第 46 卷 第 4 期
2019 年 4 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 46, No. 4
April, 2019

基于恒幅零自相关序列的相干光正交频分复用系统定时同步算法

许彦朋[1,2], 刘剑飞[1,2*], 曾祥烨[1,2], 卢嘉[1,2], 吴雪琪[1,2]

[1]河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401;

[2]天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401

摘要 提出了一种基于恒幅零自相关(CAZAC)序列的定时同步算法。该算法的 CAZAC 训练序列由 4 部分构成,分为 6 个定时窗口,利用序列的共轭对称和偶对称特性进行相关运算,通过 6 个窗口相乘得到定时度量函数。仿真结果表明,利用所提算法可获得具有唯一脉冲状峰值的定时度量函数曲线,消除了定时平台以及旁瓣干扰。同时,在信噪比和色散较大的变化范围内,所提算法仍具有较好的定时稳定性。

关键词 光通信; 光纤通信; 相干光正交频分复用; 定时同步; 恒幅零自相关序列

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201946.0406002

Timing Synchronization Algorithm of Coherent Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing System Based on Constant Amplitude Zero Auto-Correlation Sequences

Xu Yanpeng[1,2], Liu Jianfei[1,2*], Zeng Xiangye[1,2], Lu Jia[1,2], Wu Xueqi[1,2]

[1]*School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401, *China*;

[2]*Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, Tianjin* 300401, *China*

Abstract A novel timing synchronization algorithm is proposed based on constant amplitude zero auto-correlation (CAZAC) sequence. In the proposed algorithm, the training sequence consists of four CAZAC sequences, which are divided into six timing windows. The correlation operation is carried out by use of the characteristics of conjugate symmetry and even symmetry of the sequences, and the timing metric function is obtained by multiplying these six timing windows. The simulation results show that the proposed algorithm can be used to obtain the timing metric function curve with the unique pulse peak and eliminate the disturbance of timing plateaus and side lobes. Meanwhile, the proposed algorithm has good timing stability within a large range of optical signal-to-noise ratio and chromatic dispersion.

Key words optical communications; optical fiber communications; coherent optical orthogonal frequency division multiplexing; timing synchronization; constant amplitude zero auto-correlation sequence

OCIS codes 060.1660; 060.2330

1 引 言

相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统的接收灵敏度高,频谱效率高,且调制方式灵活,可以同时抑制色度色散(CD)与偏振膜色散(PMD),在光通信领域受到了广泛关注。CO-OFDM 技术存在易受频偏的影响和对定时误差敏感的缺陷,因此准确的定时同步是实现 CO-OFDM 系统关键的技术[1]。基于伪随机噪声(PN)序列的 Schmidl&Cox 算法是一种典型的定时同步算法[2],它利用训练符号的自相关特性完成定时同步,但循环前缀会使定时度量存在一个峰值平台区域,造成定时模糊。为了消除

收稿日期: 2019-01-07; **修回日期**: 2019-01-15; **录用日期**: 2019-01-22

基金项目: 天津市自然科学基金(15JCYBJC17000)、河北省教育厅基金重点项目(ZD2017021)

* **E-mail**: jfliu@hebut.edu.cn

峰值平台，Minn 等[3]重新设计了训练序列的结构，将训练序列分为 4 部分，利用符号的差异性消除定时平台，但定时度量还存在较大的旁瓣以及多峰的干扰。在此基础上，Park 等[4]利用序列的共轭对称关系提出了一种改进算法（下文称 Park 算法），消除了峰值平台及多峰的干扰，进一步提高了定时精度。但是 Park 算法的定时度量存在一个较大的副峰，仍会造成定时模糊。黄雨莎等[5]采用 PN 序列加权的方法消除了 Park 算法的副峰，但是该算法在光纤色散信道中对色散较为敏感，当色散较大时，算法的定时效果受到严重影响。此外，传统的定时同步算法采用复 PN 序列作为训练序列，存在较高的峰值平均功率比（PAPR），高 PAPR 导致 OFDM 信号在传输过程中更易受到系统中非线性器件的影响，引起信号失真，降低系统性能[6-7]。而恒幅零自相关（CAZAC）序列具有恒包络、理想的自相关特性及良好的互相关特性等优点[8]，在同步算法的研究中受到广泛关注[9-11]。Wang 等[9]针对偏分复用相干光正交频分复用（PDM-CO-OFDM）系统，用 CAZAC 序列构成与 Minn、Park 算法结构相同的训练序列，并通过 PN 加权完成同步。Silva 等[10]提出一种改进的序列作为加权因子对 CAZAC 进行加权，进而提高了 OFDM 系统的定时同步精度。Ren 等[11]为了提高传统算法的定时性能，提出了一种基于 PN 序列加权 Zadoff-Chu 序列的同步算法，虽然解决了传统算法存在的一些问题，但是加权会增加算法的复杂度，增大系统开销。

