{y}$ ， $\dot{z}$ ， $\dot{u}$  分别为对  $x$ ， $y$ ， $z$ ， $u$  的微分运算； $a$ ， $b$ ， $c$ ， $d$  为实常数，当参数  $a=10$ ， $b=8/3$ ， $c=28$ ， $d=5$  时，系统存在一个典型的混沌吸引子。

本文采用 4 阶朗格-库塔离散化算法，得到吸引子，如图 1 所示。从图中可以看出吸引子空间结构十分复杂，轨线无穷延伸、压缩和折叠。图中的轨线在特定的吸引域内具有遍历性。本文利用奇异值分解<sup>[19-21]</sup>的方法计算出系统(1)的 4 个李亚普诺



(a) x、y、z 序列混沌吸引子



(b) x、u 序列混沌吸引子

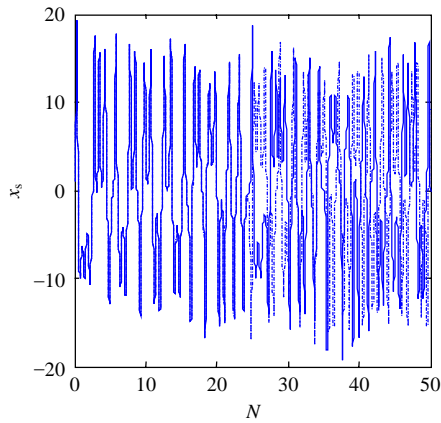
$x_s$ 、 $y_s$ 、 $z_s$ 、 $u_s$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $u$  序列。

图 1 超混沌系统的吸引子图

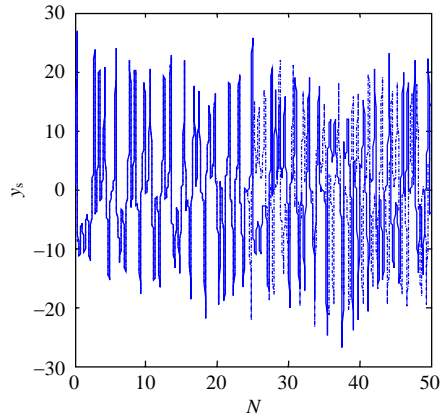
Fig. 1 Chaotic attractor map of hyperchaotic system

夫指数： $\lambda_1=0.3997$ ； $\lambda_2=0.3113$ ； $\lambda_3=0$ ； $\lambda_4=-14.3776$ 。该系统具有 2 个正的李亚普诺夫指数，具有超混沌的特征，系统的行为将难以预测。系统(1)的李亚普诺夫维数  $D_L = j + \frac{1}{|\lambda_{j+1}|} \sum_{i=1}^j \lambda_i = 2.9505$ ，具有典型的分数维。

混沌系统对初始值极为敏感，系统(1)对初始值的敏感性如图 2 所示，图中  $N$  为迭代次数，图 2(a)、(b)中的实线分别表示初始值  $x_0=1$ ， $y_0=1$ ， $z_0=1$ ， $u_0=1$  时  $x$ ， $y$  混沌序列的时域波形图，虚线分别表示初始值  $x_0=1.001$ ， $y_0=1$ ， $z_0=1$ ， $u_0=1$  时  $x$ ， $y$  混沌序列的时域波形图， $x_s$  为  $x$  序列， $y_s$  为  $y$  序列。从图 2 可以看出，系统(1)的时域波形图具有非周期性，且当初值  $x_0$  仅发生 0.001 的变化时，待  $N \geq 24$ ，序列表现出明显的不同。图 3 给出了混沌序列  $x$ ， $y$  的相关性，图中  $N_s$  为序列长度， $r_x$ ， $r_y$  及  $C_{xy}$  分别为  $x$ ， $y$  序列的自相关系数及  $xy$  序列的互相关系数。选择混沌序列用于生成同步训练序列时，理论上希望序列的自相关性函数为  $\delta$  函数，互相关函数为零。从图 3 可以看出， $x$ ， $y$  序列的自相关函数接



