

面向无线突发通信的定时同步算法改进

孙健*, 张辉, 张坤

(南京电子技术研究所, 江苏南京 210039)

摘要:针对定时同步(Q&M)算法突发通信中的定时误差跟踪精度在存在定时频偏时会下降的问题,文中在该算法基础上增加滑窗处理环节,有效降低同步采样点数,提升了定时误差跟踪精度。仿真结果表明,在存在定时频偏的情况下,改进算法的定时跟踪均方误差显著降低,且适用于二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)、正交幅度调制(QAM)等调制方式,能够满足无线突发通信的应用需求。

关键词:突发通信;定时同步;O&M算法改进

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2023)07-0065-05

引用格式:孙健,张辉,张坤.面向无线突发通信的定时同步算法改进[J].现代雷达,2023,45(7):65-69.

SUN Jian, ZHANG Hui, ZHANG Kun. Improvement of timing synchronization algorithm for wireless burst communication[J]. Modern Radar, 2023, 45(7): 65-69.

Improvement of Timing Synchronization Algorithm for Wireless Burst Communication

SUN Jian*, ZHANG Hui, ZHANG Kun

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: Considering the problem that synchronization accuracy will decrease when timing frequency is offset, this paper proposed an improving method which a sliding window processing is added on the basis of this algorithm, can effectively reduces the number of synchronous sampling points, and improves timing error tracking accuracy. The simulation results show that the improved algorithm can reduce the mean square error of timing tracking significantly in the case of timing frequency offset, and is suitable for BPSK, QPSK, QAM and other modulation modes, which can meet the application requirements of wireless burst communication.

Key words: burst communication; time synchronization; O&M algorithm improvement

0 引言

在数字无线通信系统中,突发通信因其具有良好的自适应性、隐蔽性和抗干扰性而得到广泛应用^[1]。定时同步是数字通信解调中不可或缺的一项关键技术。相比于连续通信,突发通信每帧数据需要独立进行定时同步,对定时同步的误差跟踪精度要求更高。

定时自同步法利用基带数据信息去估计定时误差实现定时同步,节省信道带宽,是目前最常用的方法,可分为反馈式和前馈式两种。反馈方式又被称为锁相环法,通过对本地时钟和接收信号的时钟进行对比得到定时误差,进而对本地采样时钟的速率和相位进行调整的方法。该方法定时精度高,但要求输入的符号数量多,同步建立时间长,适用于连续通信。而前馈同步算法利用插值滤波的方法,通过数字处理得到定时误差信息对信号进行采样,同步时间短,适用于突发通信系统。

同步误差检测算法有早迟门算法^[2]、Gardner算法^[3]、定时同步(O&M)算法^[4]和相关检测算法^[5]。早迟门算法处理简单、易于实现,但精度较低,难以应用

于高精度要求的场合。Gardner同步算法最早是针对二进制相移键控(BPSK)和正交相移键控(QPSK)系统提出的,后被不断地研究改进。文献[6]针对传输Gardner算法同步收敛时间长,无法应用于无线突发通信的问题,采用循环Gardner算法,反复利用有限数据,实现了每一帧突发数据的时钟恢复。文献[7]在基于4倍符号速率采样的Gardner同步算法基础上扩展到16倍符号速率采样,提升了高阶调制情况下定时同步的性能,但16倍过采样也显著增加了系统处理的复杂度。然而,Gardner算法本身受噪声影响较大,针对不同的调制方式时,定时误差也会有较大的差异,不利于多种调制方式混合使用^[8]。O&M算法虽然计算复杂度较Gardner算法高一些,但由于该算法对频偏不敏感,支持多种调制方式,误差估计的精度高,得到了广泛应用。文献[9]提出了一种多通道并行O&M算法处理架构,实现千兆量级的数据传输的定时恢复。文献[10]对O&M算法非线性变换环节的平方环算法^[11]和一次幂算法进行性能比较,一次幂定时检测算法性能略优。

