

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.008

一种适用于高速动平台的突发 OFDM 通信同步技术

魏云龙, 刘智成, 杨春景

(北京遥感设备研究所, 北京 100854)

摘要: 针对高速动平台短时突发通信的应用场景下,短帧结构的正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)系统中训练序列和导频的数量受限,单一同步算法难以同时满足大范围和高精度的符号定时同步和载波相位同步问题。本文提出了一种改进的 OFDM 通信系统时间、频率快速同步算法,该算法借助短训练序列与导频信息,以粗定时捕获同步,粗频偏估计/校正,精频偏估计/校正,精定时估计/校正的同步流程,实现了大范围和高精度的符号定时同步和载波相位同步。经过仿真校验,该算法能够有效提高高速动平台短时突发通信的 OFDM 同步精度。

关键词: 正交频分复用;同步;动平台;突发通信

中图分类号: TN914

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)S-0048-05

Synchronization Technology of OFDM Burst Communication for High-Speed Moving Platforms

WEI Yunlong, LIU Zhicheng, YANG Chunjing

(Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: In the short-time and burst communication for moving platforms, the number of training sequences and pilots is limited in the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system because the structure of frames is short. And it is hard for a single algorithm to meet the requirements of the large range and high precision of symbol and carrier synchronization. This paper proposes an improved symbol and carrier synchronization algorithm for the OFDM system with the help of the short training sequence and pilot information. The algorithm implements the large range carrier synchronization and the high precision symbol synchronization through the process of coarse symbol synchronization, coarse frequency synchronization, fine frequency synchronization and fine symbol synchronization. Simulation results show that the algorithm can effectively improve the OFDM synchronization accuracy of the short-time and burst communication for moving platforms.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); synchronization; moving platform; burst communication

OFDM 因具有很好的抗多径能力和带宽利用效率,已被广泛应用于数字视频广播、高清晰度电视信号传输、无线局域网、以及第五代移动通信等领域中。实际应用中,OFDM 系统对同步精度要求较高,为了避免引入码间串扰(Inter-symbol interference, ISI)和载波间串扰(Inter-carrier interfer-

ence, ICI),一方面需要完成精确定时同步,保证符号边界准确对齐,另一方面需要完成精确载波同步,保证各子载波间严格正交。高速运动平台的应用场景下,载波同步算法往往需要消耗较多资源,以保障大多普勒范围下的载波同步。而短时突发通信体制需要将连续的数据流拆分成若干小数据

收稿日期:2022-06-01;修订日期:2022-07-22

通信作者:魏云龙,男,高级工程师,E-mail:375984641@qq.com。

引用格式:魏云龙,刘智成,杨春景.一种适用于高速动平台的突发 OFDM 通信同步技术[J].南京航空航天大学学报,2022,54(S):48-52. WEI Yunlong, LIU Zhicheng, YANG Chunjing. Synchronization technology of OFDM burst communication for high-speed moving platforms[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S):48-52.

包进行传输,每次仅传输少量OFDM符号,限制了每次传输中附加训练序列的长度。因此,在该应用场景下,OFDM通信系统需要在有限的长度下进行精确定时同步和大多普勒范围下的精确载波同步。

在OFDM系统同步领域目前已存在较多研究成果。经典同步算法中,定时同步算法包括借助训练序列或循环前缀(Cyclic prefix, CP)的Schmidl & Cox、Minn和Park等算法^[2-9],载波同步算法包括Moose提出一种基于OFDM符号重复传输的频偏估计算法^[10]、Classen等提出一种利用两个连续的OFDM符号中导频信号之间的相位差估计频偏的算法^[11]。文献[12-14]通过构造新型训练序列的方法,明显提升了定时同步性能,但训练序列较长,在短时突发通信环境下,需要在同步过程中消耗较多资源。文献[15]提出了一种利用OFDM符号的近似共轭对称性进行载波频差盲估计的方法,但是在低信噪比环境下性能不理想。文献[16]提出了一种通过构造新型训练序列用于载波同步的方法,利用相关性计算训练符号之间的相位差进行频偏估计,具有良好的估计性能,但在大多普勒情况下,估计消耗时间较长。因此,本文在现有同步算法研究成果的基础上,提出了一种定时同步和载波同步算法,该算法能够适应高速动平台的突发OFDM通信应用场景特点,完成精确定时同步和大多普勒范围下的精确载波同步。

