

基于 CAZAC 序列的互相关同步算法

李晓辉, 马丹丹, 石明利, 吕思婷

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 西安, 710071)

摘要 针对航空通信中的多径衰落以及多普勒扩展造成定时同步算法对频偏敏感以及在低信噪比条件下定时同步性能较差的问题, 提出一种使用恒包络零自相关(CAZAC)序列的时频同步算法。使用 CAZAC 序列生成具有共轭对称特征的前导序列, 其次基于前导序列的结构特征, 采用互相关累加峰值的定时度量函数, 将正确定时位置处的相关值用于估计小数倍频偏, 最后利用一对相同的 CAZAC 序列完成第 2 次小数倍频偏估计。仿真结果表明, 当正确检测概率达到 100% 时, 改进算法的性能提升 3 dB。

关键词 航空通信; CAZAC 序列; 定时同步; 频偏估计

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.04.010

中图分类号 TN911.23 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)04-0082-07

A Cross Correlation Synchronization Algorithm Based on CAZAC Sequence

LI Xiaohui, MA Dandan, SHI Mingli, LYU Siting

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

Abstract Aimed at the problems that timing synchronization algorithm is sensitive to frequency offset caused by multipath fading and Doppler spread in aviation communication, and is relatively poor in performance under condition of low signal-to-noise ratio, a synchronization algorithm is proposed by using constant envelope zero autocorrelation (CAZAC). A leading sequence with conjugate symmetry features is designed by using CAZAC sequences, and based on the structural features of the leading sequence, the cross-correlation is utilized for designing a timing metric function for accumulating peaks. The correlation value at the correct timing position is used to estimate the decimal frequency offset, and lastly, a pair of identical CAZAC sequences is used to complete the second decimal frequency offset estimation. The simulation results show that when the correct detection probability reaches 100%, the performance of the improved algorithm improves by 3 dB.

Key words aviation communication; CAZAC sequence; timing synchronization; frequency deviation estimation

在航空通信中, 现有的航空通信系统已经不能满足航空通信对通信容量的需求。国际民航组织提出了 L 波段数字航空通信系统 1 (L-band digital

aeronautical communications system 1, L-DACS1)。LDACS1 采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术。OFDM 通信

收稿日期: 2024-05-31

作者简介: 李晓辉(1972—), 女, 河北衡水人, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带无线通信。E-mail: xhli@mail.xidian.edu.cn

引用格式: 李晓辉, 马丹丹, 石明利, 等. 基于 CAZAC 序列的互相关同步算法[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(4): 82-88. LI Xiaohui, MA Dandan, SHI Mingli, et al. A Cross Correlation Synchronization Algorithm Based on CAZAC Sequence[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(4): 82-88.

系统带外功率和峰均比(peak to average power ratio, PAPR)较高,对频率偏移敏感。而航空通信的特殊应用场景与信道特点决定了航空通信系统需要具备低的 PAPR 特性并且能够适应高频偏的信道^[1-3]。在航空通信场景,卫星通信系统失效时,散射通信是超视距远程控制的一种方式。收发两端的相对运动会使接收信号产生时变的多普勒频移,且散射信道存在严重相位畸变和多径时延,因此,如何实现精确可靠且高速率的数据传输成为最大的技术难点。由于 OFDM 系统对频偏敏感且受多径衰落影响,使得接收信号在多径衰落环境下定时同步位置出现误差,频偏估计的难度有所增加^[3-4]。

