

# 基于 CAZAC 序列的低复杂度抗频偏同步算法

宫丰奎, 文妮, 李果, 高洋

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 提出了一种基于恒包络零自相关 (CAZAC) 序列的低复杂度抗频偏同步算法, 适用于突发正交频分复用 (OFDM) 系统。由 CAZAC 序列构造一种新型前导序列, 利用该序列的组合特性, 推导其简化的定时度量函数, 进而利用时延相关和对称相关特性实现精确稳定的定时同步。进一步地, 基于所构造的前导序列, 提出了一种联合循环前缀的加权频率同步方案, 可获得更准确的频偏估计。仿真结果表明, 无论是否存在频偏, 所提算法在高斯信道、多径衰落信道环境下均具有良好的同步性能, 并且其计算复杂度低于大多数现有代表性算法。

**关键词:** 正交频分复用; 恒包络零自相关序列; 前导序列; 同步; 抗频偏

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2021038

## Low-complexity and frequency-offset-robust synchronization algorithm based on CAZAC sequence

GONG Fengkui, WEN Ni, LI Guo, GAO Yang

State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China

**Abstract:** A low-complexity and frequency-offset-robust synchronization algorithm based on CAZAC sequence was proposed, which was suitable for burst OFDM systems. A new preamble sequence was constructed based on the CAZAC sequence, and its simplified timing metric function was derived by using the combination characteristics of the sequence, and then the delay correlation and symmetric correlation characteristics were used to achieve accurate and stable timing synchronization. Furthermore, based on the new constructed preamble sequence, a weighted frequency synchronization scheme combining cyclic prefix was proposed to obtain more accurate frequency offset estimation. Simulation results show that the proposed algorithm has good synchronization performance in both Gaussian channels and multipath fading channels regardless of frequency offset, and its computational complexity is lower than the most existing representative algorithms.

**Keywords:** OFDM, CAZAC sequence, preamble sequence, synchronization, frequency-offset-robust

### 1 引言

正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency

division multiplexing) 作为一种多载波调制方式, 具有频谱效率高、抗频率选择性衰落和易调制解调等优点, 已被广泛应用于多个无线通信标准与无线

收稿日期: 2020-08-06; 修回日期: 2020-11-01

通信作者: 李果, gli@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No.61901325, No.62001354); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFE0100500); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2018M640958); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目 (No.2019JQ-658); 陕西省技术创新引导专项基金资助项目 (No.2019CGXNG-010, No.2020CGXNG-036)

**Foundation Items:** Youth Program of National Natural Science Foundation of China (No.61901325, No.62001354), The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFE0100500), China Postdoctoral Science Foundation Project (No.2018M640958), The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No.2019JQ-658), Technology Innovation Leading Program of Shaanxi (No.2019CGXNG-010, No.2020CGXNG-036)

通信场景中，例如最新的 LTE-A (long term evolution-advanced) [1]、5G NR (5th-generation new radio) [2]、DVB-T2 (the second generation of digital video broadcasting-terrestrial) [3]、无线局域网 (WLAN, wireless local area network) 标准 [4] 等。但是，OFDM 信号也存在一些劣势，例如其对由多普勒频移或振荡器的不稳定性所引起的频率偏移 (简称频偏) 非常敏感 [5]，一旦产生同步误差，就会破坏子载波间的正交性，从而引入子载波间干扰 (ICI, intercarrier interference) 和符号间干扰 (ISI, intersymbol interference)，使 OFDM 信号解调性能急剧降低。因此，OFDM 突发传输系统对同步的要求很高，近年来研究者提出了很多同步算法 [6-15]，用来联合或单独估计定时偏差和频偏。

在 OFDM 系统中，按是否需要数据辅助，其同步方法可大致分为两类：非数据辅助的盲估计算法和数据辅助的估计算法。其中，非数据辅助的盲估计算法一般用于连续传输系统中，如 DVB-T2，主要是利用 OFDM 系统自身的结构特性进行同步，其代表算法是基于循环前缀的最大似然 (ML, maximum likelihood) 估计算法 [6]，这种算法不需要额外设计同步序列，节省了系统带宽，提高了带宽利用率，但同步性能比数据辅助的估计算法差。数据辅助的估计算法一般用于突发通信系统中，主要是利用已知的前导序列，通过捕获定时度量函数的峰值完成定时同步，进而完成频率同步。前导序列主要是由伪噪声 (PN, pseudo-noise) 序列或恒包络零自相关 (CAZAC, constant amplitude zero auto correlation) 序列等一些自相关、互相关性能良好的序列构成。基于 PN 序列进行同步的代表性算法有 SC 算法 [7]、Minn 算法 [8]、Park 算法 [9] 和 Yang 算法 [10]。SC 算法是利用 2 个相同的序列进行定时同步的，由于循环前缀的存在，其定时度量函数曲线存在平顶效应；Minn 算法在 SC 算法的基础上进行了改进，利用四段特征序列进行定时同步，虽然消除了平顶效应，但存在较高旁瓣；Park 算法设计了一种具有共轭对称性质的训练序列结构，与 SC 算法、Minn 算法相比，该算法在正确起始点位置存在一个较大的峰值，提高了定时度量的准确性，但仍存在较小的旁瓣；Yang 等 [10] 提出了一种基于最优相关的循环移位前导序列的粗符号定时方案，该算法在多径衰落信道下具有良好的性能，但其旁瓣较高且计算复杂度高。这些算法出现的峰值平顶效应或存在的较

