

# 一种新颖的低计算复杂度 OFDM 符号细同步算法

石峰<sup>1,2</sup> 胡登鹏<sup>1</sup> 王晨<sup>2</sup> 张尔扬<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 空军工程大学工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 本文针对基于重复共轭对称结构前导的 OFDM 系统, 提出了一种新的符号细同步算法。新提出的算法基于延迟相关、延迟相乘和对称相关, 设计出定时度量 1 和定时度量 2, 在利用定时度量 2 搜索出其峰值位置的基础上, 利用定时度量 1 确定出多径信道中的第一径。和传统的基于重复共轭对称结构前导的定时方法相比, 新提出的算法在具有较低计算量的同时, 消除了传统方法中的定时模糊问题, 并有效减小了多径信道条件下的定时位置偏移。在 6 径典型市区信道条件下的仿真结果表明, 新提出的同步方法可获得准确的符号同步性能。该方法适用于连续和突发 OFDM 系统的同步。

**关键词:** 延迟相关; OFDM; 对称相关; 细同步

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)07-1104-06

## A Novel and Low-Complexity Fine-Timing Synchronization Method for OFDM Systems

SHI Feng<sup>1,2</sup> HU Deng-peng<sup>1</sup> WANG Chen<sup>2</sup> ZHANG Er-yang<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073;  
2. Engineering Institute, Airforce Engineering University, Xi'an 710038)

**Abstract:** This paper proposes a new fine-timing synchronization method for OFDM systems based on repeated-conjugated-symmetric preamble. The proposed timing method utilizes delayed correlation, delayed product and symmetric correlation to design timing metric 1 and timing metric 2. Firstly, timing metric 2 is used to make initial timing synchronization according to its maximum value, and then timing metric 1 is used to find the first tap of multipath channel. Compared to the conventional timing synchronization method based on the conjugated-symmetric correlation, the proposed method has a low computational load and eliminates the timing ambiguity of conventional synchronization method caused by side peaks of the timing metric. Moreover, the proposed method can decrease efficiently the timing offset in multipath channel. Simulation results in 6-path channel for typical urban show that the proposed method achieves accurate timing performance. The proposed method is adapted to an OFDM system using either a continuous transmission or a burst operation.

**Key words:** delayed correlation; OFDM; symmetric correlation; synchronization

### 1 引言

OFDM 技术具有高频谱效率、较强的抗衰落能力等优点, 目前已成为新一代移动通信的技术核心。但对同步误差敏感是影响 OFDM 系统性能的一个主要因素, 目前已有许多基于前导的同步算法被提出<sup>[1-9]</sup>。其中, 基于共轭对称结构前导的同步方法消除了载波频偏的影响, 可在时域完成符号细同步, 并能实现较大范围的频偏估计<sup>[4,9]</sup>。在文献[4,5]基于单一共轭对称结构前导的同步算法中, 小数倍频偏的估计精度受循环前缀长度的制约。对于具有重复共轭对称结构的前

导, 文献[6]利用整个前导的共轭对称性构造定时度量, 文献[7,8]利用前导半数长度序列的共轭对称性构造定时度量, 两种方法均能产生尖锐的定时度量, 但文献[6]中的方法存在较明显的定时度量次峰, 文献[7,8]中的方法则存在多个大小相当的峰, 均容易引起定时模糊。文献[9]利用延迟相关和对称相关的乘积构造定时度量, 并采用两个相邻区域比较的方法确定出最终的定时位置, 巧妙地解决了次峰引起的定时模糊问题, 但仍存在定时偏移的现象, 且初始门限值需通过仿真确定, 限制了该方法在实际信道中的应用。文献[10]对基于单一共轭对称前导的同步算法进行了分

析,指出当多径信道不存在功率很强的主径时,定时估计精度会下降。

针对以上问题,本文提出了一种基于重复共轭对称结构前导的符号同步新算法。新提出的算法基于延迟相关、延迟相乘和对称相关,设计出两个定时度量,分别完成定时度量峰值位置的搜索和多径信道第一径的搜索。和传统的基于重复共轭对称结构前导的定时方法相比,新提出的算法在具有较低计算量的同时,可有效消除传统方法中定时度量次峰引起的定时模糊,并减小多径信道条件下的定时位置偏移,获得更准确的符号定时。