航空通信场景下,OFDM 系统常用基于前导序列的同步方法。前导序列由一些相关性能良好的序列构成^[4]。S&C 算法在 OFDM 符号前加入 2 个伪噪声 PN(pseudo noise)训练序列,其定时度量函数存在明显的平台效应,定时精度较差。而 Minn 等^[5]改进了 PN 序列的结构,明显的消除了平台效应,但定时度量函数中存有多余旁瓣。为进一步消除旁瓣现象, Park 等^[6]提出序列结构由两部分组成,后一部分序列是前一部分序列的共轭对称序列,该算法的定时度量函数呈现出尖锐的峰值,但仍然存在 2 个比较大的局部峰值^[7-8]。文献[7~12]均由 CAZAC 序列构造一种新型前导序列,利用相关特性设计定时度量函数,减小副瓣的幅值,从而保证时序同步性能。文献[13~14]重点研究了 CAZAC 序列和巴克码、格雷互补序列结合生成新序列。文献[15]采用 PN 序列设计了近似加法器的互相关同步实现方法。文献[16]在帧同步信息前增加了 PN 序列用于辅助判决,能够提高衰落信道下的信号起点捕获概率。

基于时域相关的同步算法一般对频偏较为敏感,频偏的存在会造成相关峰能量损失。文献[17]设计了一种多模块时频同步算法。采用二次差分运算消除了定时同步算法对大频率偏差的敏感性和整数倍频偏差估计算法对同步误差的敏感性。文献[18]采用两步时间同步,利用已知的先验导频信号,对空间分离后的频偏进行残差 CFO 估计和补偿,进一步细化频偏。文献[19]提出使用时频域的相位偏移的关系,对频偏进行校正。文献[20]提出的时间同步方法在高时延扩展的多径信道上也能正常工作,工作原理是从平均值中减去自相关结果。

文献[8]和文献[9]的前导序列均采用共轭对称序列,为了抑制侧瓣并获得更清晰的峰值,所提出的时序度量函数设计为 2 个独立的时序度量函数的乘积,由于采用自相关,在信噪比较低时,前导序列的相关性大幅降低,影响定时同步性能。而文献[10]采用累积相关峰值的互相关同步算法,正确定时概率性能有较大提升,但采用多组 CAZAC 序列,既增加同步开销又无法出现唯一峰值。

针对 OFDM 通信系统下要求低峰均比特性和信号对频偏敏感的问题,提出采用互相关的时频同步算法。首先使用 CAZAC 序列组成具有共轭对称结构的前导序列,采用累加互相关峰值的算法进行定时同步,将同步过程中获得的相关峰值用于第 1 次小数倍频率偏移估计,使用一对相同 CAZAC 序列完成第 2 次小数倍频率偏移估计。

1 OFDM 系统模型

本文针对 OFDM 通信系统的时频同步算法进行研究,基于前导序列实现同步的系统模型如图 1 所示。

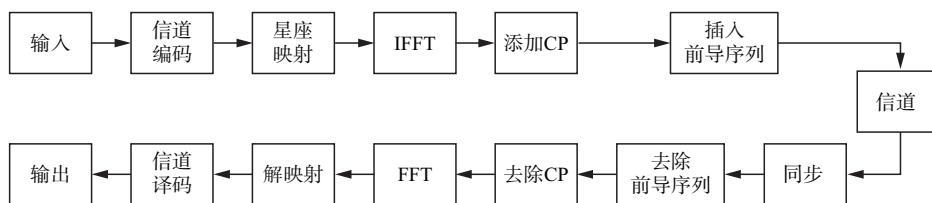


图1 系统模型

Fig. 1 System model

OFDM 发送信号为:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp(j2\pi f_k t) \quad (1)$$

式中: f_k 为一组正交子载波; N 为 FFT 点数; X_k 为第 k 个子载波调制数据, $k=0,1,\dots,N-1$ 。

对上述信号进行采样, 1 个 OFDM 符号的周期为 T_s , N 个符号的传输时间为 $T=NT_s$, $t=nN/T$, 得到的信号为:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right), n = 0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

信号经过信道传输后,受到噪声、频偏以及多径的影响,接收到的信号可以表示为:

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l x(n-d-\tau_l) e^{\frac{j2\pi \epsilon n}{N}} + \omega(n), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (3)$$