大旁瓣对定时同步有一定的影响，而 CAZAC 序列良好的相关特性正好可以解决这些问题，因此 CAZAC 序列在 OFDM 系统的同步中得到了广泛应用。

基于 CAZAC 序列进行同步的代表性算法有 Fang 算法 [11]、Shao 算法 [12] 和 Jian 算法 [13]。Fang 算法是利用随机指数序列对 CAZAC 序列进行加权处理来完成定时同步的。Shao 算法则采用一种类似 Park 算法的训练序列结构，在接收端利用新的加权因子进行定时同步。Fang 算法、Shao 算法在多径衰落信道下性能良好，但是在接收端进行同步时需要使用额外的加权序列，这会浪费一些存储空间，还会增加其计算复杂度。文献 [13] 设计了一种新的训练序列结构，在进行定时同步时可降低计算复杂度，但当存在频偏时，该算法的定时同步性能明显下降。Zhang 等 [14] 提出了一种简化的互相关检测器来计算接收样本与本地序列的相关值，虽然实现复杂度低，但和 Jian 算法一样对频偏敏感。文献 [15] 提出了由 Zadoff-Chu 序列及其修正序列级联构造主前导信号，由 2 个不同的循环移位  $m$  序列构造次前导信号的同步方法。

为了解决 Jian 算法等典型同步算法对频偏敏感的问题，同时保证其低实现复杂度，本文设计了一种基于 CAZAC 序列的、具有共轭对称和共轭反对称结构的新型前导序列，推导了新的对应定时度量函数及频偏估计函数，提出了相应的定时同步及频率同步方法，并和典型同步算法进行了详细对比，证明所提算法在同步性能和计算复杂度方面的优势。

## 2 系统模型

本文考虑突发复基带 OFDM 信号帧  $x(n)$ ,  $n=0,1,2,\dots,N_F-1$ ,  $N_F$  为突发帧长，由一段前导序列及数据构成。OFDM 突发帧结构如图 1 所示。

图 1 中， $N_{CP}$  为循环前缀 (CP, cyclic prefix) 的长度。第  $m$  个发送符号可表示为 (不含 CP)

$$x_m(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d_{m,k} e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

其中， $d_{m,k}$  为第  $m$  个 OFDM 符号中第  $k$  个子载波上的调制符号， $m=0,1,2,\dots,M$ ，当  $m=0$  时  $x_m(n)$  为前导序列； $M$  为突发帧中的数据 OFDM 符号个数； $N$  为快速傅里叶逆变换 (IFFT, inverse fast Fourier transform) 点数； $n=0,1,2,\dots,N-1$ ； $j$  为虚数单位。

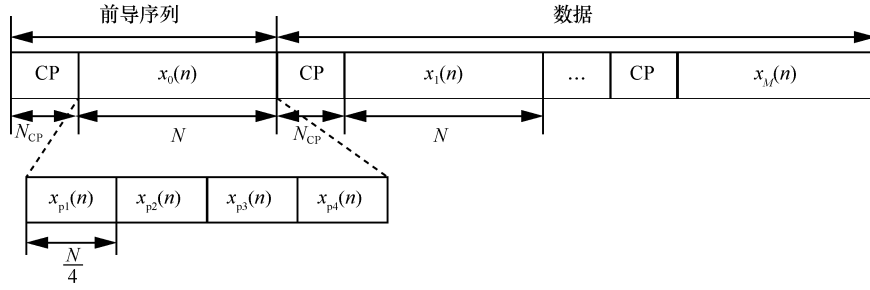


图 1 OFDM 突发帧结构

经过信道后，假设不存在采样时钟频率误差，接收到的 OFDM 符号可表示为

$$r(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l x(n-d-\tau_l) e^{\frac{j2\pi n \varepsilon}{N}} + w(n) \quad (2)$$