## 2 OFDM 信号模型

我们考虑用  $N$  点 IFFT 实现包含  $N$  个子载波的 OFDM 调制的系统,其中  $K+1$  个子载波用于传送数据,假设采用理想的 Nyquist 脉冲成形,则发射端基带 OFDM 信号的采样可以表示为

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-K/2}^{K/2} a_k \exp(j2\pi kn/N), \quad -G \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

其中  $a_k$  表示调制在第  $k$  个传输子载波上的数据符号,  $G$  是保护间隔对应的采样数,  $j = \sqrt{-1}$ 。

在接收端,存在载波频偏、采样钟误差和符号同步偏移。通常,载波频偏和符号同步偏移的影响是主要的,采样钟的偏差一般很小,所以可以假设系统收发两端采样钟完全同步,仅存在定时偏移和频率偏移,则接收端信号的采样为

$$r(n) = \exp(j2\pi fn/N) \cdot \sum_{i=0}^{L-1} h_i \cdot s(n - \varepsilon - \tau_i) + w(n) \quad (2)$$

其中  $f$  表示对子载波间隔归一化的载波频偏,  $L$  为信道总的路径数,  $h_i$  表示第  $i$  条路径的复增益,  $\tau_i$  为对应的路径延时,  $\varepsilon$  表示对采样周期归一化的符号偏移,  $w(n)$  表示均值为 0、方差为  $\sigma_w^2$  的加性高斯白噪声采样。假设所有路径的归一化平均总能量为 1,信号  $s(n)$  的平均功率为  $\sigma_s^2$ ,则平均信噪比 (SNR) 为  $\sigma_s^2/\sigma_w^2$ 。

OFDM 符号同步的任务就是要确定出指示信号出现的同步标志,以及接收信号的起始位置,即 FFT 窗的起始位置。在多径信道条件下,准确的符号同步应当确定出第一条路径的起始位置<sup>[9]</sup>。

## 3 新的符号同步算法

本文采用的前导结构具有如下时域形式:

$$P = [A_{N/4} \ B_{N/4} \ A_{N/4} \ B_{N/4}] \quad (3)$$

其中  $A_{N/4}$ 、 $B_{N/4}$  表示长度为  $N/4$  的序列,且  $A_{N/4}$  和  $B_{N/4}$  共

轭对称,具体可表示为

$$a(n) = b^*(N/4 - n), \quad n = 1, 2, \dots, N/4 - 1 \quad (4)$$

其中  $a(n)$ 、 $b(n)$  分别表示  $A_{N/4}$  和  $B_{N/4}$  的第  $n$  项;另外,  $a(0)$ 、 $b(0)$  均为实数。

该前导结构在 IEEE802.11a、IEEE802.16d 等标准中得到广泛应用,因而具有一定的代表性。新提出的同步算法利用该前导结构上的重复特性和共轭对称特性,进行定时度量设计。

### 3.1 定时度量设计

为了减小计算量,本文采用前导半数长度序列的共轭对称性设计定时度量。同时考虑到减小次峰的影响,设计定时度量 1 为

$$M_1(d) = M_{cs}(d) \cdot M_{cs}(d + D_1) \quad (5)$$

其中  $M_{cs}(d)$  为传统的共轭对称相关度量,  $d$  表示对称相关窗内第一个采样的时间序号,  $D_1$  表示进行相乘的两个共轭对称相关度量间的延迟。可根据循环前缀的长度对  $D_1$  进行相应的设置,以有效减小定时度量的次峰。 $M_{cs}(d)$  可表示为

$$M_{cs}(d) = \frac{|P_{cs}(d)|^2}{(R_{cs}(d))^2} \quad (6)$$

$$P_{cs}(d) = \sum_{m=0}^{N/4-1} r(d+m+N/4)r(d-m+N/4) \quad (7)$$

$$R_{cs}(d) = \sum_{m=0}^{N/4-1} |r(d+m+N/4)|^2 \quad (8)$$

其中,式(8)可以用迭代的方法进行计算:

$$R_{cs}(d+1) = R_{cs}(d) + |r(d+N/2)|^2 - |r(d+N/4)|^2 \quad (9)$$

为进一步降低定时度量的次峰,设计定时度量 2 为

$$M_2(d) = M_1(d) \cdot M_3(d) \quad (10)$$

$$M_3(d) = \frac{1}{G} \sum_{i=0}^{G-1} M_d(d-i) \quad (11)$$

其中,  $M_d(d)$  表示传统的延迟相关度量<sup>[11]</sup>:

$$M_d(d) = \frac{|P_d(d)|^2}{(R_d(d))^2} \quad (12)$$

$$P_d(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} r^*(d+k)r(d+k+N/2) \quad (13)$$

$$R_d(d) = \sum_{k=0}^{N/2-1} |r(d+k+N/2)|^2 \quad (14)$$

其中,式(11)中平均运算的主要作用是对延迟相关度量进行平滑,同时消除延迟相关度量的平项;式(11)、(13)和(14)也可以用迭代的方法进行计算。

图 1 给出了理想静态多径信道条件下定时度量 1 和定时度量 2 的示意图。仿真参数设置为:子载波数目为 1024,保护间隔长度为 96,采样周期为 80ns;信道各

路径的功率和时延分别取值为6径典型市区(TU)信道<sup>[11]</sup>的平均功率和时延,且不考虑高斯白噪声。由图1可知,和文献[6]中的定时度量相比,定时度量1和定时度量2减小了定时度量中的次峰,其中定时度量2抑制次峰的效果更好。

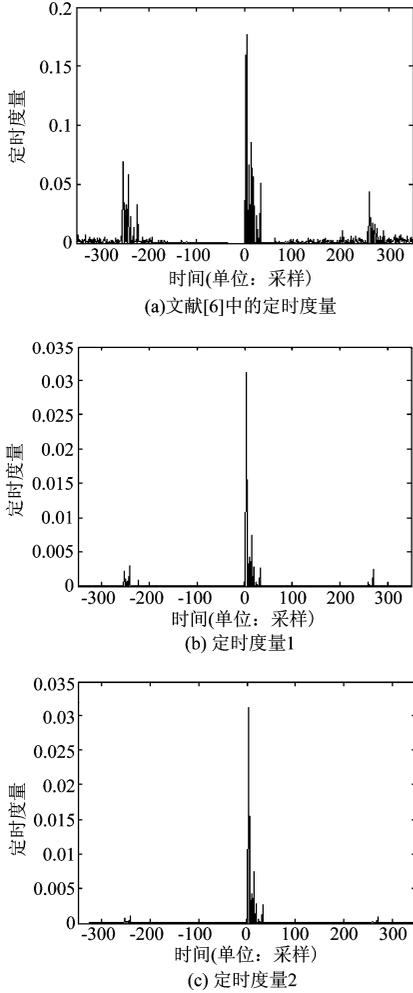


图1 多径信道条件下定时度量示意图

### 3.2 符号同步过程

考虑到实际应用时最大值操作的实现问题,可取 $M_3(d)$ 作为开关度量,在 $M_3(d)$ 超过一定门限的范围内,对定时度量2进行最大值操作。另外,为了提高不存在功率很强的主径的多径信道条件下的定时估计精度,可进一步利用定时度量1对多径信道的第一径进行搜索。

根据以上分析,可将新提出的基于重复共轭对称结构前导的OFDM符号同步算法描述为以下三个步骤:

步骤1,计算开关度量 $M_3(d)$ ,并将其与预先设定门限 $T_{h1}$ 比较,当大于 $T_{h1}$ 时,开始对定时度量2依次进行比较,并存储定时度量较大的位置;

步骤2,当开关度量小于门限 $T_{h1}$ 时,停止对定时度量2的比较,此时所存储的定时度量较大的位置就是搜索到的定时度量2的峰值位置;

步骤3,在开关度量大于门限 $T_{h1}$ 的范围内,从定时度量2的峰值位置向前 $N_{pre}$ 点开始向后搜索,将定时度量1大于预定门限 $T_{h2}$ 的点确定为最终的定时位置。若找不到满足条件的点,则取步骤2中定时度量2的峰值位置作为最终的定时位置。

