

# 无人船数据链 SC-FDE 突发信号载波同步方法\*

祝桂刚<sup>1,2</sup>, 付林罡<sup>2</sup>, 刘建航<sup>1</sup>, 闫朝星<sup>2</sup>

(1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:**设计了一种适用于无人船组网数据链的 SC-FDE 突发通信时隙的帧结构,通过计算前导序列和独特字(UW)序列的自相关函数,调整差分相关长度,提出一种适用于多模式帧结构的载波同步方法。最后,通过仿真评估了所提出算法在不同条件下的有效频偏估计范围、频偏估计精度等性能,为算法工程实现的主要设计参数提供参考。

**关键词:** SC-FDE; 载波同步; 无人船; 突发通信; 频偏估计

中图分类号: TN924.2 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)01-0013-06

## Carrier synchronization method for unmanned surface vehicle data link with SC-FDE burst signal

ZHU Guigang<sup>1,2</sup>, FU Lingang<sup>2</sup>, LIU Jianhang<sup>1</sup>, YAN Chaoxing<sup>2</sup>

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of the unmanned ship data link SC-FDE burst signal communication time slot change, a carrier synchronization method based on variable frame length and frame structure is studied. The autocorrelation function of the preamble sequence and the unique word (UW) sequence in the frame structure is used to complete the carrier synchronization. By designing the optimal differential correlation length, it provides sufficient frequency offset estimation range and higher estimation accuracy, while reducing the carrier computational complexity of the synchronization method. Finally, the performance of the designed carrier synchronization method is simulated in terms of frequency offset estimation range, frequency offset estimation accuracy and differential correlation length.

**Key words:** SC-FDE; Carrier synchronization; Unmanned ship; Burst communication; Frequency offset estimation

## 引 言

海上无线通信系统中海面信道反射路径影响较大,多径传播造成的频率选择性衰落会严重影响无人船数据链传输信号质量。抗多径衰落通信体制主要有单载波频域均衡(SC-FDE)和正交频分复用(OFDM)技术。SC-FDE 不仅能够抵抗海面信道多径衰落的影响,而且与 OFDM 相比具有峰均比低的优点,降低了对功率放大器的要求<sup>[1]</sup>。在海上无人船组网通信系统中,无人船相向运动产生的多普勒频移,需要在接收机中设计有效的载波同步技术。突发传输模式适用于多节点组网卫星通信、海面组网通信等领域<sup>[2]</sup>。而在海上无人船组网通信中,需要设计具有不同时隙长度、不同帧结构的突发数据传输多模式系统帧,并据此设计灵活的载波频偏估计。

突发通信载波同步算法可分为数据辅助同步方法和非数据辅助同步方法<sup>[3]</sup>。其中,前者借助训练符号和导频提取载波信息,可直接估计出载波频率偏差值<sup>[4]</sup>,如 Kay、L&R、Fitz 与 M&M 等算法。目前,基于以上经典算法的改进算法层出不穷。文献[5]在线性预测方法的基础上,提出了将接收信号首先取采样值,再进行分段累加,然后求累加值的自相关函数,进而求得频率值的方法。分段累加算法具有计算简单,运算量小的优点,但是其信噪比门限太高,大于 5dB,而且估计方差很大。本文在设计海上无人

\*基金项目: 航天科技集团青年拔尖人才计划; 国家重点研发计划(2018YFC1407200, 2019YFC1510904)

收稿日期: 2020-10-12 收修改稿日期: 2021-01-05

船突发通信的多模式 SC-FDE 帧结构基础上, 提出了一种基于前导与 UW 序列辅助的载波同步方法, 该方法可灵活适应突发通信中时隙变化, 充分利用系统帧结构特性进行载波频偏估计。

## 1 海上 SC-FDE 数据链

### 1.1 海上无线信道

海上无人船通信一般包括海上平台/母船或岸基基站与无人船/无人艇之间、无人船与无人船之间的双向通信<sup>[5]</sup>。由于受到海风、海浪等复杂环境影响, 海洋通信信道衰落相比于陆地环境存在更为严重的多径效应<sup>[6]</sup>。无线电波在海面传播时, 收发端在可视距离以内接收端接收到的信号包括直达波和经海面反射的反射波, 如图 1 所示。直视路径 (LOS) 是指射频频发射端和接收端之间的可视路径。镜面反射路径是指经一次镜面反射的路径。漫反射路径是指经粗糙海面漫反射的路径<sup>[7]</sup>。