其中， $L$  为多径数目； $h_l$  和  $\tau_l$  分别为第  $l$  径的复信道衰减和时延； $d$  为时间偏移估计值； $\varepsilon$  为相对于子载波间隔  $f_s$  的归一化频偏， $\varepsilon = \frac{f_\Delta}{f_s}$ ， $f_\Delta$  为频偏； $w(n)$  为零均值复高斯白噪声， $n=0,1,2,\dots,N_R-1$ ， $N_R$  为接收信号长度。

### 3 算法描述

#### 3.1 基于 CAZAC 序列的新型前导序列设计

本节设计一种新型前导序列，用于后续定时同步和频率同步。如图 1 所示，设计的前导序列由四部分组成，即  $x_0(n)=[x_{p1}(n) x_{p2}(n) x_{p3}(n) x_{p4}(n)]$ 。进一步地，定义 CAZAC 序列  $x_{p1}(n)$  为

$$x_{p1}(n) = e^{\frac{j\pi n^2}{N}} \quad (3)$$

其中， $n=0,1,2,\dots,\frac{N}{4}-1$ 。

序列  $x_{p2}(n)$  是序列  $x_{p1}(n)$  的共轭对称序列，即

$$x_{p2}(n) = x_{p1}^* \left( \frac{N}{4} - n - 1 \right) \quad (4)$$

序列  $x_{p3}(n)$  是通过对序列  $x_{p1}(n)$  的偶数项进行取反得到的，即

$$x_{p3}(n) = \begin{cases} x_{p1}(n), & n \text{ 为奇数} \\ -x_{p1}(n), & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (5)$$

序列  $x_{p4}(n)$  是通过对序列  $x_{p2}(n)$  的偶数项进行取反得到的，即

$$x_{p4}(n) = \begin{cases} x_{p2}(n), & n \text{ 为奇数} \\ -x_{p2}(n), & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (6)$$

在文献[13]中，序列  $x'_{p3}(n)$  是通过对序列  $x_{p2}(n)$  的共轭序列的偶数项进行取反得到的，即

$$x'_{p3}(n) = \begin{cases} x_{p2}^*(n), & n \text{ 为奇数} \\ -x_{p2}^*(n), & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7)$$

文献[13]中设计的前导序列结构形如  $x'_0(n)=[x_{p1}(n) x_{p2}(n) x'_{p3}(n) x_{p4}(n)]$ ，在进行定时同步时利用了对频偏敏感的时延自相关运算，从而降低了频偏存在时的定时同步性能。因此，本文从避免使用时延自相关运算角度出发，设计了新型前导序列  $x_0(n)$ 。在  $x_0(n)$  中， $x_{p1}(n)$  和  $x_{p2}(n)$  形成共轭对称， $x_{p3}(n)$  和  $x_{p4}(n)$  形成共轭反对称，从而在定时同步阶段可以对 2 个组合进行对称自相关运算，这不仅可以简化在接收端构造的定时度量函数，而且使定时度量函数在正确的符号起始点存在一个尖锐的峰值，在有频偏时，可以消除频偏对定时同步的影响。

#### 3.2 简化定时度量函数与定时同步

在接收端，设接收窗口长度为  $N$ ，在窗口长度内根据提出的前导序列结构，设置定时度量函数为

$$M(d) = \frac{|P(d)|^2}{(R(d))^2} \quad (8)$$

其中， $P(d)$  为未经过归一化处理的相关函数。忽略噪声和多径的影响，由式(2)可得  $P(d)$  的表达式为

$$P(d) = \left| r'(d) \right| \left| r' \left( d + \frac{N}{2} \right) \right| = \left| x'(d) e^{j\frac{2\pi\varepsilon}{N} \left( 2d + \frac{N}{2} - 1 \right)} \right| \left| x' \left( d + \frac{N}{2} \right) e^{j\frac{2\pi\varepsilon}{N} \left( 2d + \frac{3N}{2} - 1 \right)} \right| = \left| x'(d) \right| \left| x' \left( d + \frac{N}{2} \right) \right| \quad (9)$$

其中，

$$r'(d) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} r(d+n) r \left( d + \frac{N}{2} - n - 1 \right) \quad (10)$$

$$x'(d) = \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{4}} x(d+n)x\left(d + \frac{N}{2} - n - 1\right) \quad (11)$$

注意到，式(9)中将归一化频偏  $\varepsilon$  转换为固定的

相偏因子  $e^{\frac{j2\pi\varepsilon\left(2d+\frac{N}{2}-1\right)}{N}}$  和  $e^{\frac{j2\pi\varepsilon\left(2d+\frac{3N}{2}-1\right)}{N}}$ ，取模值后可以消除频偏对定时同步的影响。