式中: d 为符号定时偏移; L 为路径数目; h_l 和 τ_l 分

别为第 l 条路径对应的复信道衰减和时延; ϵ 为归一化的载波频偏; $\omega(n)$ 为高斯白噪声。

2 时频同步算法

2.1 前导序列设计

同步序列的选择是基于相关的同步算法的关键环节。ZC (Zadoff-Chu) 序列是 CAZAC 序列的一种, 其序列长度不受限制, 且自相关性良好, 循环移位完全正交, 同时具备恒包络和峰均比低的特性, 在 OFDM 通信系统中可行性较高。ZC 序列的生成表达式和相关函数可参见文献[9], 此处不再赘述。

本节利用 ZC 序列设计前导序列结构用于后续的同步。如图 2 所示, 前导序列由循环前缀和 4 个 ZC 序列组成, 其中, CP 为循环前缀, 是将 $C_3(n)$ 序列的后 N_G 个样本复制到序列的前端。ZC 序列长度均为 $N/2$ 。

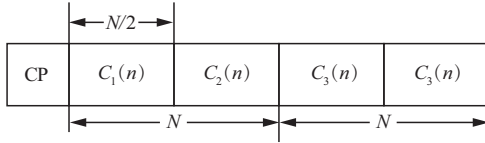


图 2 前导序列结构

Fig. 2 Leader sequence structure

定义序列 $C_1(n)$ 的表达式为:

$$C_1(n) = \exp(2j\pi n^2/N) \quad (4)$$

序列 $C_2(n)$ 为序列 $C_1(n)$ 的共轭对称序列。其表达式为:

$$C_2(n) = C_1^* \left(\frac{N}{2} - n - 1 \right) \quad (5)$$

序列 $C_3(n)$ 为与序列 $C_1(n)$ 的根因子不同的 ZC 序列, 其表达式为:

$$C_3(n) = \exp(7j\pi n^2/N) \quad (6)$$

从文献[19]可知, 相关函数的取值与归一化频偏有关。当系统存在频偏时, 序列分段累加的相关值比整段互相关的相关值要大, 虽能降低频偏的干扰, 但相应的抗噪性能更差。由于多径衰落环境恶劣, 因此本文采用一对共轭对称序列完成定时同步。

2.2 定时同步算法

为了更加容易地识别最大峰值以及进一步缩小定时位置前后部分的数据相关性, 采用一对共轭对称序列完成定时同步。接收端信号与发射端前导序列作相关, 利用共轭对称序列互相关值为 0 设计定时度量函数, 并对序列相关结果进行累加, 使得只有在定时准确位置处出现唯一峰值。定时度量函数为接收信号相关函数与能量函数的比值, 其表达式为:

$$M(d) = \frac{|P(d)|^2}{R^2(d)} \quad (7)$$

式中: $P(d)$ 为相关函数。 $P(d)$ 的表达式为:

$$P(d) = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=(m-1)L}^{mL-1} y(n+d)C^* = \sum_{n=0}^{L-1} y(n+d)C_1^* + \sum_{n=L}^{2*L-1} y(n+d)C_2^* \quad (8)$$

式中: $y(d)$ 为接收信号; C^* 为求发射端前导序列的共轭; M 为相关的段数; N_c 为每段 ZC 序列的长度。

$R(d)$ 为接收信号的能量函数, 其表达式为:

$$R(d) = \sum_{n=0}^{N-1} |y(n+d)|^2 \quad (9)$$

当 $M(d)$ 取到最大值时, $\hat{d}$ 为所得的定时点, 即:

$$\hat{d} = \underset{d}{\operatorname{argmax}}(M(d)) \quad (10)$$

定时同步算法中相关值的计算使得序列中的对称共轭关系在累加过程中起加权的作用, 使得相邻的相关值结果存在较大差异, 定时度量函数能够在定时同步位置形成尖锐的峰值。

式(8)和式(9)表达式的不同即为各同步算法的区别, 对文献[4]和文献[21]以及本文算法计算复杂度, 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 计算复杂度分析