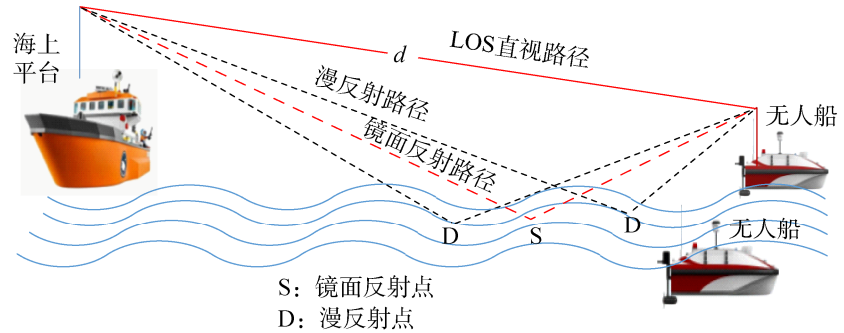


图 1 海面无人船通信的信道模型

Fig. 1 Sea surface wireless multipath channel model

针对海上无人通信信道, 文献[8]采用 Longley-Rice 模型对海面浮标中继通信系统电波传输损耗进行仿真, 文献[9]通过 Okumura-Hata 模型和 Longley-Rice 模型的仿真数据与实测数据的对比, 发现 Longley-Rice 模型的仿真数据曲线更接近实测数据曲线, 预测的曲线拐点与实测值吻合较好。Longley-Rice 模型为不规则地形模型, 以反射传播机制为基础较准确地模拟了海上无线信道的损耗情况, 考虑了海面折射率、海面导电率、介电常数以及海浪汹涌等因素, 同时考虑了气候类型和天线的位置标准等影响<sup>[8]</sup>。该模型计算路径传播损耗时根据路径距离分为三部分: 视距损耗、绕射损耗和散射损耗。Longley-Rice 模型的传输损耗为

$$L_b = 32.45 + 20 \lg d + 20 \lg f + L_{ref} \quad (1)$$

$$L_{ref}(d) = \begin{cases} \max(0, L_{be} + k_1 d + k_2 \lg d), & d_{min} \leq d \leq d_{LS} \\ L_{bed} + m_d d, & d_{LS} \leq d \leq d_x \\ L_{bes} + m_s d, & d_x \leq d \end{cases} \quad (2)$$

式中, 传播距离  $d$  的单位为 km, 无线电频率  $f$  的单位为 MHz,  $d_{min} \leq d \leq d_{LS}$  表示视距通信距离,  $d_{LS} \leq d \leq d_x$  表示绕射传播距离,  $d_x \leq d$  表示散射传播距离,  $L_{be}$ 、 $L_{bed}$ 、 $L_{bes}$  分别表示自由空间下视距、绕射和散射的传播损耗值,  $k_1$  和  $k_2$  为传播损耗系数,  $m_d$  和  $m_s$  分别为绕射和散射损耗系数。

针对本文研究的无人船通信环境, 仿真分析不同频率下海上无线信道损耗随距离的变化情况。设发端天线高度 8m、收端天线高 3m、海面折射率为 1.34、海水介电常数为 81、海面电导率为 5s/m。图 2 所示为 UHF 频段 400MHz、L 频段 1.5GHz 和 C 频段 4.5GHz 在通信距离 0.5km~15.5km 下的信道损耗。在 4.5km 距离下三段信道损耗比自由空间模型多大约 31dB、24dB、18dB。

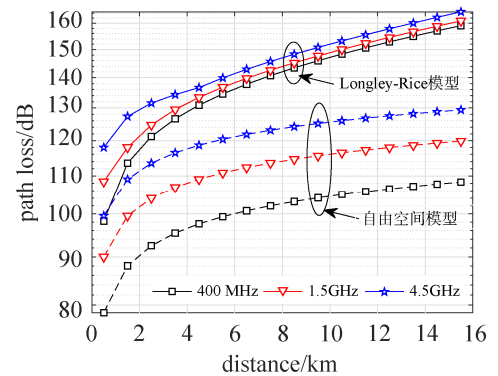


图 2 在海面不同传输距离下的 Longley-Rice 模型路径损耗

Fig. 2 Longley-Rice model path loss at different distances over the sea surface

### 1.2 海上通信体制分析

海上无人船通信中不仅存在多径衰落，无人船间的相向运动等也会产生多普勒频偏。无线宽带通信中抗多径通信体制常采用 OFDM 或 SC-FDE 技术。SC-FDE 技术不仅可以有效对抗信道的频率选择性衰落，实现高速率、大容量的通信传输，而且对频偏不敏感的优势，同时，SC-FDE 系统可以达到 OFDM 系统相似的抗多径性能<sup>[10,11]</sup>。因此，SC-FDE 技术适用于海上无人船通信信道，而且 SC-FDE 低峰均比的优势可以降低系统对功率放大器的要求<sup>[12]</sup>。