文中对采用一次幂算法的O&M算法进行改进,

收稿日期:2023-03-12 修订日期:2023-05-18

对分段快速傅里叶变换(FFT)后的数据增加滑窗处理环节,既可以在保证同步精度的前提下有效减少同步收敛时间,又可以采用文献[9]中的并行处理架构,实现多通道数据并行处理。同时将改进的定时估计算法应用于BPSK、QPSK、8PSK、16QAM和64QAM系统进行仿真验证,表明改进算法具有广泛的适用性。

1 通信系统模型

基本的数字通信系统由发送端、信道和接收机组成,可用结构框图如图1所示。

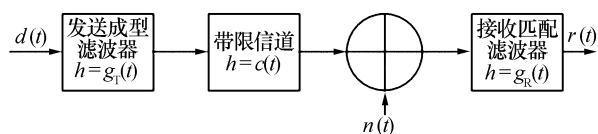


图1 基带数字通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of baseband digital communication system

待发送的基带信号可以表示为一个幅度为 a_n 、采样周期为 T_s 的脉冲序列来表示。

$$d(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n \delta(t - nT_s) \quad (1)$$

式中: δ 为单位冲击信号。 $d(t)$ 信号经过发送成型滤波、上变频、传输信道、下变频和接收匹配滤波后的接收信号可以表示为

$$r(t) = As(t)e^{j(2\pi\Delta f t + \Delta\varphi)} + n(t) \quad (2)$$

式中: $s(t)$ 为基带波形信号; A 为幅度值; Δf 为载频偏移; $\Delta\varphi$ 为相位偏移; $n(t)$ 为噪声。基带信号可以表示为式(3),其中 \otimes 表示卷积运算。

$$s(t) = d(t) \otimes g_T(t) \otimes c(t) \otimes g_R(t) \quad (3)$$

式中: $c(t)$ 为限带信道冲击响应函数; $g_R(t)$ 为接收匹配滤波器函数; $g_T(t)$ 为发送成型滤波器响应函数。

式(2)中表示的接收信号进行A/D采样后,假定存在位定时误差,则采样后的接收信号可以表示为

$$r(n) = As(nT_s - \tau)e^{j(2\pi\Delta f(nT_s - \tau) + \Delta\varphi)} + n((nT_s - \tau)), -\infty < n < \infty \quad (4)$$

式中: T_s 为采样周期; τ 为待求的位定时误差。定时同步算法就是对位定时误差进行估计判决,使系统尽可能地接近信号的最佳采样点。

2 定时同步算法

2.1 O&M 算法

设符号周期为 T ,采样周期 T_s ,满足 $T_s = T/N$,令位

定时误差 $\tau = \varepsilon T$,式(4)中表示的接收信号可以重写为

$$r(n) = As\left(\frac{nT}{N} - \varepsilon T\right)e^{j(2\pi\Delta f(\frac{nT}{N} - \varepsilon T) + \Delta\varphi)} + n\left(\frac{nT}{N} - \varepsilon T\right), -\infty < n < \infty \quad (5)$$

其信号包络可以表示为

$$x(n) = \left| As\left(\frac{nT}{N} - \varepsilon T\right) + n\left(\frac{nT}{N} - \varepsilon T\right) \right|, -\infty < n < \infty \quad (6)$$

O&M算法就是对接收到的采样数据的包络信号进行分段进行DFT运算,得到符号速率 $1/T$ 处的频谱分量为

$$X(m) = \sum_{n=mLN}^{(m+1)LN-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi n}{N}} \quad (7)$$

式中: L 为分段后每段的符号个数; m 为分段序号。此时,可得到定时误差

$$\hat{\varepsilon} = -\frac{1}{2\pi} \arg(X(m)) \quad (8)$$

式中: $\hat{\varepsilon}$ 为 ε 的无偏估计值。定时误差 ε 由定时频率偏移和定时相位偏移共同决定的,可表示为

$$\varepsilon = \omega t' + \theta \quad (9)$$

式中: ω 代表定时频偏, θ 代表定时相偏。由此可见,如果定时频偏不为0,定时误差会随着时间的推移而逐渐增大。

从式(7)和式(8)可以看出,该算法对载波频移和载波相偏不敏感,可以先于载波恢复前进行时钟同步。若采用4倍过采样时,无需任何三角运算即可完成频偏分量计算,待得到定时误差的无偏估计值后,再采用插值滤波算法,就可得到1倍采样率的最佳采样点数据值。