本文针对基于 PN 序列的定时同步算法存在的定时同步问题，提出了一种新的基于 CAZAC 序列的定时同步算法，并在 CO-OFDM 系统中进行仿真，从定时度量函数、不同信噪比下的定时峰值均值和方差以及在不同色散参数下的定时效果这几个方面综合分析算法的性能。

2　CO-OFDM 系统及其同步问题

图 1 为 CO-OFDM 系统的传输结构框图。如图 1 所示，对系统输入端输入的高速数据信号进行串/并转换（S/P），使其变成多路低速并行数据信号，然后将其映射成二维复信号，利用傅里叶逆变换运算（IFFT）把信号从频域变换到时域，再插入用来实现同步的训练序列，然后插入循环前缀（CP），从而形成一个 OFDM 信号。完成数模转换（DAC）后，通过光的同相/正交（I/Q）调制器把信号调制到光载波上，使其在光纤中传输。接收端采用本地振荡器（LD）及光电二极管（PD）进行相干解调，将解调后的光信号变换成电信号，经过低通滤波器（LPF）、模数转换器（ADC）和符号定时同步后，找到傅里叶变换（FFT）窗口的位置，最后再经过 FFT 和数字信号处理恢复出输入的原始信号。

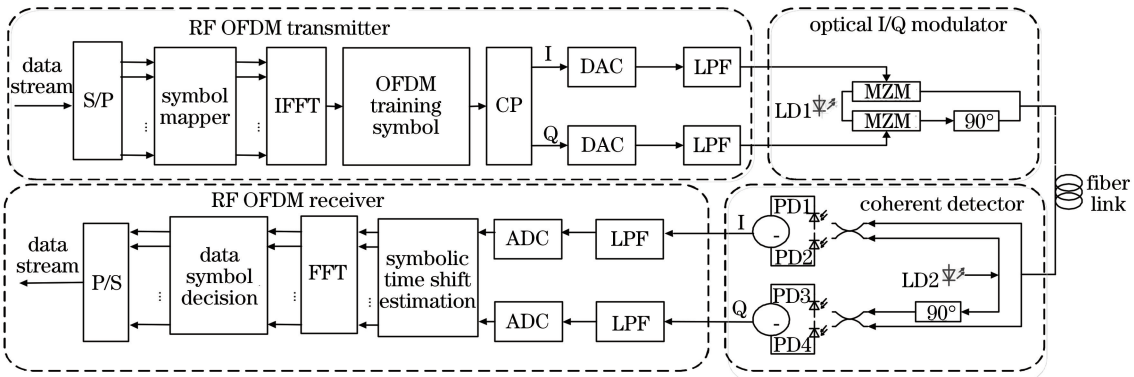

图 1　CO-OFDM 系统的结构框图

Fig. 1　Structural diagram of CO-OFDM system

如前所述，接收端在 FFT 之前必须进行符号定时同步，以确定 FFT 窗口的正确位置。系统中存在的色散、非线性及噪声等干扰会对定时同步产生影响，导致符号间干扰（ISI）和载波间干扰（ICI），严重影响系统性能。因此，CO-OFDM 系统的定时同步是实现该系统的关键技术之一。基于训练序列的同步方法利用序列的自相关性来实现同步，具有同步精度高、快速准确的特点，且实现相对简单。