1 OFDM同步原理

1.1 OFDM调制解调原理

OFDM系统通常使用快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)和快速傅里叶逆变换(Inverse fast Fourier transform, IFFT)的方法实现OFDM的调制解调,原理如图1所示。图1中, $X[k]$ 为发射端频域调制信号, $x[n]$ 为发射端时域调制信号, $y[n]$ 为接收端时域调制信号, $Y[k]$ 为接收端频域调制信号。

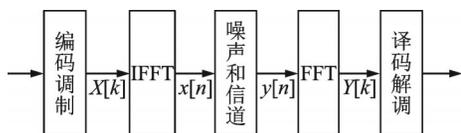


图1 OFDM调制解调原理

Fig.1 Principle of OFDM modulation and demodulation

在实际应用中,为了抵消码间串扰的影响,相邻的OFDM符号之间需要加入CP作为保护间隔。OFDM系统的循环前缀如图2所示。



图2 循环前缀示意图

Fig.2 Schematic of cyclic prefix

1.2 OFDM信号数学模型

设OFDM通信系统中存在大小为 δ 的符号定时偏差(Symbol timing offset, STO)和大小为 ϵ 的载波频率偏差(Carrier frequency offset, CFO)时,第 l 个OFDM符号的基带接收信号可以表示为

$$y_l[n] = \text{IFFT}\{Y_l[k]\} = \text{IFFT}\{H_l[k]X_l[k] + Z_l[k]\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_l[k]X_l[k]W_N^{-(k+\epsilon)(n+\delta)} + z_l[n] \quad (1)$$

式中: $H_l[k]$ 表示第 l 个OFDM符号传输时的信道频率响应,有 $H_l[k] = \text{FFT}\{h_l[n]\}$; $Z_l[k]$ 表示第 l 个OFDM符号传输时的频域噪声,有 $Z_l[k] = \text{FFT}\{z_l[n]\}$; W_N^k 为旋转因子, $W_N^k = e^{-j\frac{2\pi}{N}k}$ 。

1.3 STO的影响

STO通常由传输延迟和收发采样相位存在偏差引起。OFDM接收信号中残留的STO将影响FFT输入位置,可表示为

$$y[n] = x[n + \delta] \leftrightarrow Y[k] = X[k]W_N^{-\delta k} \quad (2)$$

针对 δ 大小的不同总计有4种情况。以QAM16星座图为例,受STO影响的星座图如图3所示。图3中的(c)和(d)情况中,符号边界估计落在有效OFDM符号外,产生了ISI或ICI导致信号严重畸变,无法正常恢复得到信号;而(b)情况符号边界估计落在了CP内部,未产生ISI,但需要更高精度的STO估计并进行频域补偿,才能正确接收。

1.4 CFO的影响

CFO通常由多普勒频偏和收发采样频率存在频差引起。OFDM接收信号中残留的CFO将影响FFT输出的相位,可表示为

$$y[n] = x[n]W_N^{-\epsilon n} \leftrightarrow Y[k] = X[k - \epsilon] \quad (3)$$

当 ϵ 不为0时,导致FFT输出的解调结果产生了频差,可能引起ICI,如图4所示。

2 同步方案

2.1 同步方案设计

针对高速动平台和短时突发通信应用场景的特点,本论文提出了一种改进的同步方法,先后进行粗定时捕获同步,粗频偏估计/校正,精频偏估计/校正,精定时估计/校正处理,完成精确定时同步和大多普勒下的精确载波同步。同步方案原理如图5所示。