SC-FDE 的结构如图 3 所示。发射端对要发送的信息进行信道编码、调制映射，然后插入既定的前导序列和 UW 序列完成组帧，再通过成形滤波与上采样之后由数模转换送功放发射。经由海面信道后到达接收端，在接收信道对模数采样信号进行定时同步、帧同步、载波同步，在去除前导序列后利用 UW 序列在频域完成信道估计和信道均衡，最后进行译码检测。

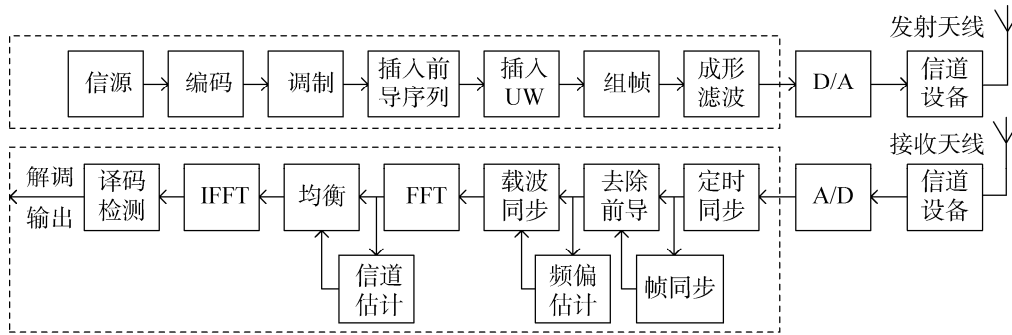


图 3 SC-FDE 系统调制与解调结构

Fig. 3 SC-FDE system structure

## 2 基于多模式帧载波同步方法

### 2.1 SC-FDE 多模式系统帧设计

海上无人船间通信系统在突发传输模式下，数据帧中每个前导段及随后的  $K$  个 UW-DATA-UW 段成一个子帧，每个时隙内子帧数量随系统帧结构模式而变化。一个时隙中可能包含一个或者多个子帧。设计在突发传输模式下的 SC-FDE 系统帧结构，模式 A 与模式 B 如下图所示。

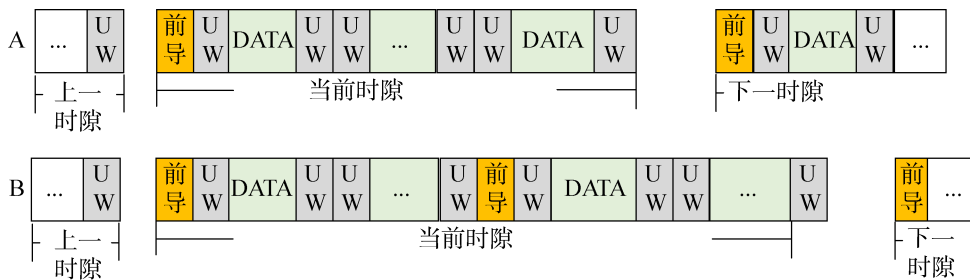


图 4 SC-FDE 突发数据传输的系统帧结构

Fig. 4 Frame structure of SC-FDE burst data transmission

模式 A 时隙中设当前时隙帧包含一个帧  $s(n)=s_A(n)$ ，帧内有  $1 \leq k \leq K$  共  $K$  个子帧，即  $k$  表示序列属于当前时隙帧的第  $k$  个 UW-DATA-UW 段。 $s_d$  表示每个子帧中长度为  $N_D$  的数据序列， $s_p$  和  $s_u$  分别表示子帧中长度为  $N_P$  的前导序列和长度为  $N_U$  的 UW 序列。组帧后子帧数据  $s(n)$  表示为

$$s_A(n) = \begin{cases} s_p, & n \in [1, N_P], \\ s_u, & n \in [N_P + (k-1)(2N_U + N_D) + 1, N_P + (k-1)(2N_U + N_D) + N_U], \\ s_d, & n \in [N_P + (2k-1)N_U + (k-1)N_D + 1, N_P + (2k-1)N_U + kN_D], \\ s_u, & n \in [N_P + (2k-1)N_U + kN_D + 1, N_P + k(N_D + 2N_U)] \end{cases} \quad (3)$$