Tab. 1 Calculation complexity analysis

算法	$P(d)$		$R(d)$	
	复数乘法/次	加法/次	复数乘法/次	加法/次
文献[4]	$N/2+1$	$N/2-2$	$N/2+1$	$N/2-2$
文献[19]	N	N	N	$N-1$
本文	N	N	N	$N-1$

由表 1 可以看出, 文献[4]算法复杂度较低, 文献[21]算法和本文算法的计算复杂度相同, 复数乘法次数接近文献[4]算法的 2 倍。

2.3 频率同步算法

本文 OFDM 系统中, 假定一段时间内频率偏移基本不会发生变化, 采用最大似然的方法进行频偏估计。

前文利用定时同步得出的时域相关最大值, 计算第 1 次频偏, 并根据频偏估计值对当前帧全部数据进行频偏补偿。当不考虑噪声影响时:

$$P_1(\hat{d})P_2^*(\hat{d}) = \left(\sum_{n=0}^{L-1} y(n+d)C_1^* \right) \left(\sum_{n=L}^{2L-1} y(n+d)C_2^* \right)^* = \frac{N^2}{4} \sum_{n=0}^{L-1} \exp(j2\pi n\epsilon/N) \exp(-j2\pi(n + \frac{N}{2})\epsilon/N) = \frac{N^2}{4} \exp(-j\pi\epsilon) \quad (11)$$

$$\hat{\epsilon}_1 = -\frac{1}{\pi} \angle(P_1(\hat{d})P_2^*(\hat{d})) \quad (12)$$

使用定时同步的相关峰值对频偏进行第 1 次补偿后,还会有残余的频偏未校正,基于前后 2 段相同的 ZC 序列进行第 2 次频偏估计:

$$P_3(\hat{d}) = \sum_{n=0}^{N/2} y(n + \hat{d} + N)y^*\left(n + \hat{d} + \frac{3N}{2}\right) \quad (13)$$

$$\hat{\epsilon}_2 = -\frac{1}{\pi} \angle(P_3(\hat{d})) \quad (14)$$

由式(12)及式(14)得到频偏估计值为:

$$\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}_1 + \hat{\epsilon}_2 \quad (15)$$

利用得到的归一化频偏估计值进行频偏补偿:

$$y^e(n) = y(n) \exp\left(-\frac{j2\pi\hat{\epsilon}n}{N}\right) \quad (16)$$

3 实验结果与分析

本系统的带宽设置为 20 MHz,最大时延扩展为 0.5 μ s,设置 $N=512$, $N_G=32$,FFT 长度为 512。单个信噪比的仿真次数为 1 000 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仿真次数之比。

散射信号采用抽头延迟线结构模拟时,服从瑞利衰落分布。2 种不同信道模型^[22]参数设置如表 2 所示,信道模型 1 为考虑通信距离大于 150 km 的场景,信道模型 2 为考虑距离小于 150 km 的场景。在通信距离为 0~300 km,收发端相对静止时,多普勒频移为 0~100 Hz,初始选取 50 Hz。移动场景下多普勒频移最大为 30 kHz^[3]。

表 2 多径信道参数

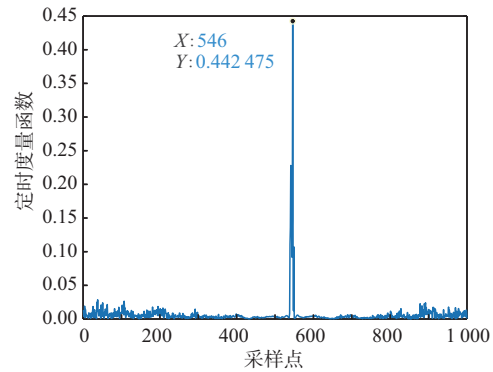
Tab. 2 Multipath channel parameters

径数	多径信道模型 1		多径信道模型 2	
	功率衰减/dB	时延/ μ s	功率衰减/dB	时延/ μ s
1	-10	0.000	-6	0.000
2	-3	0.083	0	0.075
3	0	0.170	-4	0.150
4	-2	0.250		
5	-5	0.330		
6	-8	0.420		
7	-10	0.500		