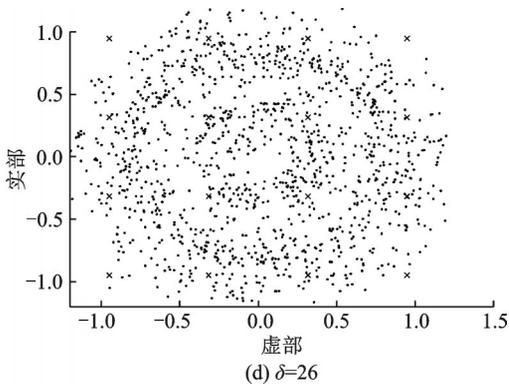
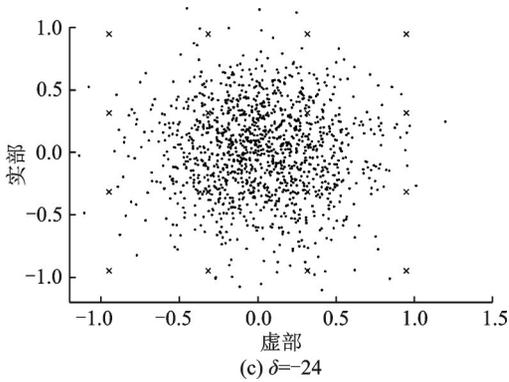
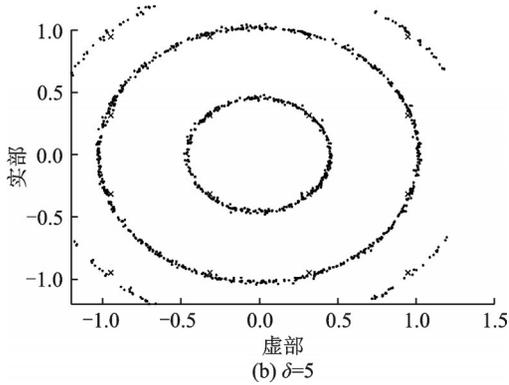
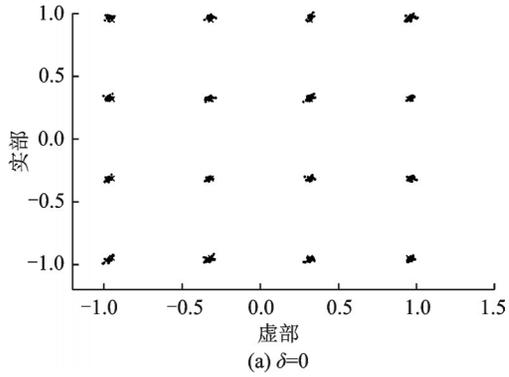