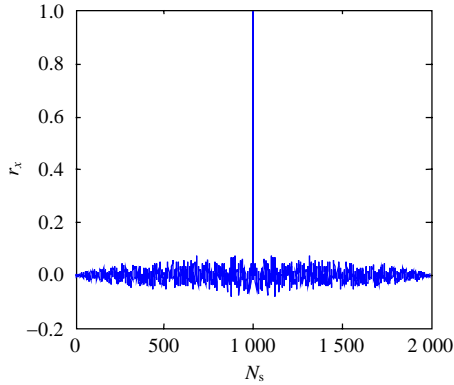
(a) x 混沌序列的时域波形图



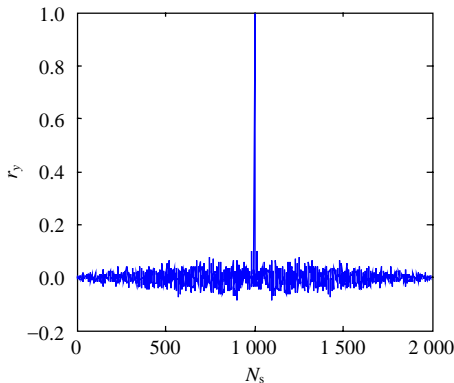
(b) y 混沌序列的时域波形图

图2 混沌序列的时域波形图

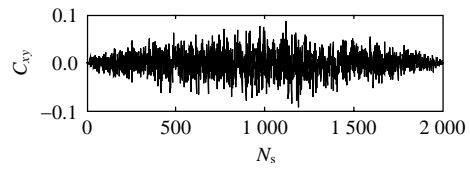
Fig. 2 Time-domain wave of chaotic sequence



(a) x 序列的自相关性



(b) y 序列的自相关性



(c) x 与 y 列的互相关性

图3 混沌序列的相关性

Fig. 3 Correlation of chaotic sequences

近于 $\delta$ 函数, 互相关函数值也非常小。

## 2 OFDM 系统的时频同步算法

### 2.1 OFDM 系统描述

设基带采样时间间隔为  $T_s$ , OFDM 系统的有效符号点数为  $N$ (一般情况下  $N=2^b$ ), 与之对应的有效符号周期为  $T=NT_s$ 。在发送端, 经过编码映射后的频域数据  $\{a(i)|i=0,1,\dots,N-1\}$  ( $a(i)$  第  $i$  个子载波上的加载的数据) 被置入发送端的串并变换模块; 经过 IFFT 变换, 在发送端并串变换模块的输出端得到时域数据  $\{s(k)|k=0,1,\dots,N-1\}$  ( $s(k)$  是第  $k$  个采样点的数据)。

$$s(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a(i) e^{j \frac{2\pi}{N} ik}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

为了对抗 ISI, 添加  $N_g$  点的循环前缀, 一般要求循环前缀的宽度要大于最大多径时延, 于是每个 OFDM 符号含点数为  $N_{\text{sym}}$ , 再插入同步训练序列后整个信号通过信道到达接收端。在接收端, 将接收信号送入同步单元模块, 完成符号同步和载波同步后分离出同步训练序列, 再删去循环前缀, 在接收端串并变换模块的输出端得到时域数据  $\{r(n)|n=0,1,\dots,N-1\}$  ( $r(n)$  是第  $n$  个采样点的数据), 最后经过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)、频域均衡模块, 在接收端并串变换模块的输出端得到解调的频域数据。

考虑定时误差  $d$ 、收端和发端之间由于晶体振荡器的频率不稳定或是多普勒频移所造成的载波频偏  $\Delta f$ , 定义接收信号为

$$r(n) = s(n-d)h(n)e^{j \frac{2\pi}{N} \Delta f n} + w(n) \quad (3)$$

式中:  $h(n)$  为第  $n$  个子载波上的信道传输函数;  $w(n)$  为叠加在时域信号上的加性高斯白噪声。

### 2.2 构造同步训练序列

由于混沌序列  $x, y$  具有良好的相关性和对初始值的敏感性, 本文将系统(1)产生的  $x, y$  混沌序列用于构造同步训练序列, 构造方式如下:

$$c_3(k) = c_1(k) + jc_2(k) \quad (4)$$

$$c(n) = f_{\text{IFFT}}(c_3(k)) \quad (5)$$

式中:  $c_1(k)$  为混沌序列  $x$ ;  $c_2(k)$  为混沌序列  $y$ ;  $c(n)$

为同步训练序列。

$$t_1(n) = c(n) \tag{6}$$

$$t_2(n) = c_3(k) \tag{7}$$

式中： $t_1(n)$ 为第 1 本地训练序列； $t_2(n)$ 为第 2 本地训练序列。

利用 OFDM 有用时域数据序列  $d(n)$ ，加入有用数据的循环前缀、同步训练序列  $c(n)$ 和同步训练序列的循环前缀，构成 OFDM 符号  $s(n)$ ：

$$s(n) = \begin{cases} c(n+N_1-N_{g1}), & n \in [1, N_{g1}] \\ c(n-N_{g1}), & n \in [N_{g1}+1, N_1+N_{g1}] \\ d(n+N-N_1-N_{g1}-N_{g2}), & n \in [N_1+N_{g1}+1, N_1+N_{g1}+N_{g2}] \\ d(n-N_{g1}-N_{g2}-N_1), & n \in [N_1+N_{g1}+N_{g2}+1, N+N_1+N_{g1}+N_{g2}] \end{cases} \tag{8}$$

式中： $s(n)$ 为待发送的数据； $N_1$ 为训练序列的长度； $N_{g1}$ 为训练序列循环前缀的长度； $N_{g2}$ 为有用数据循环前缀的长度； $N$ 为有用数据的长度。

### 2.3 符号同步算法

本文提出的符号同步算法是利用第 1 本地训练序列与接收信号  $r(d)$ 做长度为 1 点、窗口长度为  $N_1$  点的延时相关运算，得到符号同步的定时测度  $p(m)$ 。

$$p(m) = \sum_{i=1}^{N_1} [t_1(i)]^* r(m+i-1) \tag{9}$$

滑动窗中数据段的能量  $R(m)$  为

$$R(m) = \sum_{i=1}^{N_1} |r(m+i-1)|^2 \tag{10}$$

对定时测度进行归一化，得到  $M(m)$ ：

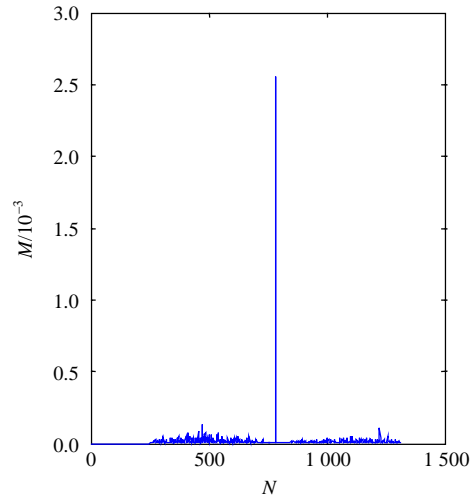
$$M(m) = |p_d(m)|^2 / R(m) \tag{11}$$

则定时偏移估计  $d$  为

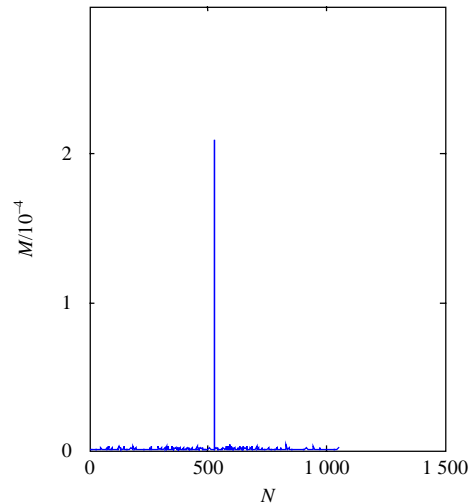
$$d = \arg \max_{m \in [1, N_{g1}+N_{g2}+N+1]} [M(m)] \tag{12}$$