上述时隙帧内子帧数  $K$  由网络资源管理系统分配给每个无人船节点。网络资源管理系统还可以按照上图中模式 B 给无人船节点分配时隙, 设模式 B 的当前时隙帧包含多个帧  $s(n)=s_B(n)$ , 此时模式 B 表示为多个模式 A 时隙帧。设模式 B 帧序列共包含  $1 \leq m \leq M$  个模式 A 帧序列。

故, 模式 B 的帧序列用矢量  $\mathbf{s}_B$  表示为

$$\mathbf{s}_B = [\mathbf{s}_{A,1}, \mathbf{s}_{A,2}, \dots, \mathbf{s}_{A,m}, \dots, \mathbf{s}_{A,M}] \quad (4)$$

其中, 矢量  $\mathbf{s}_A$  表示式 (3) 模式 A 的帧序列。

在上述帧结构中, UW 序列是已知训练序列, 可用于解调载波同步、信道估计和频域均衡<sup>[13]</sup>。本系统设计 SC-FDE 帧结构的前导序列、UW 序列长度均为 64, 数据符号长度为 960, 数据符号与 UW 组成一个 1024 长度的 IFFT 块, UW 序列选用了 IEEE802.16a 标准规定的 Frank-Zadoff 序列, UW 序列长度为  $N_U=64$ , 适用于波特率 1.25MHz 到 20MHz。SC-FDE 在时域上进行信号判决, 对定时误差较为敏感, 基于上述帧结构, 本文设计了一种四倍过采样的定时同步算法, 能够满足 SC-FDE 对定时误差估计精度的要求。

经过信道后的接收基带数字采样信号可以表示为

$$r(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)s(n-l)e^{j2\pi\Delta f n} + w(n) \quad (5)$$

其中,  $w(n)$  为加性高斯白噪声,  $h(l)$  是长度为  $L$  的信道冲激响应,  $\Delta f$  为载波频偏。

## 2.2 多模式帧的载波同步方法

基于上述帧结构设计, 可以通过前导序列和 UW 序列进行频偏估计: 首先利用信号中的前导和两段 UW 分别计算自相关函数。设模式 B 帧序列共包含  $1 \leq m \leq M$  个模式 A 帧序列, 利用接收到的第  $m$  个前导序列  $r(n)=z_m(n)$  计算得到的自相关函数  $R_m(i)$ :

$$R_m(i) = \frac{1}{N_p - i} \sum_{n=i+1}^{L_p} z_m(n)z_m(n-i), \quad 1 \leq i \leq L_p - 1 \quad (6)$$

类似的, 可得到当前时隙内第  $m$  个时隙帧的第  $k$  段子帧的 UW 序列自相关函数,  $R_{m,k,1}(i)$  和  $R_{m,k,2}(i)$  分别为第  $k$  段 UW-DATA-UW 的前置和后置 UW 计算得到的自相关函数,  $L_p$  为前导序列的差分相关的长度,  $L_U$  为 UW 序列的差分相关的长度,  $L_p \leq N_p/2$ ,  $L_U \leq N_U/2$ 。

然后, 对  $M$  个前导对应的自相关序列求平均, 再对平均后的累加结果取相位得到频偏估计值  $\hat{f}_1$ :

$$\hat{f}_1 = \frac{1}{\pi T(L_p + 1)} \arg \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{L_p-1} R_m(i) \right\} \quad (7)$$

同样, 可对  $2K$  个 UW 对应的自相关序列计算得到频偏估计值  $\hat{f}_2$ :

$$\hat{f}_2 = \frac{1}{\pi T(L_U + 1)} \arg \left\{ \frac{1}{2K} \sum_{j=1}^{MK} \left( \sum_{i=1}^{L_U} R_{m,k,1}(i) + \sum_{i=1}^{L_U} R_{m,k,2}(i) \right) \right\} \quad (8)$$