图3 受STO影响的星座图

Fig.3 Constellation affected by STO

该方法先利用较短的帧头训练序列,进行信号检测判决,并初步估计和补偿STO和CFO,再借助导频信号信息,对信号进行精确STO和CFO估计和补偿,完成精确同步。

2.2 帧结构设计

本文通过在数据帧前端添加训练序列的方法进行粗同步捕获和粗频偏估计补偿,分别使用了两种改进的训练序列,其帧结构如图6所示。

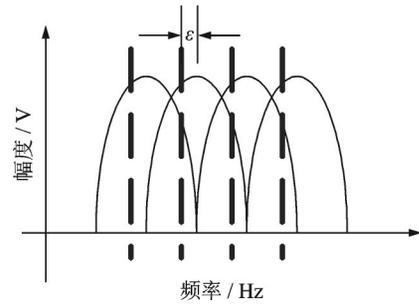


图4 CFO引起的ICI影响

Fig.4 ICI caused by CFO

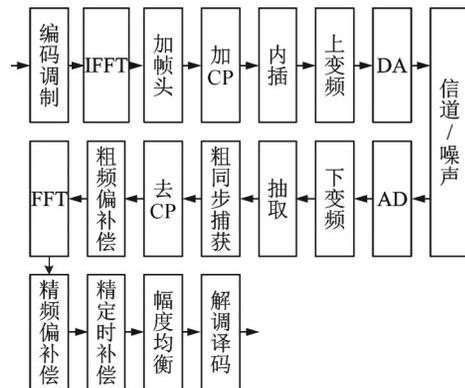


图5 同步方案原理图

Fig.5 Schematic diagram of synchronization scheme

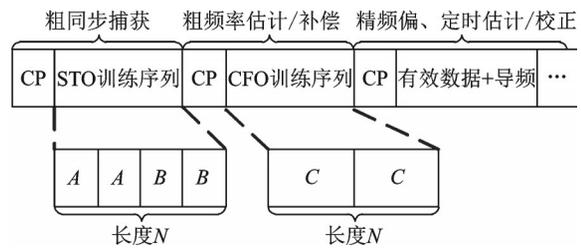


图6 帧结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of frame structure

粗同步捕获采用一种基于ZC序列的改进S&C定时同步算法。STO训练序列由多个ZC序列拼接构成:序列A是长度为N/4的ZC序列;序列B由序列A的共轭对称序列经过运算得到,有: $B = \text{conj}\{A\} \times \text{conj}\{A\}$, $\text{conj}(\cdot)$ 表示取共轭运算。该同步训练序列相较于传统方法,具有更优的峰值尖锐程度和副瓣性能,其定时测度函数为

$$M[\hat{\delta}] = \frac{|P[\hat{\delta}]|^2}{(R[\hat{\delta}])^2} \quad (4)$$

$$P[\hat{\delta}] = \sum_{n=0}^{N/2-1} D[n] y[\hat{\delta} + n] y[\hat{\delta} + N - n - 1] \quad (5)$$

$$R[\hat{\delta}] = \frac{1}{2} \left(|y[\hat{\delta} + n]|^2 + |y[\hat{\delta} + N - n - 1]|^2 \right) \quad (6)$$

式中:序列 $D[n]$ 由 A 序列串行构成,有 $D=[AA]$ 。该粗符号定时估计方法使用较短的训练序列进行 STO 估计,但其精度分辨率仅能达到抽取后的采样间隔。该估计精度可以避免图 3 中(c)情况和(d)情况的发生,但仍存在少量 STO 残差,可能导致图 3(b)情况存在。

粗频率估计/补偿采用了一种改进的 Moose 方法,采用 2 个相同的长度为 $N/2$ 的 ZC 序列构成训练序列,通过计算序列的相位差,进行 CFO 粗估算。经过同步算法得到同步位置 $\hat{\delta}$ 后,从信号中取出接收训练序列 $y_1[n, \hat{\delta}]$ 和 $y_2[n, \hat{\delta}]$,与本地序列 $C[n]$ 进行相关计算,得到相位估计值为

$$\hat{\theta}_k = \frac{1}{\pi} \text{angle} \{ y_k[n, \hat{\delta}] \times \text{conj} \{ C[n] \} \} \quad (7)$$

式中 $k=1, 2$ 。

然后计算得到粗频偏估计 $\hat{\epsilon}$

$$\hat{\epsilon} = \hat{\theta}_2 - \hat{\theta}_1 \quad (8)$$

该粗频偏估计方法使用短训练序列进行 CFO 估计,提升了频偏估计范围,减少了同步资源消耗,但也降低了该方法的多普勒搜索性能,在低信噪比情况下, CFO 将存在明显残留。

2.3 导频设计

OFDM 系统中,通常在信号中插入导频,用于对信道特性估计和补偿。导频通常分为块状导频、梳状导频和格状导频,如图 7 所示。在高速动平台应用场景下,信道特性变化明显,块状导频和梳状导频无法兼顾频率选择性衰落和时间选择性衰落特性,因此本方法采用格状导频设计。

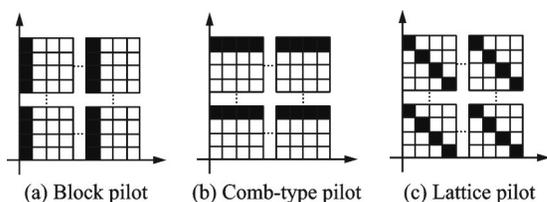


图 7 导频种类示意图

Fig.7 Schematic diagram of types of pilot

2.4 精频偏估计补偿

图 5 所示同步方案中,粗频率同步通过缩短训练序列的方案,完成了大范围多普勒频率的估计和补偿,但在低信噪比情况下仍存在一定的 CFO 残留。为提高低信噪比环境下的频率估计性能,本方案借助导频信息进行精频率估计和补偿。