3　基于 CAZAC 序列的定时同步算法

3.1　CAZAC 序列

CAZAC 序列的全称为恒幅零自相关序列，采用的是 CAZAC 序列中最常用的 Zadoff-Chu 序列，定义如下[8]：

$$c(k)=\begin{cases}\exp[\mathrm{j}\pi rk(k+1)/N], & N \text{ is odd}\\ \exp(\mathrm{j}\pi rk^2/N), & N \text{ is even}\end{cases},\tag{1}$$

式中：N 为 Zadoff-Chu 序列的长度；r 为与 N 互质的整数；k 为序列取值变量，$k=0,1,\cdots,N-1$。长度为 N 的 Zadoff-Chu 序列的循环自相关函数为

$$R(n)=\sum_{k=0}^{N-1}c(k)\cdot c^*(k+n)_{\mathrm{mod}N}=\begin{cases}N, & n=0\\ 0, & n\neq 0\end{cases},\tag{2}$$

式中：n 为循环自相关函数的变量取值；mod 表示取模；“$*$”表示共轭运算。由计算可知 CAZAC 序列具有相关峰尖锐和旁瓣为零的优良特性，适合用自相关运算做定时同步，并且序列经过 FFT 后仍为 CAZAC 序列。此外，CAZAC 序列具有恒定的幅值，PAPR 恒为 0 dB，所以该序列可以降低高PAPR值对系统性能的影响。

3.2　基于 CAZAC 序列的定时同步算法

为了充分利用 CAZAC 序列的特性进行准确定时，重新设计了训练序列的结构。训练序列的结构如图 2 所示。

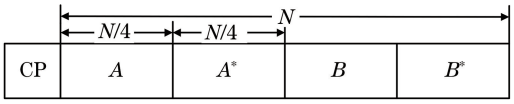

图 2　训练序列结构图

Fig. 2　Structural diagram of training sequence

图 2 中，训练序列分为 4 部分，A 为长度为 $N/4$ 的 Zadoff-Chu 序列，B 为与 A 长度相同但数据不同的 Zadoff-Chu 序列。当训练序列的长度为偶数时序列具备偶对称特性。训练序列的对称关系如图 3 所示。

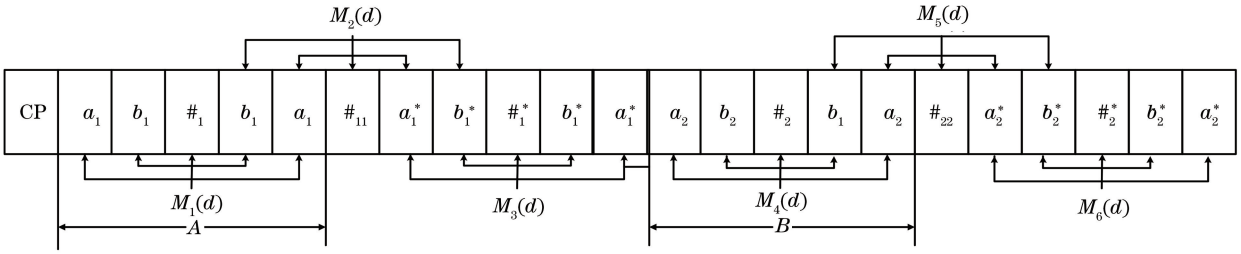

图 3　滑动相关运算原理示意图

Fig. 3　Principle diagram of sliding correlation operation

图 3 中，a、b 表示序列中不同的数据，“♯”表示序列对称点。根据 Zadoff-Chu 序列所具有的共轭对称性和偶对称特性，将训练序列的定时窗口分 6 个，基于图 3 中的对称关系进行滑动相关运算。其中定时度量窗口 $M_1(d)$、$M_3(d)$、$M_4(d)$、$M_6(d)$是偶对称相关运算，$M_2(d)$、$M_5(d)$是共轭对称关系运算。因此，该算法的定时度量函数 $M(d)$可定义为