2.2 改进算法

O&M算法中的分段符号个数 L 对误差估计精度影响很大, L 越大,算法估计精度越高,同步收敛时间也会增加,在定时频偏的场合下的定时误差跟踪精度也会下降。

为了尽可能地降低同步收敛时间,取分段符号个数 $L=1$,式(7)变为

$$\tilde{X}(m) = \sum_{n=mN}^{(m+1)N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi n}{N}} \quad (10)$$

为了保证算法误差估计精度,对式(10)得到的结果进行滑窗累加,令窗长度为 W ,滑窗累加后结果可表示为

$$X'(k) = \sum_{k=w}^{k+W-1} \tilde{X}(k) \quad (11)$$

对滑窗累加后的结果进行式(8)的处理,得到最终的定时误差估计结果为

$$\varepsilon' = -\frac{1}{2\pi} \arg(X'(k)) \quad (12)$$

可见,本文中的改进思路就是将式(7)拆分为式(10)和式(11)两个步骤,解决了原算法中同步收敛时间与同步精度之间的矛盾,在保证算法同步精度的前提下,有效降低了同步收敛时间。

3 仿真与分析

O&M 算法对载波频移和载波相偏不敏感,因此,文中只对定时频偏和定时相偏进行讨论。在不同定时相偏、不同频偏场景下,本文对常用的 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM 调制方式进行时钟同步性能仿真分析,得到定时补偿值 ε' ,并与理论结果 ε 比对,计算得到均方误差值 σ 。

$$\sigma = E\{(\varepsilon' - \varepsilon)^2\} \quad (13)$$

由于 O&M 算法中的分段符号个数 L 对误差估计精度影响很大, L 越大,算法估计精度越高,但在定时频偏场合下的跟踪精度也会下降。

当 L 取 2 048 时,为了保证两种算法取用的采样点一致,改进算法中窗长度 W 取 512。两种算法在比特信噪比为 6 dB、定时相偏 $0.5T_s$ 、定时频偏 20 ppm 下的不同调制方式下的定时误差跟踪情况如图 2~图 5 所示。

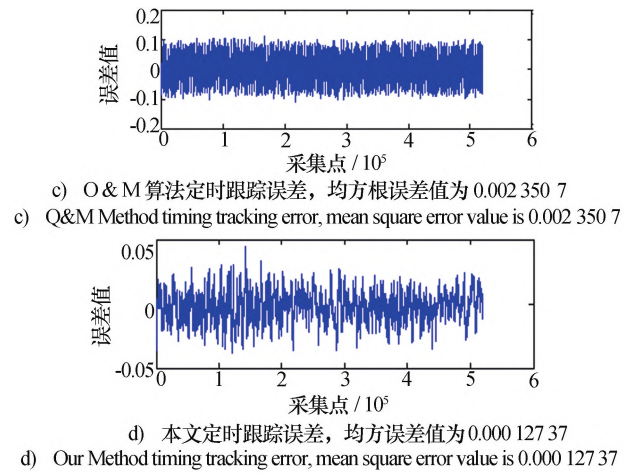
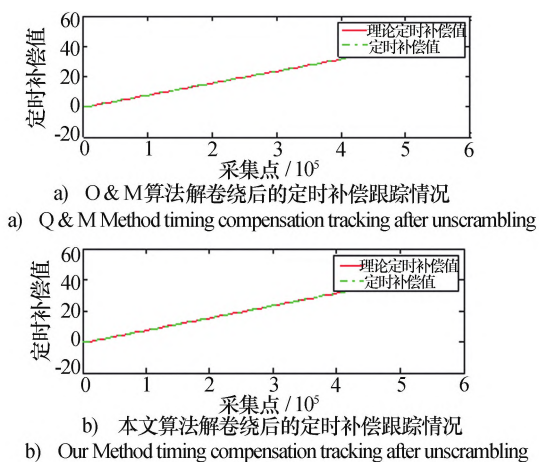


图 2 两种算法在 BPSK 模式下的定时跟踪情况
Fig. 2 Timing tracking of the two algorithms in BPSK mode