### 3.3 算法性能分析

根据以上介绍可知,新提出的算法是在开关度量超过门限 $T_{h1}$ 时,在定时度量2峰值位置基础上,通过在一定范围内对超过门限 $T_{h2}$ 的定时度量1进行搜索,确定出最终的定时位置。因此,门限 $T_{h1}$ 和 $T_{h2}$ 的选取是决定算法性能好坏的关键。

#### 3.3.1 开关度量 $M_3(d)$ 的分析

由式(11)可知,开关度量 $M_3(d)$ 是对传统延迟相关度量 $M_d(d)$ 的平均。根据[1]中的分析可知,在正确的定时位置 $d_{opt}$ 上延迟相关度量近似为高斯分布:

$$M_d(d_{opt}) \sim N(\mu_{M_d}, \sigma_{M_d}^2) \quad (15)$$

其中,

$$\mu_{M_d} = \sigma_s^4 / (\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2 \quad (16)$$

$$\sigma_{M_d}^2 = \frac{4\sigma_s^4 [(1 + \mu_{M_d})\sigma_s^2\sigma_w^2 + (1 + 2\mu_{M_d})\sigma_w^4]}{N(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^4} \quad (17)$$

在前导符号之外,则有

$$M_d(d_{outside}) \sim \frac{1}{N} \chi_2^2 \quad (18)$$

由式(16)可知, $M_d(d_{opt})$ 的均值是SNR的单调递增函数;式(18)表明, $M_d(d_{outside})$ 和SNR无关。因此,事先可根据系统的应用环境适当选取尽可能小的SNR的值,由式(15)-(18)对门限 $T_{h1}$ 进行设置。假设SNR的最小值为0 dB,则当采用1024个子载波,保护间隔长度为96时,可求得 $M_d(d_{opt})$ 的均值为0.25,方差为 $6.71 \times 10^{-4}$ ;  $M_d(d_{outside})$ 的均值和标准差均为 $1.95 \times 10^{-3}$ 。若把 $M_d(d)$ 作为开关度量,且将门限 $T_{h1}$ 设为0.16,则当前导出现时,漏检(即未检测出前导)的概率小于 $3 \times 10^{-4}$ ;当没有前导时, $M_d(d_{outside})$ 超过该门限的概率为 $2.65 \times 10^{-36}$ ,即为误检的概率。式(11)中对 $M_d(d)$ 进行平均得到开关度量 $M_3(d)$ ,减小了开关度量的方差,可进一步提高系统的检测性能。

#### 3.3.2 定时度量门限 $T_{h2}$ 的选取

新提出的同步方法是从定时度量2峰值位置向前 $N_{pre}$ 点开始,向后对多径信道中的第一径进行搜索的。通常在OFDM系统设计时,要求保护间隔的长度

大于最大路径延迟,因此,不妨设  $N_{pre} = G$ 。由于定时度量 1 是两个对称相关度量的乘积,直接对其分布进行理论分析较为繁杂,这里使用概率统计中经验分布函数的方法<sup>[12]</sup>,对其进行分析,并由此确定出门限  $T_{h2}$ 。

当共轭对称相关滑动窗内的数据无任何对称结构时,由式(7)可知  $P_{cs}(d)$  是由相位随机分布的  $N/4$  项的累加,所以,此时  $M_{cs}(d)$  的分布和文献[1]中定时度量在训练符号之外的分布相同。因此,可类推出定时度量  $M_{cs}(d)$  服从  $\chi^2$  分布:

$$M_{cs}(d) \sim \frac{2}{N} \chi^2 \quad (19)$$

假设相互独立的随机变量  $X, Y$  均服从  $\chi^2$  分布,令  $Z = XY$ 。为得到  $Z$  的经验分布函数,进行如下实验:每次实验随机产生  $X, Y$  样本各  $10^6$  个,对应位置上的样本相乘得到  $Z$  的样本  $10^6$  个,由此可计算得到  $Z$  的经验分布函数;共实验 100 次,并将所有实验结果进行平均作为最终的经验分布函数。同样可得到  $X$  的经验分布函数,记为  $F_n(x)$ 。图 2(a) 中同时给出了实验中得到的  $X$  和  $Z$  的经验分布函数曲线,并给出了  $\chi^2$  分布变量的理论分布函数曲线(标注为“理论值”)。注意图中标示的为变量  $X$  的取值,且仅给出了取值范围为 0~30 时的情况,其中步进量为 0.1;对应于  $Z$  的实际坐标应为当前标示值的平方。图 2(b) 给出了函数  $1 - F_n(x)$  (我们称之为“互补经验分布函数”)的曲线,其中  $Z$  的样本中没有出现大于 400 (即  $20^2$ ) 的情况。