$$M(d)=\prod_{i=1}^{6}M_i(d),\tag{3}$$

式中：d 为进行 FFT 的采样点；i 为定时窗口的序号；$M_i(d)$为不同定时窗口的定时度量函数，可定义为

$$M_i(d)=\frac{|P_i(d)|^2}{|R_i(d)|^2},\tag{4}$$

式中：$P_i(d)$为滑动相关函数；$R_i(d)$为归一化能量函数。

当 $i\in[1\ 3]$，$P_i(d)$和 $R_i(d)$分别为

$$P_i(d)=\sum_{k=0}^{N/8-1}r(d+k'+i\times N/8)\times r(d-k'+i\times N/8),\tag{5}$$

$$R_i(d)=\sum_{k=0}^{N/8-1}|r(d+k'+i\times N/8)|^2,\tag{6}$$

式中：$r(\cdot)$为接收端训练序列的采样值；k'为运算长度。

当 $i\in[4\ 6]$时，$P_i(d)$和 $R_i(d)$可分别表示为

$$P_i(d)=\sum_{k=0}^{N/8-1}r[d+k+(i+1)\times N/8]\times r[d-k+(i+1)\times N/8],\tag{7}$$

$$R_i(d)=\sum_{k=0}^{N/8-1}|r[d+k+(i+1)\times N/8]|^2。\tag{8}$$

根据(3)～(8)式，计算得到定时度量函数 $M(d)$。该算法中将定时点选择在序列的第一个对称点，即 $N/8$ 处。因此，准确的定时点估计为

$$\hat{d}=\arg\max_{d}[M(d)]-\frac{N}{8}。\tag{9}$$

传统的定时同步算法只有一个定时窗口，而基于 CAZAC 序列的算法包含 6 个定时窗口，且定时窗口 $M_1(d)$、$M_3(d)$、$M_4(d)$、$M_6(d)$与窗口 $M_2(d)$、$M_5(d)$利用的序列对称关系不同。当这 6 个定时窗口的度量函数同时达到最大值时，才能得到正确的定时点，从而确定 FFT 窗口的位置。CAZAC 序列具有良好的自相关性和互相关性，只

有在正确的定时点，这 6 个窗口的相关关系才能达到峰值，而偏离正确的定时点时，这种对称关系则被破坏，不会出现定时度量的峰值，从而消除了平台效应和旁瓣的影响。

3.3　定时算法性能分析

在高斯白噪声信道下，对基于 CAZAC 序列同步算法的定时特性进行了分析，并与传统的 Schmidl&Cox 算法、Park 算法进行了比较。

假设 OFDM 序列的长度 N 为 2048，CP 的长度为 $N/8$。图 4 为三种算法的定时度量性能的比较。

由图 4(a)可以看出，Schmidl&Cox 算法的定时度量曲线存在一个与 CP 相同长度的定时平台，导致定时位置不准确；由图 4(b)可以看出，Park 算法虽然消除了定时平台，但副峰仍会导致定时模糊；由图 4(c)可以看出，基于 CAZAC 序列改进算法的定时度量具有唯一的峰值，能够正确地找到 FFT 窗口的位置。因此，利用提出的基于 CAZAC 序列的同步算法可以实现精确定时。

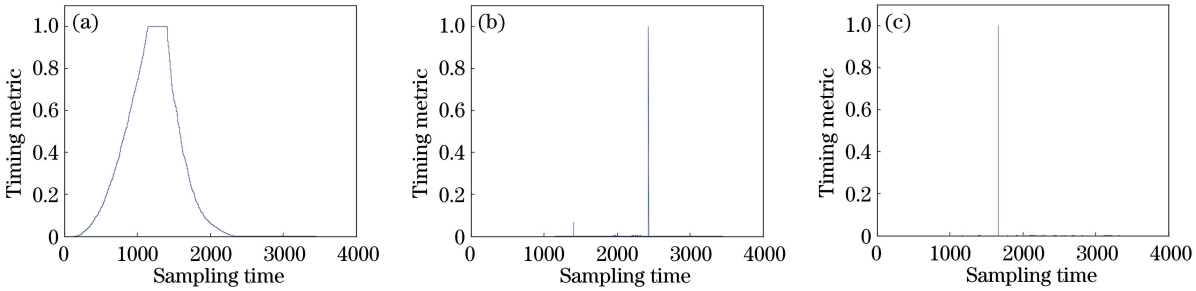

图 4　三种算法的定时度量图。(a) Schmidl&Cox 算法；(b) Park 算法；(c)改进算法

Fig. 4　Timing metric results by three algorithms. (a) Schmidl&Cox algorithm; (b) Park algorithm; (c) proposed algorithm