式中： $()^*$ 为共轭运算； $m$ 为滑动窗口的起始点序号。

图 4 给出了理想无失真信道下文献[8]和本文算法的定时偏移估计函数曲线，图中  $N$  为采样点数， $M$  为归一化定时测度。文献[8]所述的定时测度是利用同步训练序列的共轭对称性，归一化定时测度的波峰位置应为同步训练序列的中间位置，与所寻找的起始位置相差  $N_1/2$  点，而本文所述的定时偏移估计函数窗口的起始点也为所要寻找的符号起始位置。图 4 中，2 条定时偏移估计函数曲线峰值采样点位置不同，利用 Matlab 仿真得到所对应位置相差  $N_1/2$ ，与理论分析值相符。从定时偏移估计函



(a) 文献[8]定时偏移估计函数



(b) 本文算法定时偏移估计函数

图 4 定时偏移估计函数比较

Fig. 4 Comparison of the estimated timing error function

数曲线可以看出，两者的波峰都非常尖锐，但本文算法比文献[8]中的旁瓣要小，在采样点上分布更加均匀。

### 2.4 载波同步

本文将载波频偏估计分为 2 步：时域中的小数倍频偏估计和频域中的整数倍频偏估计。小数倍频偏值与整数倍频偏值的和为总的频偏估计值，其中小数倍频偏估计是采用第 1 本地训练序列与同步训练序列进行差分相关运算，对接收信号进行小数倍频偏补偿后，剩余的整数倍频偏不会破坏子载波间的正交性。从频域采样的角度看，时域中整数倍的频偏将造成频域采样位置的整数偏移，因此将接收信号的同步序列进行 FFT 调制后，与第 2 本地训练序列进行循环移位相关运算可得到整数倍的频偏估计。

假设系统符号同步已完成， $d$  为 OFDM 符号的

起始位置,即同步训练序列的起始点,则

$$c_1(i) = [t_1(i)]^* r(d+i-1), \quad i \in [1, N_1] \quad (13)$$

定义一个序列集合  $S_c$ :

$$S_c = \{c_1(1), c_1(2), \dots, c_1(N_{g1} + N_{g2} + N + 1)\} \quad (14)$$

对集合中的序列进行差分相关,得

$$c_2 = \sum_{i=1}^{N_1/2} c_1(i)c_1(i+N_1/2) \quad (15)$$

则小数倍频偏估计  $f_{\text{frc}}$  为

$$f_{\text{frc}} = \arg(c_2) / \pi \quad (16)$$

式中  $\arg()$  为求相角函数。

对接收信号进行小数倍频偏补偿后得到调整后的接收信号  $\{r'(n)|n=0,1,\dots,N-1\}$ :

$$r'(n) = r(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} f_{\text{frc}} n) \quad (17)$$

整数倍频偏估计是通过截取接收信号的同步训练序列并对其进行 FFT 变换得到频域接收信号中的同步序列:

$$C_s = f_{\text{FFT}} \{r'(d:N_1+d-1)\} \quad (18)$$

式中  $r'(d:N_1+d-1)$  为第  $d$  个接收信号至第  $N_1+d-1$  个接收信号。

将频域接收同步序列与第 2 本地训练序列进行循环移位相关,找到循环移位的位数,即整数倍频偏值,完成整数倍频偏估计。值得注意的是这种整数倍频偏估计方法要求同步训练序列的长度与有用数据的长度相等。本文将频域接收同步序列复制,生成长度为  $2N_1$ 、前后相同的序列  $C_c(n)$ ,这时循环移位相关可以由延时相关运算替代,具体方法如下:

$$C_c(n) = [C_s \quad C_s] \quad (19)$$

$$c_3(k) = \left| \sum_{i=1}^{N_1} [t_2(i)]^* C_c(k+i-1) \right|, \quad k \in [1, N_1+1] \quad (20)$$

$$f_{\text{int}} = \arg \max_{k \in [1, N_1+1]} (c_3(k)) - 1 \quad (21)$$

对接收信号进行整数倍频偏估计补偿后得到调整后的接收信号  $\{r''(n)|(r=0,1,\dots,N-1)\}$ :

$$r''(n) = r'(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} f_{\text{int}} n) \quad (22)$$

