

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.013

引用格式:王晓峰,张国毅,田润澜,等. 相位编码信号码速率估计的最优小波尺度选择[J]. 电讯技术,2015,55(5):539-544. [WANG Xiaofeng, ZHANG Guoyi, TIAN Runlan, et al. Optimal Scale Choosing of PSK Signal Symbol Rate Estimation Based on Wavelet Transform[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(5):539-544.]

相位编码信号码速率估计的最优小波尺度选择*

王晓峰^{1,**}, 张国毅², 田润澜², 李大卫¹

(1. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001; 2. 空军航空大学 信息对抗系, 长春 130022)

摘 要:研究了小波变换应用于相位编码信号码速率估计的尺度选择问题,提出了一种最优小波尺度选择方法。以相位跳变的最佳检测为依据建立了最优小波尺度选择函数,然后结合功率谱平滑载频估计和信号编码形式完成最优小波尺度的选取,最后通过叠加模值频谱完成信号码速率估计。仿真实验表明,所提出的尺度选择方法将二相编码信号和四相编码信号的码速率估计信噪比门限分别降低了1 dB和3 dB。

关键词:电子侦察;相位编码信号;码速率估计;小波变换;最优尺度

中图分类号:TN911.7;TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)05-0539-06

Optimal Scale Choosing of PSK Signal Symbol Rate Estimation Based on Wavelet Transform

WANG Xiaofeng¹, ZHANG Guoyi², TIAN Runlan², LI Dawei¹

(1. Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Department of Information Electronic Countermeasure, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: The problem of choosing optimal wavelet scale in the phase shift keying (PSK) signal symbol rate estimation is studied. An optimal wavelet scale choosing method is proposed. According to the optimum detection of phase jump between the symbols in the PSK signal, the optimal wavelet scale choosing function is established. And then, based on the coded type of signal and the carrier frequency derived from smoothness power spectrum, the optimal wavelet scales are chosen. Finally, the spectrum of the optimal scale wavelet transform accumulated modulus is employed to realize the symbol rate estimation. Simulation results demonstrate that the proposed wavelet scale choosing method's signal-to-noise ratio (SNR) threshold of binary phase shift signal and quadrature phase shift signal has been reduced by 1 dB and 3 dB, respectively.

Key words: electronic reconnaissance; PSK signal; symbol rate estimation; wavelet transform; optimal scale

1 引言

相位编码信号通过相位调制获得大的时宽带宽积,显著降低了雷达系统的峰值发射功率,进而减小了被敌方电子侦察系统截获的概率,由于其技术简单、工程实现方便而广泛应用于现代低截获概率雷达系统中^[1-2],因此,实现相位编码信号的盲处理是

电子侦察中的一个重要课题。码速率是相位编码信号的一个重要参数,只有准确估计出信号的码速率才能完成信号解调,为后续电子干扰和反辐射武器的实施提供必要的信号参数。

小波变换具有自动调节时带宽的优点,被人们称为信号分析的数学显微镜。连续小波变换相当

* 收稿日期:2014-10-22;修回日期:2015-03-30 Received date:2014-10-22;Revised date:2015-03-30
** 通讯作者:wx870516@126.com Corresponding author:wx870516@126.com

于时频平面上的滤波器组,信号通过小波变换后,滤波器通带频率成分得到了增强,而阻带频率成分被抑制^[3]。相位编码信号的码元跳变时域上属于快变成分,即相对于信号载频属于高频成分,因此小波变换的滤波器组特性非常适合于检测相位编码信号码元跳变点,进而实现对码速率的估计。

文献[4]详细分析了 Haar 小波变换检测编码信号相位跳变的有效性,文献[5]在此基础上提出了基于多尺度小波模值叠加的码速率估计方法,该方法估计精度接近克拉美罗下限(CRLB),但文中没有给出最优小波尺度的设定方法,而小波尺度是影响码速率估计的关键因素,后续的研究工作也只是通过仿真实验给出了码速率估计的最优小波尺度^[6-10]。为此,本文提出了一种相位编码信号码速率估计的最优小波尺度选择方法。文中首先以检测相位跳变为依据建立了最优尺度选择函数,然后针对信号的不同相位跳变值,选取相应的最优双尺度,最后计算最优尺度小波变换叠加模值的频谱完成码速率的估计。仿真实验验证了该尺度选取方法在低信噪比下码速率估计的有效性。

2 小波变换码速率估计

相位编码信号的表达式如下:

$$s(t)=A\sum_iu_T(t-iT_b)\exp[j(\omega_c t+\theta_c+\varphi_i)],$$
$$\varphi_i\in\{2\pi(m-1)/M\}_{m=1}^M。$$
 (1)