4　系统仿真结果与分析

根据图 1 所示的 CO-OFDM 系统结构，采用 VPI 仿真平台搭建了一个传输速率为 112 Gbit/s 的 CO-OFDM 系统，定时算法部分采用 MATLAB 进行联合仿真。具体参数设置如表 1 所示。

表 1　CO-OFDM 系统仿真参数

Table 1　Simulation parameters of CO-OFDM system

Number of carriers	Symbol rate / (Gbit·s^{-1})	Cyclic prefix	Central frequency /THz	Modulation	Attenuation / (dB·km^{-1})	Nonlinear index / (m^2·W^{-1})
2048	112	256	193.1	Quadrature phase shift keying	0.2	2.6×10^{-20}

首先，在不同信噪比情况下，对该算法的定时度量峰值进行了仿真。每个光信噪比(OSNR)的仿真次数为 50。图 5(a)是在高斯信道下这三种算法相关峰值的均值曲线，图 5(b)是相关峰值方差曲线。

由图 5(a)中相关峰值的均值曲线可知，在同一信噪比下三种算法的相关峰值的均值有一定差别，表明信噪比对三种算法定时度量峰值的影响不同，但随着信噪比的增大，三种算法的峰值均值曲线逐渐重合并趋向于 1。根据图 5(b)，随着 OSNR 的增大，三种算法的峰值方差逐渐减小，但在同一信噪比

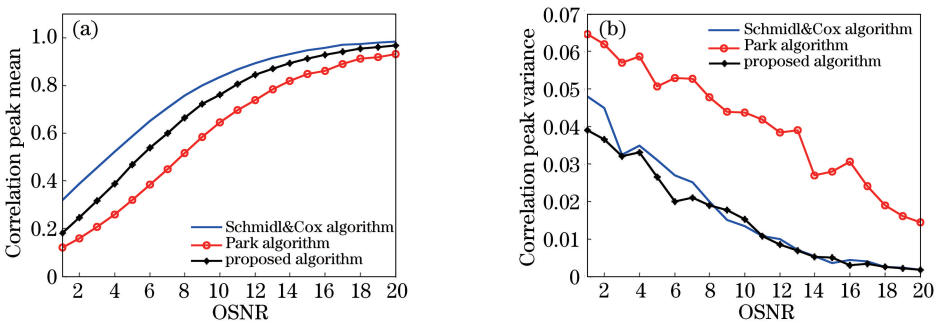

图 5　定时度量函数的相关峰值比较。(a)相关峰值均值曲线；(b)相关峰值方差曲线

Fig. 5　Comparison of correlation peak of timing metric function. (a) Correlation peak mean curves; (b) correlation peak variance curves

下 Park 算法的相关峰值方差明显较大，表明信噪比对 Park 算法影响较大。而 Schmidl&Cox 算法和改进算法的峰值方差曲线随着信噪比的增大而趋于 0，且差异不明显。因此，Schmidl&Cox 算法和基于 CAZAC 序列算法的定时性能比 Park 算法更加稳定。

为了考察该算法的色散性能，对不同色散情况下的定时度量函数的定时均方误差（MSE）进行了仿真。定时 MSE 是衡量定时同步准确性的一个重要标准，其定义为[12]