最后, 通过加权平均得到频偏估计值  $\hat{f}_0$ :

$$\hat{f}_0 = \frac{M\hat{f}_1 + 2K\hat{f}_2}{M + 2K} \quad (9)$$

## 3 仿真分析

下面对上述算法进行仿真分析, 并参考 Longley-Rice 信道模型模拟了海上无线信道损耗, 通过莱斯信道模拟海上无人船通信的多径情况。该海上无人船组网通信系统中 SC-FDE 突发信号帧的前导长度  $N_p=64$ , UW 序列长度  $N_U=64$ , 数据段的长度  $N_D=960$ , FFT 长度为 1024。时隙帧中有 1 个前导序列和 6 个 UW 序列。

对载波同步方法的归一化频偏估计范围进行仿真, 如图 5 所示。分别仿真差分相关的长度  $L_p=L_U$  且分别为 16、32 时的载波频偏估计范围, 归一化频偏估计范围分别为 0.06、0.02。由此可见, 差分相关

长度增大将降低载波同步方法的有效估计范围, 但将增大估计值的抖动方差。

图 6 中对不同差分相关长度下载波同步方法的均方误差值和克拉美罗界进行了对比。设载波带宽 10MHz, 多普勒频偏设置为 0.01, 在图 5 所示的有效估计范围内。图 6 给出了在  $L_p=L_U$  且分别为 32、24、16 三种情况下的均方误差性能。分析可知, 在差分相关长度  $L_p=L_{UW}=32=N_p/2$  时, 频偏估计计算式 (9) 在 SNR=0dB 时频偏估计均方误差小于  $10^{-6}$ , 并随着信噪比增大接近克拉美罗限, 而  $L_p=L_{UW}=24$  性能恶化较小, 可作为工程实现备选参数。

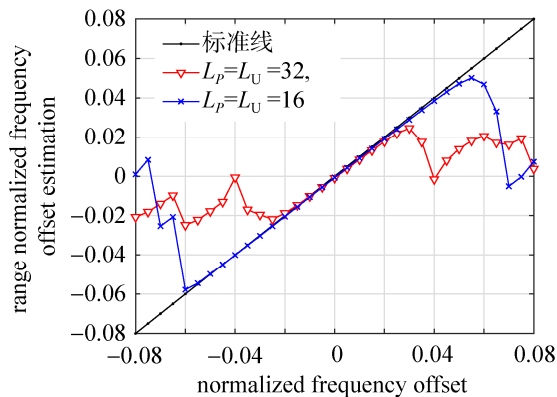


图 5 载波频偏估计范围

Fig. 5 Frequency offset estimation range of proposed method

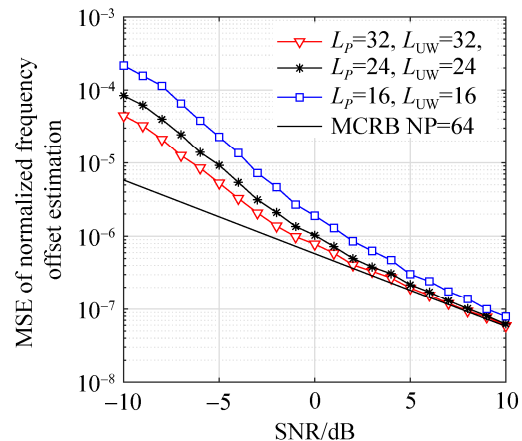


图 6 不同条件下的载波频偏估计值

Fig. 6 MSE of carrier frequency offset estimation

#### 4 结束语

本文在设计可变时隙长度的多模式 SC-FDE 数据帧结构基础上, 提出联合前导与 UW 序列的频偏估计方法, 能够在保证一定频偏估计范围的同时, 提升频偏估计精度, 适用于海上无人船 SC-FDE 突发通信接收机。同时, 通过仿真不同条件下的载波频偏估计性能, 评估算法主要设计参数, 指导工程实现。