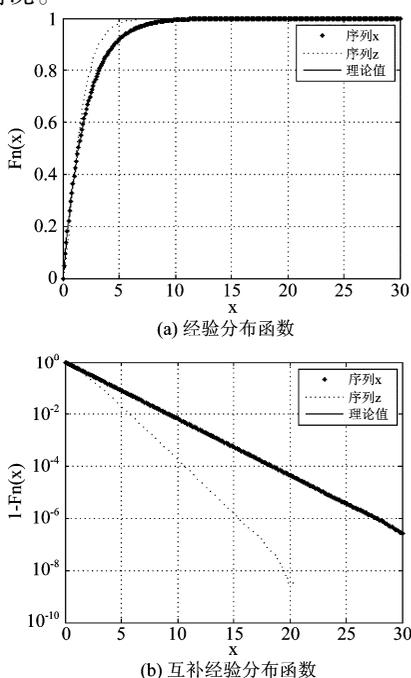


图2  $X, Z$  的经验分布函数和互补经验分布函数

图 2 中,  $X$  的经验分布函数和  $\chi^2$  分布变量的理论分布函数完全吻合。这证实了当样本容量很大时,经验分布函数是变量分布函数的良好近似<sup>[12]</sup>。因此,  $Z$  的经验分布函数具有实际的指导意义。由式(19)可知,当对称滑动窗未对准任何共轭对称结构时,  $M_{cs}(d)$  与 SNR 无关,所以相应的定时度量 1 也与 SNR 无关。根据这一特点,并结合  $Z$  的经验分布函数,可以对门限  $T_{h2}$  进行适当设置,且可认为超过该门限值时即有某条路径对该准滑动窗。当取  $N$  为 1024,  $G$  为 96, 且取  $N_{pre} = G$  时,若要求在该范围内发生误检测的概率小于  $1 \times 10^{-3}$ ,则可以求出  $Z$  的最小值约为 169, 对应的定时门限  $T_{h2}$  为  $6.447 \times 10^{-4}$ 。在实际应用中可对数据进行适当调整,使相应的运算结果处于适当的范围内。

### 3.3.3 计算复杂度简要分析

新提出的方法利用前导半数长度序列的共轭对称性构造定时度量,文献[6]基于整个前导的共轭对称性构造定时度量(以下称“Kim 方法”),文献[9]将延迟相关和对称相关相乘作为定时度量(以下称“Zhou 方法”)。下面,我们通过计算每新输入一个采样时度量度的计算所需直接进行的复数乘法个数,对三种方法的计算复杂度作简要比较。

对于新提出的算法,式(7)包含复数乘法  $N/4$  次,式(6)、(12)的分子各需进行复数乘法 1 次;由式(9)可知,考虑使用迭代方法时,  $R_{cs}(d)$  的计算包含 2 次复数乘法,同样的,式(13)、(14)使用迭代方法计算时,也分别进行 2 次复数乘法。因此,新方法所需直接进行的复数乘法个数为  $N/4 + 8$ 。同样的, Kim 方法和 Zhou 方法中,所需进行的直接复数乘法次数分别为  $N/2 + 3$  和  $N/2 + 5$ 。当  $N = 1024$  时,三种方法中所包含的复数乘法个数分别为 264、515 和 517,其中,新提出算法的计算量最小。

根据以上介绍和分析,可知新提出的算法具有以下特点:

- (1) 使用前导半数长度序列的共轭对称性设计定时度量,计算量小;
- (2) 在对称相关度量延迟相乘的基础上,与平滑后的延迟相关度量进行相乘,可有效降低定时度量的次峰;
- (3) 在定时度量峰值位置基础上搜索得到第一径,可有效减少定时偏移;
- (4) 固定门限值可在理论分析基础上进行设置,且不受多径信道的限制,利于算法的实际应用。

另外,当第一条路径能量较微弱时,符号同步估计将定时在后面较强的路径上。在这种情况下,由于前面路径能量很低,被忽略时不会造成明显的性能下降<sup>[9]</sup>。

## 4 仿真结果及分析

为验证新提出同步方法的性能,在6径TU信道<sup>[11]</sup>条件下进行了 Monte-Carlo 仿真。6条路径的相对平均功率分别为-3、0、-2、-6、-8、-10dB,相对时延分别为0、0.2、0.6、1.6、2.4、5.0 $\mu$ s。系统参数参照文献[9]设置为:系统带宽为12.5MHz,子载波数目为1024,保护间隔长度为96,采样周期为80ns。考虑射频为2GHz,终端移动速度为16.67m/s(60公里每小时)。因为对称相关和延迟相关对频偏均不敏感,这里不妨假设载波理想同步。实验中,每个SNR上实验 $10^4$ 次,每次取不同的前导、噪声和信道,且在前导符号之前添加不同长度的噪声序列,并将对应于第一条路径的位置标记为0。为进行比较,也给出了Kim方法和Zhou方法的符号同步结果。其中,Kim方法依据定时度量峰值进行同步,Zhou方法中的门限参照文献[9]设置为0.1。对于新提出算法,根据3.3中的分析,这里将门限 $T_{h1}$ 设为0.16,门限 $T_{h2}$ 设为 $6.4 \times 10^{-4}$ 。

表1给出的是实验中发生漏检的统计结果。统计结果表明Zhou方法仅在0dB时出现了漏检,Kim方法和新方法均未发生漏检现象。这是因为SNR非常低时,Zhou方法得到的定时度量很小,出现了未能超越预先设定门限的现象。Kim方法依据定时度量峰值进行同步,所以仿真时不存在漏检现象。实验中新方法未出现漏检现象,表明对于门限 $T_{h1}$ 的选取是适当的。

表1 漏检次数统计

	SNR(单位: dB)						
	0	5	10	15	20	25	30
Kim方法	0	0	0	0	0	0	0
Zhou方法	863	0	0	0	0	0	0
新方法	0	0	0	0	0	0	0

实验中将定时结果位于保护间隔之前,或者位于最大路径延迟之后的情况作为虚警。表2给出了发生虚警的统计结果。由表2可知,实验中Kim方法在低SNR时发生虚警的情况最严重,随着SNR的提高,虚警次数迅速减少;在SNR大于5dB时,Zhou方法发生虚警次数逐渐增多;新方法仅在0dB时出现一次虚警现象。这是由于当SNR较低时,噪声对于Kim方法中的定时度量影响较大,容易发生定时模糊;而对于Zhou方法,随着SNR的提高,在理想定时位置附近较大范围内,定时度量中延迟相关部分的值逐渐升高,导致虚警现象容易发生。因此,Zhou方法中通过仿真对门限进行设置的方法不能充分保证在实际信道条件下的检测性能。

表2 虚警次数统计

	SNR(单位: dB)						
	0	5	10	15	20	25	30
Kim方法	157	8	2	1	1	1	1
Zhou方法	0	0	1	6	9	10	15
新方法	1	0	0	0	0	0	0

图3给出了6径TU信道条件下符号同步的均方误差(MSE)曲线。由图3可以看出,新提出方法的性能最好;SNR较低时,Zhou方法的性能好于Kim方法,但在SNR大于10dB时,Zhou方法的性能逐渐变差。结合表2可知,这是因为新方法较好地抑制了定时模糊,且对多径信道的第一径进行搜索,减小了定时偏移,获得了较好的定时性能;而Zhou方法在中高SNR时,虚警次数逐渐增多,导致系统同步性能变差。表3具体给出了实验中在TU信道条件下,SNR为10dB时三种方法定时结果在不同位置(或区间)上的统计情况,其中 $p < -1$ 表示定时位置在时间序号为-1的采样点之前的位置。表3表明新方法定位在第一径的次数远大于Zhou方法和Kim方法。其中,新提出方法定时在采样点0和采样点1的次数占总实验次数的77.41%,相应地,Zhou方法和Kim方法的比例则分别为58.29%和15.2%。因此,三种方法中新提出方法的定时精度最高。