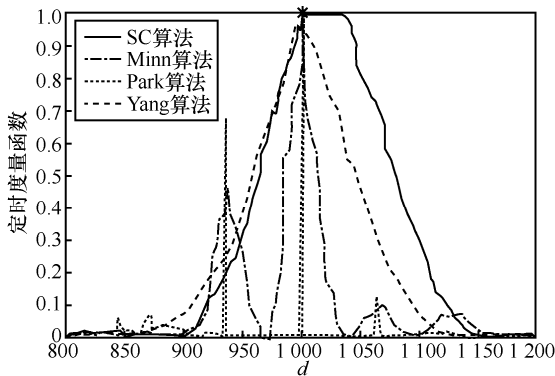
$R(d)$ 为接收到的  $N$  个样本的能量函数，表达式为

$$R(d) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} \left| r\left(d+n+\frac{N}{4}\right) \right|^2 \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} \left| r\left(d+n+\frac{3N}{4}\right) \right|^2 \quad (12)$$

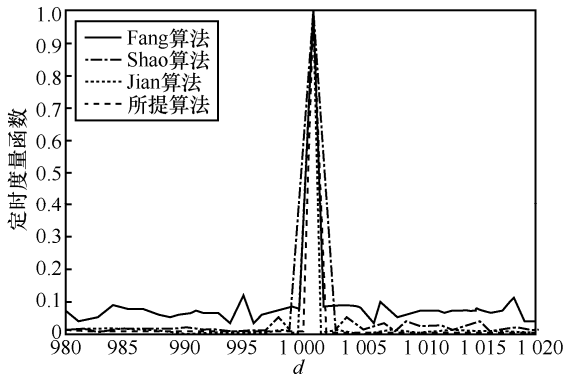
由式(8)、式(9)及式(12)可知，所提算法特殊的训练序列结构保证了定时度量函数  $M(d)$  只有在正确的起始点才有峰值，而在其他点几乎为零，并且消除了频偏对定时度量的影响，最终得到时间偏移的估计值为

$$\hat{d} = \arg \max_d (M(d)) \quad (13)$$

在不加噪声、不加频偏的理想条件下，设正确的帧头起始位置为 1 001，基于 PN 序列、CAZAC 序列的各同步算法的理想定时度量函数曲线如图 2 所示。



(a) 基于PN序列的各同步算法的理想定时度量函数曲线



(b) 基于CAZAC序列的各同步算法的理想定时度量函数曲线

图 2 各同步算法的理想定时度量函数曲线

由图 2(a)可以看出，SC 算法由于循环前缀的存在，具有平顶效应；Minn 算法、Yang 算法虽然没有平顶现象，却有较大的旁瓣存在；Park 算法峰值尖锐，但仍有较小的旁瓣存在。由图 2(b)可以看出，所提算法、Jian 算法比 Fang 算法、Shao 算法的峰值更尖锐，旁瓣更低。

因为各同步算法区别在于式(8)中  $P(d)$  及  $R(d)$  表达式不同，所以计算复杂度主要考虑  $P(d)$  及  $R(d)$  中的乘法及加法次数。各同步算法在定时同步阶段的计算量统计如表 1 所示。

表 1 各同步算法在定时同步阶段的计算量统计

算法	$P(d)$		$R(d)$		总的复数乘法	总的加法
	复数乘法/次	加法/次	复数乘法/次	加法/次		
Minn 算法	$\frac{N}{2}$	$\frac{N}{2}-1$	$\frac{N}{2}$	$\frac{N}{2}-1$	$N$	$\frac{N}{2}$
Park 算法	$\frac{N}{2}+1$	$\frac{N}{2}$	$\frac{N}{2}+1$	$\frac{N}{2}$	$N+2$	$N$
Yang 算法	$N$	$N-2$	$2N+2$	$2N-2$	$3N+2$	$3N-4$
Fang 算法	$N$	$\frac{N}{2}-1$	$N+1$	$N-1$	$2N+1$	$\frac{3N}{2}-2$
Shao 算法	$N$	$\frac{N}{2}-1$	$N+1$	$N-1$	$2N+1$	$\frac{3N}{2}-2$
Jian 算法	$\frac{N}{2}+1$	$\frac{N}{2}-2$	$\frac{N}{2}+2$	$\frac{N}{2}-1$	$N+3$	$N-3$
所提算法	$\frac{N}{2}+1$	$\frac{N}{2}-2$	$\frac{N}{2}+1$	$\frac{N}{2}-2$	$N+2$	$N-4$