总的频偏估计值为

$$f'_\Delta = f_{\text{frc}} + f_{\text{int}} \quad (23)$$

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 基本仿真条件

为了测试算法的性能,设计低压电力通信系统,该系统子载波间隔为 39.062 5 kHz,子载波数

为 512,同步训练序列的长度与子载波数相同,同步训练序列的循环前缀和有用数据的循环前缀都为 50。本文在理想信道和瑞利多径衰落信道下进行仿真实验,仿真中采用的噪声均为加性高斯白噪声。由于电力网络中背景噪声对通信系统的影响要大于周期性噪声和突发噪声,而背景噪声服从高斯分布且可视为加性噪声,所以可用带加性高斯白噪声的多径瑞利信道模拟低压电力线信道。

#### 3.2 仿真结果分析

图 5 是文献[8]和本文算法分别在加性高斯白噪声信道和低压电力线信道下检验帧起始位置的正确概率  $P_c$  的曲线图,图中  $r_{\text{sn}}$  为信噪比。从图中可以看出,无论在低信噪比还是在高信噪比的条件下,2 种符号同步算法寻找帧起始位置的正确概率都为 1,但是文献[8]的算法是利用 OFDM 符号的同步训练序列所具有的共轭对称特性、通过接收信号的错位相关运算完成符号同步,对方能够利用接收信号较容易地检测出有用数据。本文所提出的符号同步算法是采用第 1 本地训练序列与接收信号进行移位相关运算,其中第 1 训练序列是由混沌序列构造,由于混沌序列是由混沌系统方程、初始值决定,且对初始值非常敏感,对方在不知道混沌系统方程或者不能较准确地预知初始值的情况下,无法得到与发送端相同的混沌序列,也就无法获得 OFDM 符号准确的起始位置,从而增强了该算法的保密性。

为了验证算法的优越性,在归一化频偏为 11.4 时进行算法的性能仿真。图 6 是文献[8]所采用的伪随机训练序列、改进的 Logistic 混沌序列与超混沌序列分别执行本文算法时的频偏估计的均方误差

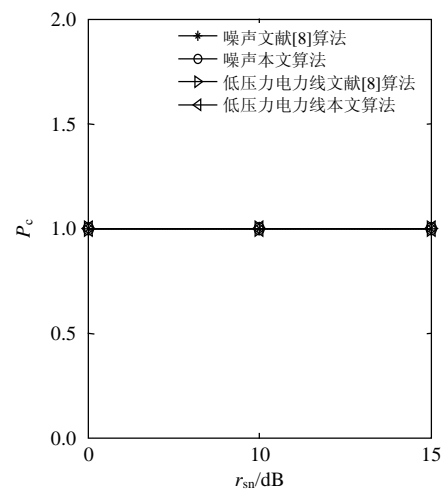


图 5 符号同步性能比较

Fig. 5 Comparison of symbol synchronization performance

$e_{sq}$  的曲线。从图 6 可以看出，无论在加性高斯白噪声信道下还是在低压电力线信道下，超混沌序列执行本文算法的载波同步性能要优于文献[8]中伪随机训练和改进的 Logistic 混沌序列执行本文算法的载波同步性能，体现出超混沌序列在 OFDM 同步研究领域所具有的优势。尽管改进的 Logistic 系统的电路实现容易，但它所产生的混沌序列较简单，这导致基于该系统的同步算法保密性较低。图 7 为文献[8]与本文算法的频偏估计的均方误差曲线，无论在加性高斯白噪声信道下还是在低压电力线信道下，本文算法的载波同步性能均优于文献[8]的载波同步性能。文献[8]中小数倍频偏估计是采用最大似然估计算法，在严重多径衰落信道下，部分循环前缀区间将受到 ISI 破坏，使得小数倍频偏估计性能恶化，继而影响整数倍频偏估计。本文对训练序列通过 2 次相关运算完成小数倍频偏估计，由于同