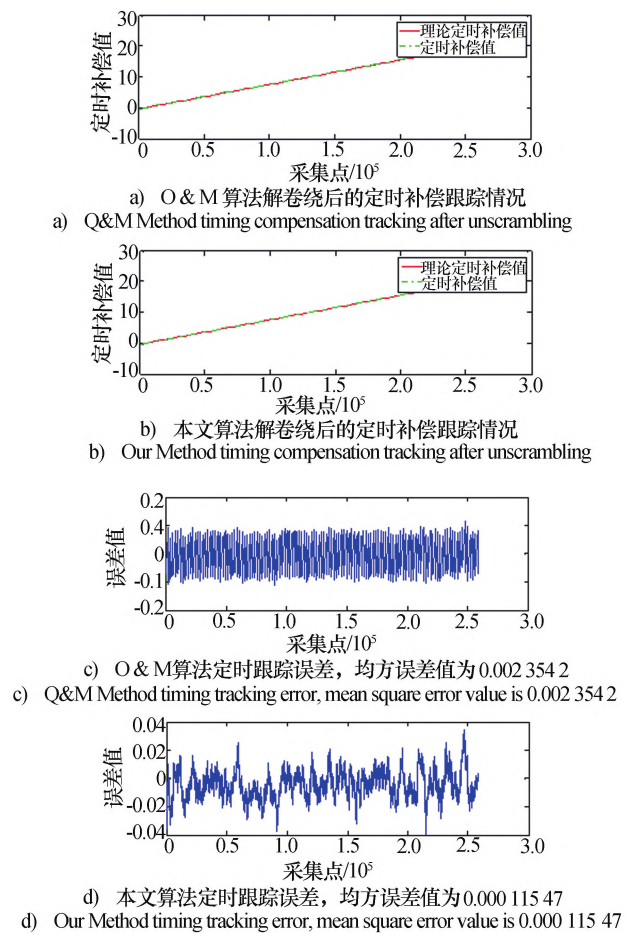
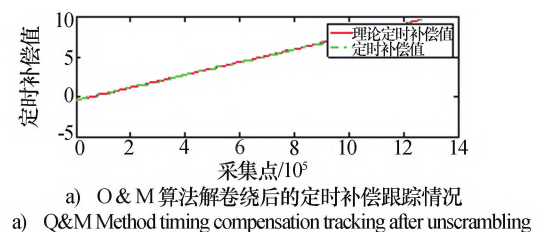
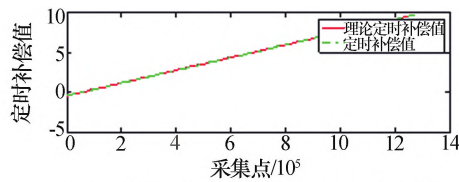
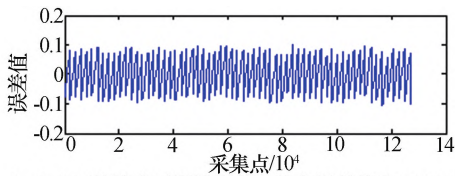


图 3 两种算法在 QPSK 模式下的定时跟踪情况
Fig. 3 Timing tracking of the two algorithms in QPSK mode

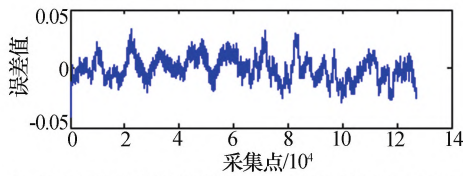




b) 本文算法解卷绕后的定时补偿跟踪情况
b) Our Method timing compensation tracking after unscrambling

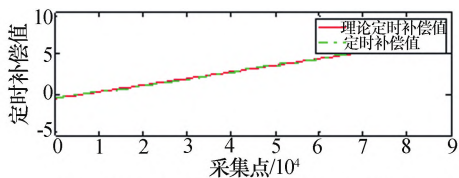


c) O & M算法定时跟踪误差, 均方误差值为0.002 327 9
c) Q&M Method timing tracking error, mean square error value is 0.002 327 9