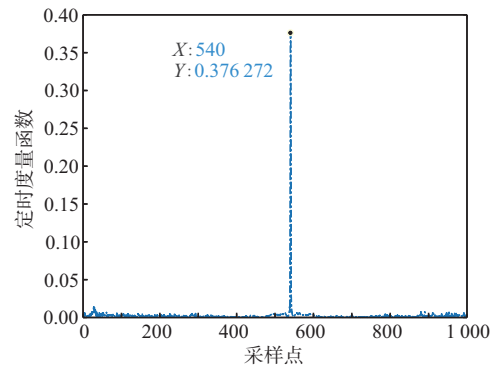
3.1 定时度量函数曲线

在通信信道条件下,设正确的帧头起始位置为

533,根据循环前缀以及最大多径时延扩展,将定时符号偏差设置为 20 个采样点。基于 ZC 序列的同步算法在 2 种信道下的定时度量函数曲线如图 3 所示。



(a) 多径信道模型 1



(b) 多径信道模型 2

图 3 基于 ZC 序列的算法定时度量函数曲线

Fig. 3 Timing metric function curve of algorithm based on ZC sequence

从图 3 可以看出,相关峰值的位置与理想定时同步位置相比,均产生一定偏移,所提算法在加入信道模型 2 干扰的情况下,没有副峰干扰。在信道模型 1 下,由于多径干扰严重可能检测到非主径,出现副峰影响了定时度量函数的判断。系统中加入了循环前缀防止符号间干扰,当定时同步估计位置与理想定时同步位置的偏差在设定的检测范围内时,表示正确检测到帧头。

3.2 抗多径能力

定时同步算法中,ZC 序列长度对同步的性能有重大影响,序列长度过小,会无法得到准确的定时同步位置,序列长度过大,则同步开销过大,对系统整体性能造成影响。

从图 4 可以看出,信噪比相同时,随着序列长度增加,算法定时检测概率不断上升,并趋于平稳。其中,检测概率约为 0.8,4 种序列长度的算法对应的信噪比分别为 -15 dB、-12 dB、-9 dB、-5 dB。检测概率最先到达 1 的信噪比分别为 -10 dB、-8 dB、-4 dB、2 dB。可以看出前导序列长度的选

取与定时检测性能相关,本文中考虑前导序列同步开销和同步性能,仿真均选取 $N=512$ 。

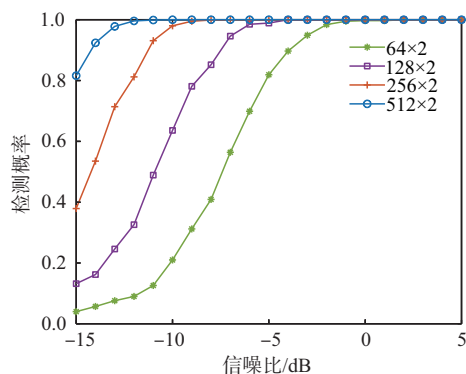


图4 信道模型1下不同序列长度的定时检测概率

Fig. 4 Timing detection probabilities of different sequence lengths under channel model 1

在多条衰落信道的信噪比为 $-15 \sim 5$ dB时分别对TST算法^[4]、基于ZC序列的同步算法^[21]和本文提出的定时同步算法的定时同步算法进行仿真,在前导序列长度相同的情况下得到的3种算法的定时检测概率如图5所示。