步训练序列的循环前缀对同步训练进行保护，使得同步训练序列与第 1 本地训练序列之间仍然保持良好的相关性能。本文算法所采用的整数倍频偏算法延续文献[8]中提到的循环移位思想，改进之处在于本文将接收的频域同步训练序列复制，生成前后 2 部分相同的新序列，将循环移位运算转变为移位相关运算，对算法进行简化。

### 4 结论

针对低压电力线信道的强噪声干扰和严重的多径效应，本文将混沌序列用于构造新的同步训练序列，并提出新的定时偏差估计和小数倍频率偏差估计方法，整数倍频偏估计方法沿用文献[8]中的循环移位相关算法，但本文通过改进算法，用延时相关运算替代循环相关运算，减少了运算量。仿真结果表明，本文算法的性能更优，适合于低压电力线通信系统。除此之外，由于本文采用的超混沌系统对初始条件极为敏感，且具有 2 个正李亚普诺夫指数，系统初始状态的任何微小误差都将引起系统行为随时间呈指数规律发散，最终导致不可估计和不可预测的结果，所以对方无法获得混沌序列来完成系统中的同步，从而实现通信系统的高度保密性。

### 参考文献

- [1] 何海波, 张有兵, 程时杰. 低压电力线通信中信号反射现象的复小波研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 11-15.  
He Haibo, Zhang Youbing, Cheng Shijie. Analysis of reflection of signal transmitted in low voltage power line with complex wavelet [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 11-15(in Chinese).
- [2] 方向红. OFDM 通信系统的符号和频率同步算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
Fang Xianghong. Study on symbol timing synchronization and frequency synchronization in OFDM communication systems [D]. Nanjing: Southeast University, 2006(in Chinese).
- [3] 罗春风, 程时杰, 熊兰, 等. 基于多层感知器的低压电力线时变信道非线性均衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 71-75.  
Luo Chunfeng, Cheng Shijie, Xiong Lan, et al. A nonlinear equalization method based on multilayer perceptron for OFDM powerline communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 71-75(in Chinese).
- [4] 韩谷静, 秦亮, 殷小贡, 等. 一种正交频分复用低压电力线通信系统的信道估计与迭代均衡策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 91-96.  
Han Gujing, Qin Liang, Yin Xiaogong, et al. A channel estimation and iterative equalization scheme OFDM in low-voltage power-line communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 91-96(in Chinese).
- [5] Moose P H. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(10): 2908-2914.