完成粗同步后,先对信号进行一次 FFT 运算,并提取其中的导频信号。设 $L, p[j]$ 和 $X_l[p[j]]$ 分别表示导频总数、第 j 个导频的位置和第 l 个符号中位于 $p[j]$ 的导频,则精 CFO 估计结果可表示为

$$\hat{\epsilon}_l = \frac{1}{2\pi T_{\text{sym}} D} \text{angle} \left\{ \sum_{j=0}^{L-1} R_{\text{corr}}[p[j], \hat{\epsilon}] \right\} \quad (9)$$

$$R_{\text{corr}}[p[j], \hat{\epsilon}] = Y_{l+D}[p[j], \hat{\epsilon}] Y_l^*[p[j], \hat{\epsilon}] \cdot X_{l+D}^*[p[j]] X_l[p[j]] \quad (10)$$

式中: $y_l[n]$ 和 $y_{l+D}[n]$ 为 D 的 OFDM 符号, T_{sym} 为 OFDM 符号周期。

经上述方法估计后,能够得到精确的频偏估计结果,且由于导频随信号传输,能够反映信道的变化特性,在高速动平台环境下能够有效改善估计性能。

2.5 精定时估计补偿

如 1.3 节所述,粗同步后的接收信号中仍会残存少量 STO,引起如图 3 中(b)情况所示的频域相位旋转,因此需要借助导频信号进行精确 STO 估计。

依据式(2),通过相邻子载波之间的相位差,实现 STO 的精确估计。估计结果可以表示为

$$\hat{\delta}_l = \frac{\varphi[k+D] - \varphi[k]}{2\pi D} \quad (11)$$

$$\varphi[k] = \text{angle} \{ Y_l[p[j], \hat{\epsilon}] X_l^*[p[j]] \} \quad (12)$$

经上述方法估计后,能够得到精确的符号定时估计结果,将图 3(b)情况的旋转星座图,转变为图 3(a)情况正确结果。

3 仿真校验

基于 MATLAB 对图 5 所示同步方案进行仿真验证。仿真设置恶劣条件下的 δ 和 ϵ 参数,比较改进 SC+Moose(时域估计方法 1)、频域定时估计+Classen(频域估计方法 2)、文献[12]+文献[16](时域估计方法 3)、文献[17](时域估计方法 4)与本文估计方法,对同步精度性能、误码率(Bit error rate, BER)、误差向量幅度(Error vector magnitude, EVM)和频率估计标准差进行仿真对比。