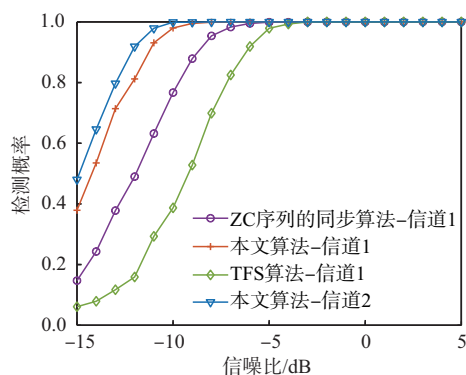


图5 不同算法的定时检测概率

Fig. 5 Timing detection probabilities of different algorithms

从图5可以看出,在信道模型1的情况下,TFS算法和基于ZC序列的同步算法的定时检测概率在低信噪比时低于本文算法。检测概率最先到达1的信噪比分别为 -8 dB、 -5 dB、 -3 dB。可以看出本文所提算法在前导序列相同的情况下,定时同步性能优于前2种算法。并且本文所提算法在信道模型2的性能比信道模型1下略有提升,低信噪比条件下,检测概率相差约1 dB。

3.3 抗频偏能力

OFDM系统中,多普勒频移和收发两端采样频率不同会引入频偏,对定时同步会产生一定的影响。在信道模型1中加入的最大多普勒频移分别为1 kHz、10 kHz和30 kHz的条件下进行仿真,同步算法的定时检测概率如图6所示。

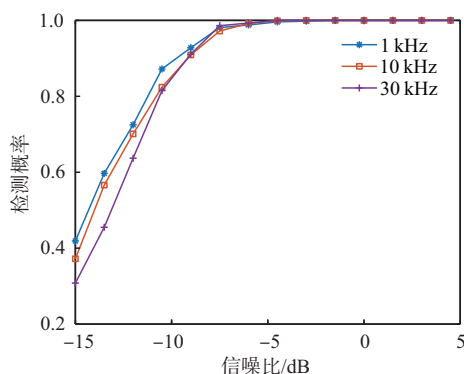


图6 信道模型1加入不同多普勒频移的定时检测概率

Fig. 6 Timing detection probability of channel model 1 with different Doppler frequency shifts added

从图6可以看出,所提算法在加入不同多普勒频移后,在低信噪比时,最大多普勒频移越大,定时检测概率越低。信噪比为 -15 dB时,三者定时检测概率分别相差0.04和0.07。在信噪比大于 -5 dB时,定时检测概率相同。因此说明所提算法抗频偏性能良好。

在信道模型1加入归一化频偏 $\epsilon=0.3$ 和 $\epsilon=0.7$ 的条件下进行仿真,同步算法的定时检测概率如图7所示。

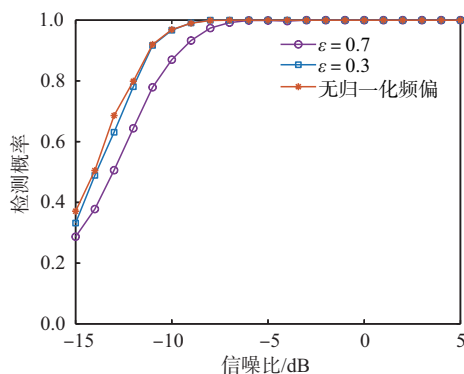


图7 信道模型1加入不同归一化频偏的定时检测概率

Fig. 7 Timing detection probability with different normalized frequency offsets added to channel model 1

从图7可以看出,所提算法在加入 $\epsilon=0.3$ 的归一化频偏后,在低信噪比时,定时检测概率比未加入频偏时的稍低,在较高信噪比时,定时检测概率相同。加入 $\epsilon=0.7$ 归一化频偏时,低信噪比情况下,信噪比相同,定时检测概率相比加入 $\epsilon=0.3$ 时低,但当信噪比为 -6 dB时,检测概率已经与其他2种相同。因此,说明所提算法抗频偏性能良好。

在不同信噪比条件下,设加入归一化频偏 $\epsilon=0.3$,比较一次频偏估计算法和二次频偏估计算法,算法的频偏估计均方误差(mean square error, MSE)性能如图8所示。