#### 参考文献

- [1] 刘鲁平, 唐金花, 陈文正, 等. SC-FDE、OFDM 和 SC-TDE 三种系统的性能比较研究[J]. 科技通报, 2008(4): 543-547.  
LIU Luping TANG Jinhua, CHEN Wenzheng, et al. Performance comparison of SC-FDE, OFDM and SC-TDE systems[J]. Bulletin of Science and Technology, 2008(4): 543-547.
- [2] 王林, 许宏泉. 一种适用于突发通信的载波频偏估计算法[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(11): 67-69.  
WANG Lin, XU Hongquan. A carrier frequency offset estimation algorithm suitable for burst communication[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(11): 67-69.
- [3] 严俊, 季仲梅, 冯泉盛. 突发通信中数据辅助频偏估计算法研究[J]. 电视技术, 2006, 8: 13-15.  
YAN Jun, JI Zhongmei, FENG Quansheng. Research on data assisted frequency offset estimation algorithm in burst communication[J]. Television Technology, 2006, 8: 13-15.
- [4] 杨晗竹, 李广侠, 赵陆文, 等. 突发通信中数据辅助频偏估计算法综述[C]. 卫星通信学术年会, 2015.  
YANG Hanzhu, LI Guangxia ZHAO Luwen, et al. Overview of data-aided frequency offset estimation algorithms in burst communication[C]. Proceedings of the Satellite Communications Academic Annual Conference, 2015.
- [5] 张树凯, 刘正江, 张显库, 等. 无人船艇的发展及展望[J]. 世界海运, 2015, 38(9): 29-36.  
ZHANG Shukai, LIU Zhengjiang, ZHANG Xianku, et al. Development and prospects of unmanned craft[J]. World Shipping, 2015, 38(9): 29-36.
- [6] 陈永华. 无线传感网络的海上多信道通信技术的研究[J]. 通讯世界, 2015(19): 20.  
CHEN Yonghua. Research on maritime multi-channel communication technology of wireless sensor network[J]. Communication World, 2015(19): 20.

- [7] 陈灿彬. 海上宽带移动无线信道建模研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.  
CHEN Canbin. Research on modeling of maritime broadband mobile wireless channel (master)[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.
- [8] 张国龙, 郑琛瑶. 海面浮标通信电波传播损耗研究与仿真[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(2): 77-79.  
ZHANG Guolong, ZHENG Chenyao. Research and simulation of the propagation loss of sea surface buoy communication radio waves[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(2): 77-79.
- [9] 王祖良, 樊文生, 郑林华. 海面电波传播损耗模型研究与仿真[J]. 电波科学学报, 2008, 23(6): 1095-1099.  
WANG Zuliang, FAN Wensheng, ZHENG Linhua. Research and simulation of sea surface electric wave transmission loss model[J]. Journal of Radio Science, 2008, 23(6): 1095-1099.
- [10] 张皓, 吴方, 葛万成. SC-FDE 通信系统中关键技术的研究与实现[J]. 信息技术, 2008, 32(7): 5-8.  
ZHANG Hao, WU Fang, GE Wancheng. Research and implementation of key technologies in SC-FDE communication system[J]. Information Technology, 2008, 32(7): 5-8.
- [11] 褚小川, 李智. 室内无线信道通信仿真中 SC-FDE 与 OFDM 性能比较 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(1): 74-76.  
CHU Xiaochuan, LI Zhi. Performance comparison of SC-FDE and OFDM in indoor wireless channel communication simulation[J]. Computer and Digital Engineering, 2012, 40(1): 74-76.
- [12] 唐海慧, 葛万成. 宽带传输方案 SC-FDE 系统与 OFDM 系统的比较[J]. 信息技术, 2007(4): 15-18.  
TANG Haihui, GE Wancheng. Comparison of wide-band transmission schemes SC-FDE system and OFDM system[J]. Information Technology, 2007(4): 15-18.
- [13] 朱良彬, 文运丰, 桑会平. 单载波频域均衡系统帧结构的设计[J]. 无线电通信技术, 2011, 37(5): 52-54.  
ZHU Liangbin, WEN Yunfeng, SANG Huiping. Design of frame structure for single carrier frequency domain equalization system[J]. Radio Communication Technology, 2011, 37(5): 52-54.
- [14] 谭尧, 杨拥军, 陈强. 低信噪比短前导突发通信的频偏估计[J]. 计算机应用, 2016, 36(S2): 14-17.  
TAN Yao, YANG Yongjun, CHEN Qiang. Frequency offset estimation of short preamble burst communication with low signal-to-noise ratio[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(S2): 14-17.
- [15] 王利军. 基于前导序列的突发通信载波同步算法[J]. 无线电通信技术, 2005, 31(1): 4-6.  
WANG Lijun. Burst communication carrier synchronization algorithm based on preamble[J]. Radio communication technology, 2005, 31(1): 4-6.

#### [作者简介]

祝桂刚 1996 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机网络应用。

付林罡 1982 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控通信系统。

刘建航 1979 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为车联网通信及组网。

闫朝星 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天网络通信技术。