从图 8~10 中可以看出,在大多普勒动态、短数据包条件下,该同步方案具备更好的误码率性能和频率估计精度。

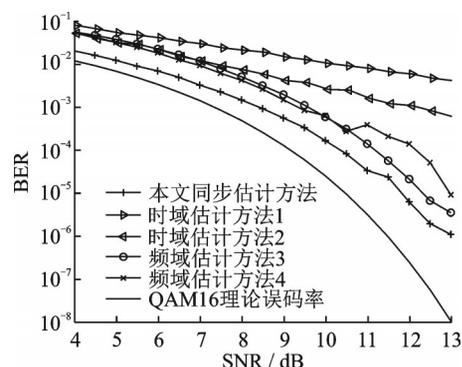


图 8 误码率性能仿真结果

Fig.8 Simulation results of bit error rate performance

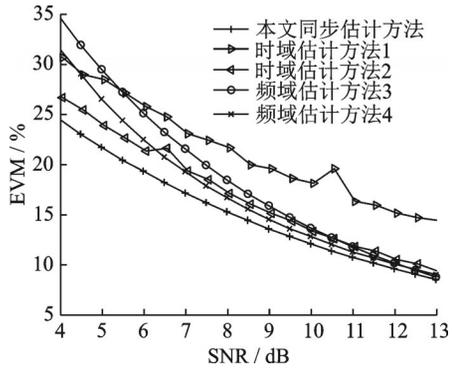


图9 EVM性能仿真结果

Fig.9 Simulation results of EVM performance

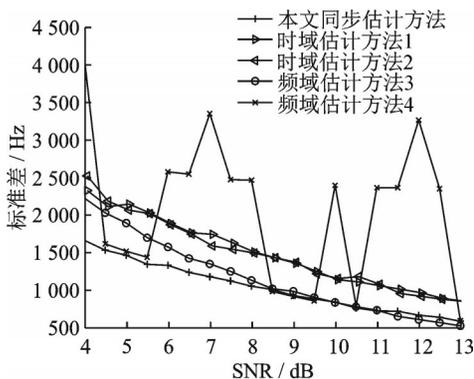


图10 频率估计精度仿真结果

Fig.10 Simulation results of frequency estimation accuracy

4 结 论

针对高速动平台短时突发通信的应用场景下的OFDM通信系统,本文利用短训练序列和导频给出了一种能够同时满足大范围和高精度的同步算法。该算法在短帧结构条件下保证了高精度的符号定时同步和载波同步性能。本文中给出的仿真实例说明了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] YONG S C, JAEKWON K. MIMO-OFDM 无线通信技术及 MATLAB 实现[M]. 孙锴,黄威,译.北京:电子工业出版社,2013.
- [2] SCHMIDL T M, COX D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Trans on Commun, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [3] MINN H, ZENG M, BHARGAVA V K. On timing offset estimation for OFDM system[J]. IEEE Comm Lett, 2000, 4(7): 242-244.
- [4] PARK B, CHEON H, KANG C, et al. A novel timing estimation method for OFDM systems[J]. IEEE Comm Lett, 2003, 7(5): 239-241.
- [5] VAN DE BEEK J J, SANDELL M, BORJESSON P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM system[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800-1805.
- [6] TAKAHASHI K, SABA T. A novel symbol synchronization algorithm with reduced influence of ISI for OFDM systems[C]//Proceedings of IEEE Global

Telecommunications Conference. San Antonio, TX, USA:IEEE, 2001: 524-528.

- [7] RAMASUBRAMANIAN K, BAUM K. An OFDM timing recovery scheme with reduced influence of ISI for OFDM systems[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference. San Antonio, TX, USA:IEEE, 2001: 3111-3115.
- [8] SHENG Bin, ZHENG Jun, YOU Xiaohu, et al. A novel timing synchronization method for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(12): 1110-1112.
- [9] PARK B, CHEON H, KO E, et al. A blind OFDM synchronization algorithm based on cyclic correlation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 83-85.
- [10] MOOSE P H. A Technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction[J]. IEEE Transaction on Communications, 1994, 42(10): 2908-2914.
- [11] CLASSEN F, MEYR H. Frequency synchronization algorithm for OFDM systems suitable for communication over frequency selective fading channels[C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC).Stockholm, Sweden; IEEE, 1994: 1655-1659.
- [12] 张羽丰,陈青岳,李炯卉,等.一种采用可变同步帧的OFDM符号定时同步算法[J].电讯技术, 2020, 60(12): 1442-1447.
- ZHANG Yufeng, CHEN Qingyue, LI Jionghui, et al. An OFDM timing synchronization algorithm using variable synchronization frames[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(12): 1442-1447.
- [13] 张秀艳,刘珈池.基于ZC序列的OFDM系统定时同步改进算法[J].吉林大学学报(信息科学版), 2019, 37(6): 610-616.
- ZHANG Xiuyan, LIU Jiachi. Improved timing synchronization algorithm for OFDM system based on ZC sequence[J]. Journal of Jilin University, 2019, 37(6): 610-616.
- [14] MA Yunsi, ZHOU Sanwen, YAN Chaoxing, et al. Design of OFDM timing synchronization based on correlations of preamble symbol[C]//Proceedings of Vehicular Technology Conference. Nanjing: IEEE, 2016: 1-5.
- [15] LIU Mingqian, WANG Ju, LI Bingbing. Non-data aided joint estimation of symbol timing offset and carrier frequency offset for OFDM/OQAM system [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2018, 87(2): 164-172.
- [16] 商林松,龙华,李一民,等.基于新型训练序列的OFDM频率同步算法[J].云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 630-637.
- SHANG Linsong, LONG Hua, LI Yimin, et al. OFDM frequency synchronization algorithm based on new training sequence[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2020, 42(4): 630-637.
- [17] 薛茜男,戈立军,陶进,等.基于IEEE 802.15.3C的OFDM超宽带系统时频同步算法[J].北京理工大学学报, 2017, 37(1): 77-82,92.
- XUE Qiannan, GE Lijun, TAO jin, et al. Time and frequency synchronization algorithms for OFDM-UWB system based on IEEE 802.15.3C standard[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(1): 77-82,92.

(编辑:刘彦东)