从图8可以看出,当第2次频偏估计的序列长

度为 256 时,二次频偏估计算法加入归一化频偏后,当大于低信噪比 -8 dB 时,优于一次迭代频偏算法,当信噪比为 7 dB 时,MSE 达到 10^{-4} 。第 2 次频偏估计的序列长度为 512 时,二次频偏估计算法在信噪比为 8 dB 时,MSE 达到 10^{-5} 。一次频偏估计算法在较高信噪比时,均方误差趋于平稳。二次频偏估计算法虽然增加了前导序列长度,但频偏估计性能显著提升,因此,需要根据系统需求,在同步开销和性能之间权衡。

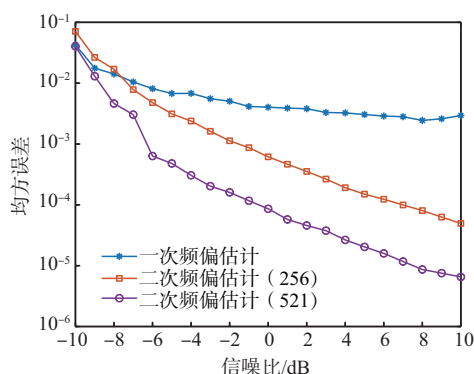


图8 信道模型 1 下不同频偏算法的均方误差曲线

Fig. 8 Mean square error curves of different frequency offset algorithms under channel model 1

4 结语

为了解决在航空通信中多径衰落条件下定时同步性能较差以及 OFDM 系统对频偏敏感的问题,提出一种改进时频同步算法。使用具有共轭对称特征的前导序列,采用互相关累加峰值算法,获得正确定时位置,将正确定时位置处的相关值用于估计小数倍频偏,最后利用一对相同的序列完成第 2 次小数倍频偏估计。仿真结果表明,所提算法在进行同步时,抗多径、抗频偏性能良好。使用 ZC 序列可以有效克服多径衰落影响,并且在低信噪比环境中,依然可以保证定时同步位置的检测概率。二次频偏估计算法也使得频偏估计的均方误差有显著提升。

参考文献

[1] ZAISBERGER M, ARTHABE H. Bit Error Rate Validation for Aeronautical Communication System LDACS for Higher Modulation Schemes[C]//2021 31st International Conference Radioelektronika, Brno: IEEE, 2021.

[2] MIELKE D M, GRÄUPL T, GÜRBÜZ A. Impact of Pilot Jamming Attacks on Digital Aeronautical Data Communications[C]//2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Antonio, TX: IEEE, 2021: 9594335.

[3] 陈立. 地空宽带 OFDM 系统下的同步算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

CHEN L. Research on Synchronization Algorithm in Ground to Air Broadband OFDM System[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)

[4] 王妍. 基于前导序列的 OFDM 系统时频联合同步算法研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2024.

WANG Y. Research on Time-Frequency Joint Synchronization Algorithm for OFDM System Based on Preamble Sequence[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)

[5] MINN H, ZENG M, BHARGAVA V K. On Timing Offset Estimation for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(7): 242-244.

[6] 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.

[7] 侯卫民, 王妍, 侯艳丽. 低信噪比环境下一种 OFDM 抗频偏定时同步算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 148-153.

HOU W M, WANG Y, HOU Y L. An OFDM Anti Frequency Offset Timing Synchronization Algorithm under Low Signal-to-Noise Ratio Environment[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 148-153. (in Chinese)

[8] 宫丰奎, 文妮, 李果, 等. 基于 CAZAC 序列的低复杂度抗频偏同步算法[J]. 通信学报, 2021(2): 64-71.

GONG F K, WEN N, LI G, et al. Low Complexity Anti Frequency Offset Synchronization Algorithm Based on CAZAC Sequence[J]. Journal of Communications, 2021(2): 64-71. (in Chinese)

[9] SHI J Z, DU X W, LIU S, et al. Joint Timing and Frequency Synchronization for Coherent Optical SEFDM Systems[C]//2023 Asia Communications and Photonics Conference, Wuhan: IEEE, 2023: 10369081.