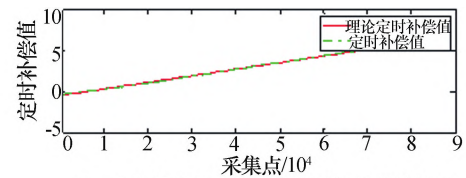


d) O & M算法定时跟踪误差, 均方误差值为0.000 102 55
d) Our Method timing tracking error, mean square error value is 0.000 102 55

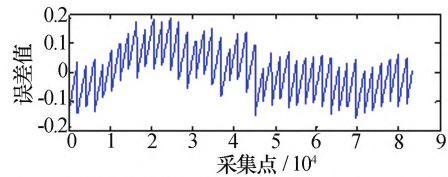
图4 两种算法在16QAM模式下的定时跟踪情况
Fig. 4 Timing tracking of the two algorithms in 16QAM mode



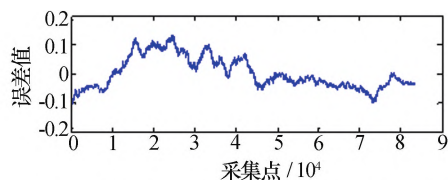
a) O & M算法解卷绕后的定时补偿跟踪情况
a) Q&M Method timing compensation tracking after unscrambling



b) 本文算法解卷绕后的定时补偿跟踪情况
b) Our Method timing compensation tracking after unscrambling



c) O & M算法定时跟踪误差, 均方误差值为0.005 211 8
c) Q&M Method timing tracking error, mean square error value is 0.005 211 8



d) 本文算法定时跟踪误差, 均方误差值为0.003 038 3
d) Our Method timing tracking error, mean square error value is 0.003 038 3

图5 两种算法在64QAM模式下的定时跟踪情况
Fig. 5 Timing tracking of the two algorithms in 64QAM mode

两种算法在比特信噪比为6 dB、12 dB, 定时频偏为0 ppm、20 ppm、100 ppm情况下, 不同调制方式下的定时跟踪均方误差值如表1所示。当 L 取1 024时, 改进算法中窗长度 W 取256。两种算法在比特信噪比为6 dB、定时相偏 $0.5T_s$ 、定时频偏20 ppm下的不同调制方式下的定时误差跟踪情况见表2所示。

表1 两种算法在 $L=2\ 048$ 下的定时跟踪均方误差值

Tab. 1 Timing tracking mean square error values of the two algorithms at $L=2\ 048$

调制模式	信噪比 6 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 0 ppm		信噪比 6 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 20 ppm		信噪比 6 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 100 ppm		信噪比 12 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 20 ppm		信噪比 12 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 100 ppm	
	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法
BPSK	0.000 09	0.000 08	0.002 351	0.000 127	0.057 02	0.000 80	0.002 30	0.000 067	0.056 89	0.000 68
QPSK	0.000 09	0.000 09	0.002 354	0.000 115	0.056 19	0.000 29	0.002 36	0.000 122	0.056 13	0.000 24
16QAM	0.000 07	0.000 07	0.002 328	0.000 103	0.054 04	0.000 53	0.002 33	0.000 093	0.056 33	0.000 49
64QAM	0.002 46	0.002 54	0.052 118	0.003 038	0.059 36	0.003 28	0.004 95	0.002 975	0.059 45	0.003 42

表2 两种算法在 $L=1\ 024$ 下的定时跟踪均方误差值

Tab. 2 Timing tracking mean square error values of the two algorithms at $L=1\ 024$

调制模式	信噪比 6 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 0 ppm		信噪比 6 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 20 ppm		信噪比 6 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 100 ppm		信噪比 12 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 20 ppm		信噪比 12 dB 定时相偏 $0.5T_s$ 定时频偏 100 ppm	
	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法	O&M 算法	本文算法
BPSK	0.000 18	0.000 18	0.000 77	0.000 207	0.014 29	0.000 415	0.000 633	0.000 079	0.014 197	0.000 315
QPSK	0.000 14	0.000 14	0.000 73	0.000 169	0.014 52	0.000 262	0.000 703	0.000 137	0.014 208	0.000 223
16QAM	0.000 13	0.000 12	0.000 68	0.000 149	0.014 31	0.000 353	0.000 669	0.000 124	0.014 267	0.000 325
64QAM	0.002 88	0.002 93	0.003 77	0.003 128	0.017 66	0.003 358	0.003 648	0.003 041	0.017 578	0.003 267