$N=256$  时各同步算法在定时同步阶段的计算复杂度如图 3 所示。

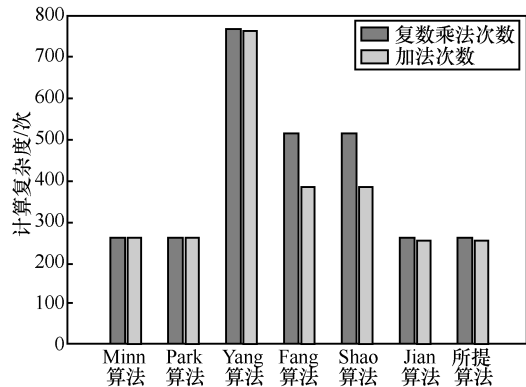


图 3  $N=256$  时各同步算法在定时同步阶段的计算复杂度

从表 1 和图 3 可以看出，在定时同步阶段，Yang 算法、Fang 算法和 Shao 算法的计算复杂度高，而所提算法总的复数乘法次数为  $N+2$  次，总的加法次数为  $N-4$  次，相比于其他算法，计算复杂度有所下降。

### 3.3 联合循环前缀的加权频率同步

通常来说, 对于 OFDM 系统, 频偏可分为整数倍频偏 (下文简称为整偏) 和小数倍频偏 (下文简称为小偏), 本文采用联合循环前缀的加权频率同步方案来提高频偏估计精度。

根据定时同步的结果, 确定接收端训练序列的起点位置, 得到接收端的训练序列, 利用接收端训练序列前后两部分的对称性, 进行第一次小偏估计。

$$\hat{\varepsilon}_{f_1} = -\frac{1}{\pi} \text{angle}(P_d) \quad (14)$$

$$P_d = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} (-1)^n r(\hat{d}+n)r^*\left(\hat{d}+n+\frac{N}{2}\right) \quad (15)$$

进一步地, 基于循环前缀进行第二次小偏估计。

$$\hat{\varepsilon}_{f_2} = -\frac{1}{2\pi} \text{angle}(\gamma_d) \quad (16)$$

$$\gamma_d = \sum_{n=0}^{N_{CP}-1} r(\hat{d}+n)r^*(\hat{d}+n+N) \quad (17)$$

由式(14)及式(16), 得到联合加权小偏估计值为

$$\hat{\varepsilon}_f = w_1 \hat{\varepsilon}_{f_1} + w_2 \hat{\varepsilon}_{f_2} \quad (18)$$

其中,  $w_1$  和  $w_2$  是与纠正小偏训练序列长度相关的权重因子, 本文选择  $w_1=0.6$ ,  $w_2=0.4$ 。

为了估计整偏, 先对接收端训练序列进行小偏补偿, 小偏补偿后仅剩整偏。接下来, 在高斯信道下分析整偏对训练序列造成的影响, 对于 3.1 节中的 CAZAC 序列  $x_{p1}(n)$ , 有

$$r(n) = x_{p1}(n)e^{\frac{j2\pi n\varepsilon_i}{N}} + w'(n) = e^{\frac{j\pi n^2}{N}} e^{\frac{j2\pi n\varepsilon_i}{N}} + w'(n) = e^{-\frac{j\pi\varepsilon_i^2}{N}} e^{\frac{j\pi(n+\varepsilon_i)^2}{N}} + w'(n) \quad (19)$$

其中,  $\varepsilon_i$  为归一化整偏,  $w'(n)$  为经过小偏补偿之后的加性白高斯噪声。

由式(19)可得,  $\varepsilon_i$  造成序列  $x_{p1}(n)$  移位, 同理可得,  $\varepsilon_i$  造成序列  $x_{p2}(n)$  反向移位,  $\varepsilon_i$  对  $x_{p1}(n)$ 、 $x_{p2}(n)$  造成的移位影响如图 4 所示。

因此, 通过与接收机本地序列进行滑动相关操作, 可以完成整偏估计。

$$\hat{\varepsilon}_i = \arg \max_g \left( |F(g)| \right) \quad (20)$$

$$F(g) = \sum_{m=0}^1 \sum_{n=0}^{\frac{N}{4}-1} \left[ \left| r_1\left(\hat{d}+n+m\frac{N}{2}\right)x_{p1}^*(n+g) \right| + \left| r_1\left(\hat{d}+n+\frac{N}{4}+m\frac{N}{2}\right)x_{p2}^*(n-g) \right| \right] \quad (21)$$

其中,  $r_1(n)$  为经过小偏补偿后的接收样本, 即

$$r_1(n) = r(n)e^{-\frac{j2\pi n\hat{\varepsilon}_f}{N}}, \quad g=0,1,2,\dots,N-1.$$