[10] PENG G, LI R, HE Y S, et al. Timing and Frequency Synchronization Using CAZAC Sequences for OFDM Systems[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3168-3189.

[11] YANG C, WANG L, PENG C, et al. A Robust Time-Frequency Synchronization Method for Underwater Acoustic OFDM Communication Systems[J]. IEEE Access, 2024, 12: 21908-21920.

[12] BLUMENSTEIN J, BOBULA M. Fine Time Synchronization and Residual ISI Influence in SC-FDE Systems[J]. International Journal of Electronics & Communications, 2020, 117: 153097-153102.

[13] TIAN L Y, MA Y, LEI W M. A Direct Construction of ZCZ Sequences With Low Peak-to-Average Power Ratio[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(2): 273-277.

[14] BADRAN E F, SAMARA M, ISMAIL N E. Carrier

- Frequency Offset Estimation for MIMO Single-Carrier FDMA System in Wireless Communication[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(9): 6907-6917.
- [15] 付博炜, 李明齐. 基于 PN 序列互相关同步低复杂度实现方法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 237-240.
- FU B W, LI M Q. Low Complexity Implementation Method Based on PN Sequence Cross-Correlation Synchronization[J]. Computer Simulation, 2021, 38(10): 237-240. (in Chinese)
- [16] 吕子豪, 张涛, 任文成. 一种适用于散射通信的联合帧同步和频偏估计算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 185-191.
- LÜ Z H, ZHANG T, REN W C. Research on a Joint Frame Synchronization and Frequency Offset Estimation Algorithm for Scattering Communication [J]. Computer Measurement and Control, 2024, 32(1): 185-191. (in Chinese)
- [17] ZHANG J, LIU Y. Research of Time-Frequency Synchronization Technology Based on OFDM System [C]//2023 4th International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCE-IC). Nanjing: IEEE, 2023: 538-541.
- [18] KAVADI R, GANGAPATNAM V B, SWAMI-NATHAN M. Design and Evaluation of Space-Time Coded Multiple Input Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing Physical Layer[J]. International Journal of Communication Systems, 2023, 37: 5645-5657.
- [19] RANDY L D, SEBASTIÁN B P J, ENRIQUE S M H. Time Synchronization Technique Hardware Implementation for OFDM Systems with Hermitian Symmetry for VLC Applications[J]. IEEE Access, 2023, 11: 42222-42233.
- [20] SUYOTO S, SUGIHARTONO S, ISKANDAR I, et al. Robust Time Synchronization for NC-OFDM Cognitive Radio Systems[J]. Computer and Information Sciences, 2021, 34: 5734-5745.
- [21] 郑小敏. 基于 SC-FDE 的矿井无线通信系统设计与 SDR 实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- ZHENG X M. Design and SDR Implementation of Mine Wireless Communication System Based on SC-FDE[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [22] 张涛, 刘莹, 孙柏昶, 等. 对流层散射通信及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- ZHANG T, LIU Y, SUN B C, et al. Tropospheric Scattering Communication and Its Applications[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2020. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

(上接第 81 页)

- [17] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- CUI X X. Multiobjective Evolutionary Algorithms and Their Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [18] SALOMON R. Evolutionary Algorithms and Gradient Search: Similarities and Differences[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1998, 2(2): 45-55.
- [19] 刘皓阳, 祁荣宾. 基于进化梯度搜索的多目标混合优化算法[J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(11): 1197-1202.
- LIU H Y, QI R B. Multi-Objective Hybrid Optimization Algorithm Based on Evolutionary Gradient Search [J]. Computers and Applied Chemistry, 2016, 33(11): 1197-1202. (in Chinese)
- [20] 郭娇娇, 刘明雍, 刘坤, 等. 基于进化梯度搜索的 AUV 地磁仿生导航研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(5): 865-870.
- GUO J J, LIU M Y, LIU K, et al. Research of Bio-Inspired Geomagnetic Navigation for AUV Based on Evolutionary Gradient Search[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(5): 865-870. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)