从表1、表2可知,在无定时频偏情况下, L 越大,定时跟踪精度越好;而在存在定时频偏情况下,随着 L 的增加,O&M算法的定时跟踪精度会下降。本文算法采用了滑窗运算的思路,有效地提升定时频偏场合下的跟踪精度,并对BPSK、QPSK、16QAM、64QAM等调制方式有效。

4 结束语

O&M算法具有同步精度高、对载波频偏相偏不敏感等优点而被突发通信系统广泛使用。该算法的同步精度需要较长的采样点数来保证,而在有定时频偏情况下,较长的采样点会影响定时误差跟踪精度。文中在O&M算法基础上增加滑窗处理环节,并对不同的信噪比、不同频偏参数进行仿真。仿真结果显示:本文算法在不存在频偏情况下,定时同步跟踪效果与原算法相当;在存在频偏情况下,本文算法的定时同步跟踪效果要明显好于原算法,且适用于BPSK、QPSK、16QAM和64QAM等调制方式。

参考文献 (References)

- [1] 高春芳,柯晓东,林 莉. 一种基于相关的短时突发信号解调方法[J]. 舰船电子对抗,2021,44(2):83-87.
GAO Chunfang, KE Xiaodong, LIN li. A demodulation method of short-time burst signal based on correlation[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(2): 83-87.
- [2] BHATTI B A, UMER M, AHMED W. Carrier and symbol synchronization in digital receivers using feedback compensation loop and early late gate on FPGA[C]// International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering Islamabad, Pakistan: [s. n.], 2014: 146-150.
- [3] GARDNER F M. Interpolation in digital modems-part I: fundamentals[J]. IEEE Transactions on Communication, 1993, 41(3): 501-507.
- [4] OERDER M, MYER H. Digital filter and square timing recovery[J]. IEEE Transactions on Communication, 1998, 36(5): 605-612.
- [5] 付博炜,李明齐. 一种抗频偏的定时同步方法及其性能分析[J]. 电讯技术,2021,61(6):744-749.

- FU Bowei, LI Mingqi. An anti-frequency offset time synchronization method and its performance analysis[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(6): 744-749.
- [6] 万晓峰,张 彧,姜 龙. 无线突发通信全数字接收机时钟恢复算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2010,50(5):801-804.
WAN Xiaofeng, ZHANG Yu, JIANG Long. All digital receiver timing adjustment algorithm in wireless burst communication[J]. J Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2010, 50(5): 801-804.
- [7] 韩孟来,倪永倩. 一种16倍采样的Gardner定时同步方法[J]. 电讯技术,2019,59(2):223-228.
HAN Menglai, NI Yongqing. A Gardner timing recovery method by 16 times sampling[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(2): 223-228.
- [8] MENGALI U, ANDREA A N D. Synchronization techniques for digital receivers. New York: Plenum Press, 1997.
- [9] 张永杰,孟庆凡,赵 煜. 千兆并行定时同步算法研究及实现[J]. 无线电通信技术,2019,45(2):202-205.
ZHANG Yongjie, MENG Qingfan, ZHAO Yu. Research and implementation of gigabit parallel symbol timing synchronization algorithm [J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(2): 202-205.
- [10] 王 汉,王力男. 突发信号的位定时同步研究[J]. 无线电通信技术,2017,43(1):27-29.
WANG Han, WANG Linan. Research on bit timing synchronization of burst signal [J]. Radio Communications Technology, 2017, 43(1): 27-29.
- [11] 陈永胜. 基于信号频域特征实现位定时恢复[J]. 无线电通信技术,2014,40(2):94-96.
CHEN Yongsheng. Implementation of bit timing recovery based on signal frequency domain characteristics[J]. Radio Communications Technology, 2014, 40(2): 94-96.

作者简介:

孙 健 男,1987年生,博士,高级工程师,研究方向为雷达信息与信号处理、雷达通信处理;

张 辉 男,1991年生,硕士,工程师,研究方向为雷达信息与信号处理、雷达通信处理;

张 坤 男,1997年生,硕士,助理工程师,研究方向为雷达信息与信号处理、雷达通信处理;