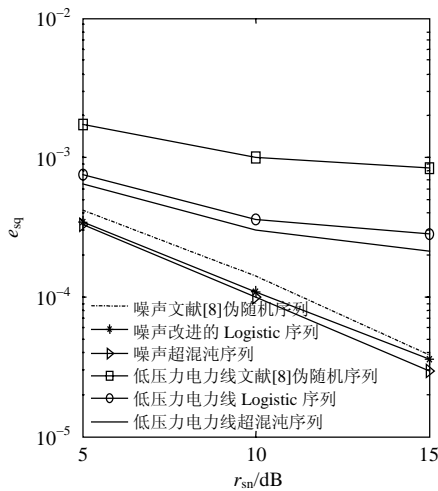


图 6 载波同步性能比较

Fig. 6 Comparison of carrier synchronization performance

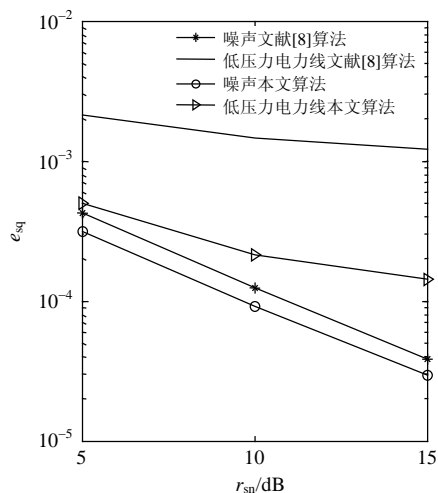


图 7 载波同步性能比较

Fig. 7 Comparison of carrier synchronization performance



- [6] Schmid T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [7] Kim Y H, Song I, Yoon S, et al. An efficient frequency offset estimator for OFDM systems and its performance characteristics [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(5): 1307-1312.
- [8] 郭漪, 刘刚, 葛建华, 等. OFDM 系统中的定时和频率同步[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(6): 906-910.  
Guo Yi, Liu Gang, Ge Jianhua, et al. Time and frequency synchronization for OFDM systems[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(6): 906-910(in Chinese).
- [9] 马章勇, 赵春明, 尤肖虎. 无线信道中 OFDM 系统时频同步新算法[J]. 通信学报, 2003, 24(12): 76-83.  
Ma Zhangyong, Zhao Chunming, You Xiaohu. A novel OFDM time and frequency synchronization algorithm in wireless channel [J]. Journal on Communications, 2003, 24(12): 76-83(in Chinese).
- [10] 王亚莉, 何非, 张海林, 等. 一种适用于瑞利衰落信道的有效的 OFDM 时频体制[J]. 通信学报, 2003, 24(1): 18-24.  
Wang Yali, He Fei, Zhang Hailin, et al. A burst time and frequency synchronization for OFDM transmission in Rayleigh fading channels [J]. Journal on Communications, 2003, 24(1): 18-24(in Chinese).
- [11] 曹雪虹. OFDM 系统中的联合同步和信道估计[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 508-512.  
Cao Xuehong. Combined synchronization and channel estimation for OFDM[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 508-512(in Chinese).
- [12] Beek J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800-1805.
- [13] Tureli U, Kivanc D, Liu H. Experimental and analytical studies on a high-resolution OFDM carrier frequency offset estimator[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2001, 50(2): 629-642.
- [14] Tureli U, Liu H, Michael D Z. OFDM blind carrier offset estimation: ESPRIT[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(9): 1459-1461.
- [15] 王光义, 郑艳, 刘敬彪. 一个超混沌 Lorenz 吸引子及其电路实现 [J]. 物理学报, 2007, 56(6): 3113-3120.  
Wang Guangyi, Zheng Yan, Liu Jingbiao. A hyperchaotic Lorenz attractor and its circuit implementation[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(6): 3113-3120(in Chinese).
- [16] 王繁珍, 齐国元, 陈增强, 等. 一个新的三维混沌系统的分析、电路实现及同步[J]. 物理学报, 2006, 55(8): 4005-4010.  
Wang Fanzhen, Qi Guoyuan, Chen Zengqiang, et al. Analysis, circuit implementation and synchronization of a new three-dimensional chaotic system[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 4005-4010(in Chinese).
- [17] 张建雄, 唐万生, 徐勇. 一个新的三维混沌系统[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6799-6806.  
Zhang Jianxiong, Tang Wansheng, Xu Yong. A new three-dimensional chaotic system[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 6799-6806(in Chinese).
- [18] 柳平, 闫川, 黄显高. 改进的基于 Logistic 映射混沌扩频序列的产生方法[J]. 通信学报, 2007, 28(2): 134-140.  
Liu Ping, Yan Chuan, Huang Xiangao. Optimized method of generating the spread-spectrum sequences based on Logistic-map [J]. Journal on Communications, 2007, 28(2): 134-140(in Chinese).
- [19] 张波, 李萍, 齐群. DC-DC 变换器分叉和混沌现象的建模和分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 81-86.  
Zhang Bo, Li Ping, Qi Qun. Methods for analyzing and modeling bifurcations and chaos in DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 81-86(in Chinese).
- [20] 张晓丹, 李志萍, 张丽丽. 一类基于奇异值分解的 Lyapunov 指数计算方法[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 371-374.  
Zhang Xiaodan, Li Zhiping, Zhang Lili. A method based on singular value decomposition for computation of Lyapunov exponent [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3): 371-374(in Chinese).
- [21] 李天云, 刘自发. 电力系统符合的混沌特性及预测[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 36-40.  
Li Tianyun, Liu Zifa. The chaotic property of power load and its forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 36-40(in Chinese).



唐良瑞

收稿日期: 2009-10-10。

作者简介:

唐良瑞(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统通信、信息安全、无线通信等, tangliangrui@163.com;

左琪(1985—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线通信, zuoqigoodluck@126.com。

(责任编辑 刘浩芳)