由于 CAZAC 序列的强自相关特性和零旁瓣特性, 因此整偏估计函数会产生一个反映整偏的尖峰。

综上, 得到的归一化频偏估计值为

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}_f + \hat{\varepsilon}_i \quad (22)$$

## 4 性能评估

本节仿真中, 设 OFDM 系统中子载波个数  $N=256$ , 循环前缀长度  $N_{CP}=32$ , 单个信噪比的仿真次数为 2 000 次, 由于定时同步的结果会影响后续的频率同步, 因此采用定时检测概率来描述其定时同步性能, 定时检测概率定义为正确检测到帧头的次数与蒙特卡罗仿真次数之比。

### 4.1 定时同步

#### 4.1.1 抗干扰能力

在无线通信中, 通常会出现信道噪声, 对于有用信号来说, 这种噪声便是干扰, 过大的噪声干扰会严重影响定时同步。因此, 本节在高斯信道、无频偏的条件下进行仿真, 各同步算法的定时检测概率如图 5 所示。

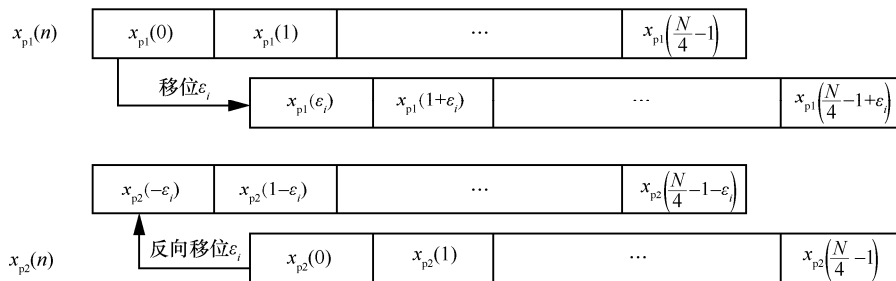


图 4  $\varepsilon_i$  对  $x_{p1}(n)$ 、 $x_{p2}(n)$  造成的移位影响

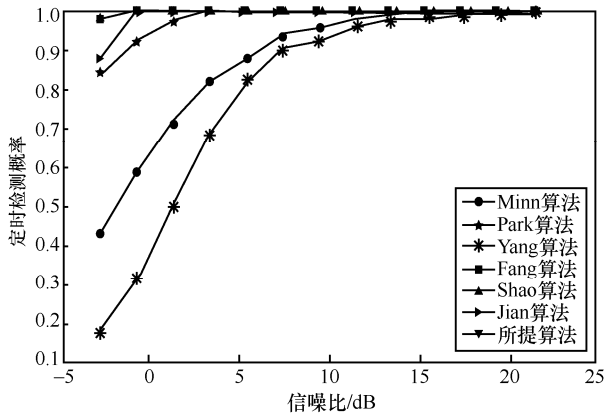


图 5 高斯信道、无频偏时各同步算法的定时检测概率

从图 5 可以看出，所提算法在低信噪比条件下定时检测性能良好，说明所提算法抗干扰能力强。

### 4.1.2 抗频偏能力

多普勒频移或振荡器的不稳定性会引入频偏，对定时同步会产生一定的影响。所以，本节在高斯信道、加入归一化频偏  $\varepsilon=5.65$  的条件下进行仿真，各同步算法的定时检测概率如图 6 所示。

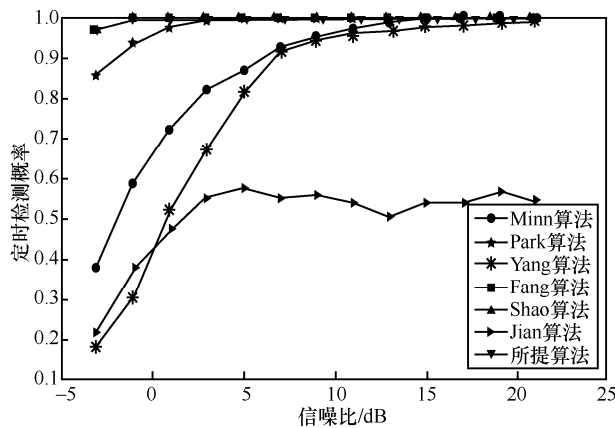


图 6 高斯信道、加入归一化频偏时各同步算法的定时检测概率

从图 6 可以看出，在有频偏时，Jian 算法定时检测概率明显下降。所提算法较 Jian 算法而言，能

消除因频偏带来的定时估计偏差的影响，仍具有良好的检测性能，说明所提算法对频偏不敏感。

### 4.1.3 抗多径能力

本节在多径衰落环境下，对各同步算法的定时性能进行了测试。多径信道采用国际电信联盟标准的经典室内 ITU-R (international telecommunication union-radiocommunicaton) 3G itur3GIBx<sup>[16]</sup>信道模型，在加入归一化频偏  $\varepsilon=5.65$  的条件下进行仿真，各同步算法的定时检测概率如图 7 所示。