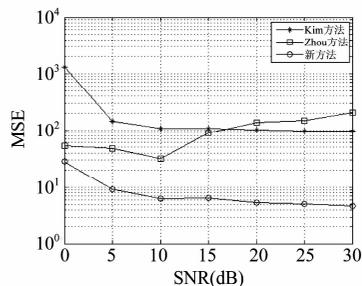


图3 符号定时估计的均方误差曲线,6径TU信道

表3 6径TU信道条件下,SNR为10dB时,定时位置的统计情况

	定时位置 p					
	$p < -1$	-1	0	1	$1 < p \leq 63$	$p > 63$
Kim方法	2	0	573	950	8475	0
Zhou方法	15	13	3130	2709	4133	0
新方法	0	1	4772	2969	2258	0

## 5 结论

为了提高OFDM系统的符号同步性能,本文基于重复共轭对称前导提出了一种新的符号同步算法。新提出的算法充分利用前导的延迟相关特性和对称相关

特性,设计出两个定时度量,分别实现对定时度量峰值位置的搜索和多径信道第一径的搜索。和同类方法相比,新算法的计算量小,且有效消除了定时模糊,减小了定时位置偏移。仿真结果表明,新提出的方法可实现更准确的符号定时。由于具有计算量小、定时精度高特点,该算法适用于连续和突发 OFDM 系统的符号同步。

#### 参考文献

- [1] Schmidl T M, Cox D C. Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12):1613-1621.
- [2] 严春林. 正交频分复用系统中的同步技术研究[D]. 电子科技大学, 2004:39-52.
- [3] Zhang Z, Kayama H, and Tellambura C. Joint Frame Synchronization and Carrier Frequency Offset Estimation in Multicarrier Systems [A]. IEEE Globecom [C], 2006:1-6.
- [4] 周一青, 胡爱群. 利用训练帧进行 OFDM 系统同步的新算法[J]. 通信学报, 2001, 22(4):13-18.
- [5] Guo Y, Liu G, Ge J. A New Time and Frequency Synchronization Scheme for OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 321-325.
- [6] Kim J J, Noh J H, and Chang K H. Robust Timing & Frequency Synchronization Techniques for OFDM-FDMA Systems [A]. IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation [C], 2005: 716-719.
- [7] Wu M, Zhu W P. A Preamble-Aided Symbol and Frequency Synchronization Scheme for OFDM Systems [A]. IEEE ISCAS [C], 2005:2627-2630.
- [8] Manusani S K, Kshetrimayum R S, and Bhattacharjee R. Robust Time and Frequency Synchronization in OFDM based 802.11 WLAN Systems [A]. Annual IEEE India Conference [C], Sept. 2006.
- [9] Zhou E, Hou X, Zhang Z, and Kayama H. A Preamble Structure and Synchronization Method based on Central-Symmetric Sequence for OFDM Systems [A], IEEE VTC [C], 2008:1478-1482.
- [10] 田野, 谈振辉, 冯永新, 张子敬, 张艳琴. 基于共轭对称结构训练符号的 OFDM 同步算法性能分析[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(6):1240-1243.
- [11] GSM 05.05. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Radio Transmission and Reception [S]. Jul. 1996.
- [12] 杨德保. 工科概率统计[M]. 第3版. 北京:北京理工大学出版社,2007:201-207.

#### 作者简介



石峰(1976-),男,博士生,讲师,主要研究方向为军事通信中 OFDM/FH-OFDM 的同步技术和信道估计技术。



胡登鹏(1982-),男,博士生,95661 部队助理工程师,主要研究方向:军用无线通信与侦察。



王晨(1977-),女,硕士,讲师,主要研究方向为军事通信与导航中的信号处理技术。

张尔扬(1941-),男,教授、博士生导师,主要研究方向为军事无线通信与网络技术、电磁环境模拟仿真和通信对抗技术等。