$$R_{\mathrm{MSE}}=\frac{1}{C}\sum_{c=1}^{50}[(\hat{d}_c-d)/N]^2, \tag{10}$$

式中：C 为仿真总次数（$c=1,2,\cdots,C$）；$\hat{d}_c$ 为第 c 次仿真估计的定时点。

图 6 是 MSE 随色散（CD）的变化曲线。

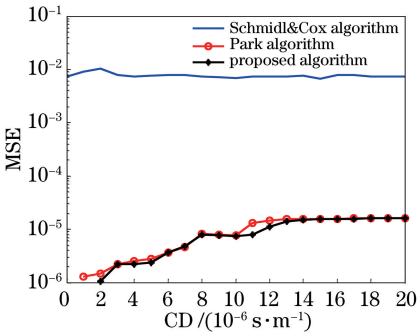

图 6　定时同步算法的 MSE 随色散的变化曲线

Fig. 6　MSE versus CD of timing synchronization algorithm

由图 6 可知，Schmidl&Cox 算法具有较大的定时 MSE，误差维持在 10^{-2} 左右，不能准确实现定时同步；而 Park 算法和基于 CAZAC 序列算法的 MSE 都比较小，在没有色散时，其 MSE 几乎为 0，随着色散系数的增大，MSE 不断增大，且色散系数较大时 MSE 仍在 10^{-5} 左右，能够实现准确的定时估计。

5　结　　论

利用 CAZAC 序列的自相关与偶对称特性，提出了一种新的定时同步算法。仿真结果表明基于恒幅零自相关序列的定时同步算法在不同信噪比下的定时度量函数仍有且仅有一个脉状峰值，提高了算法的定时精度。随着信噪比的变化，改进算法也相对稳定，且色散系数较大时，MSE 仍在 10^{-5} 左右，能够实现准确的定时。综合以上分析，基于 CAZAC 序列的 CO-OFDM 系统的定时同步算法能准确地实现 CO-OFDM 系统的定时估计。

参　考　文　献

[1] Yuan J G, Li H, Liang T Y, *et al*. A new algorithm on the frame synchronization error estimation for optical OFDM systems[J]. Journal of Optoelectronic • Laser, 2012, 23(12): 2327-2332.
袁建国，李好，梁天宇，等. 光 OFDM 系统中一种帧同步误差估计的新算法[J]. 光电子 • 激光，2012，23(12)：2327-2332.

[2] Schmidl T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621.

[3] Minn H, Zeng M, Bhargava V K. On timing offset estimation for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(7): 242-244.

[4] Park B, Cheon H, Kang C, *et al*. A novel timing estimation method for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 239-241.

[5] Huang Y S, Zhang X G, Xi L X, *et al*. A modified synchronization scheme for coherent optical OFDM systems[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(3): 514-522.
黄雨莎，张晓光，席丽霞，等. CO-OFDM 系统中一种改进的同步算法方案[J]. 光电子 • 激光，2013，24(3)：514-522.

[6] Liu J F, Wang S Y, Zeng X Y, *et al*. Research on PAPR reduction in O-OFDM systems based on swarm intelligence algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106006.
刘剑飞，王少影，曾祥烨，等. 基于群智能算法的光 OFDM 系统 PAPR 抑制[J]. 光学学报，2017，37(1)：0106006.

[7] He C C, Wu Y T, Han M X, *et al*. A low-complexity SLM scheme for peak-to-average power ratio reduction in IM/DD O-OFDM systems[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0806003.
何聪聪，吴雅婷，韩梦欣，等. 一种降低 IM/DD O-OFDM 系统峰均比功率的低复杂度 SLM 方案[J]. 光学学报，2018，38(8)：0806003.

[8] Chu D. Polyphase codes with good periodic correlation properties (Corresp.)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(4): 531-532.

[9] Wang H, Zhu L, Shi Y, *et al*. A novel synchronization algorithm for OFDM systems with weighted CAZAC sequence[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(6): 2275-2283.

[10] Silva C E M, Harris F J, Dolecek G J. Synchronization algorithms based on weighted CAZAC preambles for OFDM systems[C] // 13th

International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2013: 192-197.

[11] Ren G L, Chang Y L, Zhang H, *et al*. Synchronization method based on a new constant envelop preamble for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2005, 51(1): 139-143.

[12] Li L, Wu D, Han L, *et al*. Timing synchronization method based on ES-CAZAC sequences for CO-OFDM system[J]. Journal of Optoelectronic · Laser, 2015, 26(9): 1692-1699.
李莉, 吴迪, 韩力, 等. 基于 ES-CAZAC 序列的 CO-OFDM 系统定时同步算法[J]. 光电子·激光, 2015, 26(9): 1692-1699.