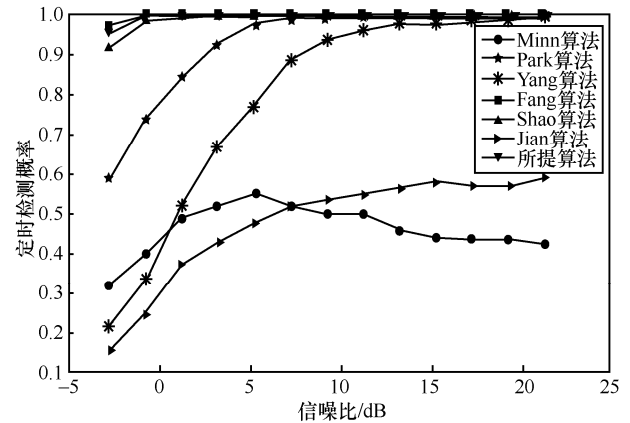


图 7 多径衰落信道加入归一化频偏时各同步算法的定时检测概率

从图 7 可以看出，在多径衰落信道、加频偏的条件下，各同步算法的定时检测概率较高斯信道均有不同程度下降，相较而言，所提算法仍具有良好的检测性能，说明所提算法抗多径能力强。

### 4.1.4 综合性能评估

各同步算法在定时同步阶段的综合性能评估如表 2 所示。

从表 2 中可以看出，所提算法的综合性能最好。

## 4.2 频率同步

在不同信道，不同信噪比条件下，设加入归一化频偏  $\varepsilon=5.65$ ，SC 算法、Fang 算法、Shao 算法以及所提算法的频偏估计均方误差 (MSE, mean

表 2 各同步算法在定时同步阶段的综合性能评估

算法	抗干扰能力	抗频偏能力	抗多径能力	计算复杂度
Minn 算法	弱	不敏感	弱	低
Park 算法	较强	不敏感	较弱	低
Yang 算法	弱	不敏感	强	高
Fang 算法	强	不敏感	强	高
Shao 算法	强	不敏感	强	高
Jian 算法	强	敏感	较弱	低
所提算法	强	不敏感	强	低

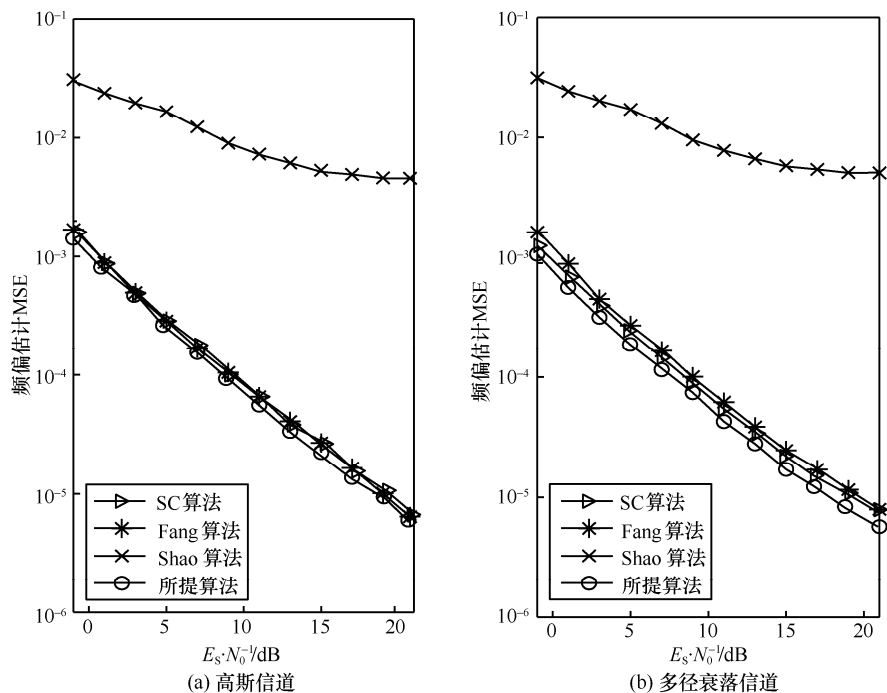


图 8 各同步算法频偏估计 MSE 性能

square error) 性能如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 在高斯信道和多径衰落信道下, 所提算法频偏估计 MSE 性能优于 SC 算法、Fang 算法及 Shao 算法。

另外, SC 算法进行频偏估计时需要利用 2 个前导序列, 而且在接收端需要进行快速傅里叶变换 (FFT, fast Fourier transform) 处理, 所提算法、Fang 算法以及 Shao 算法仅需要一个前导序列, 接收端也不需要进行 FFT 处理, 相比 SC 算法, 节约了一半的前导资源, 也减小了计算复杂度。Shao 算法在进行频偏估计时有一定的性能损失, Fang 算法在进行频偏估计时仍需要额外利用本地的加权序列, 计算复杂度较所提算法高。综上所述, 所提算法的频偏估计性能较好。

## 5 结束语

本文提出了一种基于 CAZAC 序列的低复杂度抗频偏同步算法。仿真结果表明, 在高斯信道和多径衰落信道环境下, 所提算法在进行定时同步时, 抗干扰、抗频偏、抗多径性能良好且计算复杂度低; 在进行频率同步时, 频偏估计 MSE 性能优于其他算法。需要说明的是, 所提算法针对突发通信系统, 需要突发帧结构中具备已知同步序列, 相对不需要数据辅助的盲估计算法, 虽然

性能优势明显, 但在一定程度上会牺牲系统传输效率。

## 参考文献:

- [1] STEFAN P, ERICH Z, MARKUS R. Low complexity estimation of frequency selective channels for the LTE-A uplink[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(6): 673-676.
- [2] CARLOS B B, TANELI R, MATIAS T, et al. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: challenges, solutions and measurements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(10): 4042-4054.
- [3] 唐杰, 王芳, 李明齐. DVB-T2 系统基于前导符号的同步算法[J]. 通信学报, 2017, 38(8): 94-100.  
TANG J, WANG F, LI M Q. Synchronization based on preamble symbol for DVB-T2 system[J]. Journal on Communications, 2017, 38(8): 94-100.
- [4] PENG D, WU Y. The performance evaluation of the IEEE802.11ac uplink MU-MIMO systems[C]//IEEE International Conference on Integrated Circuits and Microsystems. Piscataway: IEEE Press, 2017: 282-285.
- [5] SPETH M, FECHTEL S, FOCK G, et al. Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM part I[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(11): 1668-1677.
- [6] BEEK J V D, SANDELL M, BORJESSON P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800-1805.
- [7] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997,

45(12): 1613-1621.

- [8] MINN H, ZENG M, BHARGAVA V K. On timing offset estimation for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(7): 242-244.
- [9] PARK B, CHEON H, KANG C, et al. A novel timing estimation method for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 53-55.
- [10] YANG F, ZHANG X. An efficient symbol timing scheme for OFDM systems using optimal correlation-based circular-shifted preamble[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019: doi.org/10.1109/LWC.2019.2944154.
- [11] FANG Y, ZHANG Z, LIU G. A novel synchronization algorithm based on CAZAC sequence for OFDM systems[C]//IEEE International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-4.
- [12] SHAO H, LI Y, TAN J, et al. Robust timing and frequency synchronization based on constant amplitude zero autocorrelation sequence for OFDM systems[C]//IEEE International Conference on Communication Problem-solving. Piscataway: IEEE Press, 2014: 14-17.
- [13] JIAN D H, WU H X, GAO W, et al. A novel timing synchronization method based on CAZAC sequence for OFDM systems[C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Piscataway: IEEE Press, 2018: 10-15.
- [14] ZHANG H Y, HOU Y H, CHEN Y F, et al. Analysis of simplified frame synchronization scheme for burst-mode multi-carrier system[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(6): 1054-1056.
- [15] CHANG K, LEE S. Robust OFDM-based synchronization against very high fractional CFO and time-varying fading[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3):4047-4058.
- [16] BYOUNG H K, DEOK S K, CHEOL S K. Effects of smart antenna in wideband multipath channel[C]//IEEE International Conference on ATM. Piscataway: IEEE Press, 2001: 200-203.

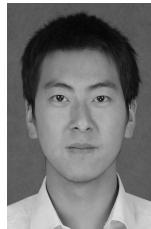
#### [作者简介]



宫丰奎（1979- ），男，山东潍坊人，博士，西安电子科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为新一代无线通信关键技术。



文妮（1996- ），女，湖南娄底人，西安电子科技大学硕士生，主要研究方向为多载波系统、物理层可靠传输。



李果（1989- ），男，陕西城固人，博士，西安电子科技大学讲师，主要研究方向为大规模 MIMO 系统、协作通信。



高洋（1983- ），男，陕西延安人，博士，西安电子科技大学讲师，主要研究方向为复杂信道环境下的高效高可靠通信传输技术。