式中, A 为信号幅度, T_b 为码元宽度, ω_c 为信号载波频率, $u_T(t)$ 为门函数, θ_c 为信号初始相位, φ_i 为相位调制函数, M 为编码个数。

信号小波变换定义为

$$WT(a,n)=\frac{1}{\sqrt{a}}\sum_k s(k)\psi^*\left(\frac{k-n}{a}\right)。$$
 (2)

式中, $\psi(n)$ 是母小波, a 为尺度因子, n 为小波函数的位移。Haar 小波是具有紧支撑的正交小波,非常适合于探测信号的突变成分。离散的 Haar 小波表达式为

$$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{k}{a}\right)=\begin{cases}1/\sqrt{a}, & k=-a/2,-a/2+1,\cdots,-1 \\ -1/\sqrt{a}, & k=0,1,\cdots,a/2-1 \\ 0, & \text{其他}\end{cases}。$$
 (3)

在处理相位编码信号时,当 Haar 小波位于一个码元周期内部,即 $(i-1)T+a/2\leq n\leq iT-a/2$ 时,小波变换模值为

$$|WT(a,n)|_1=2\sqrt{\frac{A}{a}}\left|\frac{\sin^2(\omega_c a/4)}{\sin(\omega_c/2)}\right|。$$
 (4)

当 Haar 小波位于码元跳变点处,即 $n=iT$ 时,小波变换模值为

$$|WT(a,n)|_2=2\sqrt{\frac{A}{a}}\left|\frac{\sin(\omega_c a/4)\sin(\omega_c a/4+\alpha/2)}{\sin(\omega_c/2)}\right|。$$
 (5)

对比式(4)和式(5)可知,当小波内部不存在相位跳变时,小波模值是一个与时间无关常数;而当小波内部存在相位跳变时,小波模值不再是一个常数,即小波变换的模值包含信号的相位跳变信息,因此小波模值可以实现信号相位跳变的检测,进而实现码速率估计。在检测相位跳变的过程中,不同尺度的小波变换的检测性能不同,小尺度小波的跳变点定位能力强,而抗噪性较差;大尺度小波的抗噪性较强,而定位能力较差。为解决此矛盾,文献[4]提出了双尺度小波模值叠加的码速率估计方法。该方法综合了小尺度小波的定位能力和大尺度小波的抗噪性,并且不同小波尺度的叠加也可以进一步减小噪声的影响,码速率估计的整体性能得到了显著提升。

相位跳变点之间的间隔是编码信号码元宽度的整数倍,最小间隔即为信号码元宽度,因此可以通过小波模值频谱的峰值估计信号码速率^[3]。双尺度小波模值叠加解决了定位能力与抗噪性的矛盾,但如何选择最优尺度是决定估计性能的关键因素,为此本文下一节提出了一种码速率估计的最优双尺度选择方法。

3 最优小波尺度选取

小波尺度的选择是影响码速率估计性能的关键因素,而直接定量分析小波尺度与码速率估计性能的关系十分困难。信号码速率的估计性能取决于信号相位跳变点的检测性能,因此实现相位跳变最优检测的小波尺度即为码速率估计的最优尺度。要使相位跳变检测性能最佳,需要使包含相位跳变的小波模值与不包含相位跳变的小波模值区分性最大,即模值差最大。也就是说,相位跳变最佳检测的小波尺度即为使式(4)和式(5)相差最大的尺度。因此,小波尺度的最优选择函数可以定义为

$$D(a,\omega_c,\beta)=||WT(a,n)|_1-|WT(a,n)|_2|。$$
 (6)

将式(4)和式(5)代入式(6)得

$$D(a,\omega_c,\beta)=2\sqrt{\frac{A}{a}\frac{|\sin(\omega_c a/4)|}{|\sin(\omega_c/2)|}}\cdot$$
$$||\sin(\omega_c a/4+\beta/2)|-|\sin(\omega_c a/4)||。$$

(7)

最优小波尺度可以表示为

$$a_{\text{optm}}=\text{argmax}\{D(a,\omega_c,\beta)\}。$$

(8)

式(8)表明,最优小波尺度的选择与相位跳变值 β 和信号载频 ω_c 有关,相位编码信号载频可以通过频谱进行估计,而相位跳变值与信号编码形式有关,二相编码(BPSK)信号的相位跳变为 π ,而四相编码(QPSK)信号的相位跳变则包含 $\pi/2,\pi,3\pi/2$ 。归一化载频值 $\omega_c=0.1$,BPSK 信号($\beta=\pi$)的尺度选择函数曲线如图 1 所示。

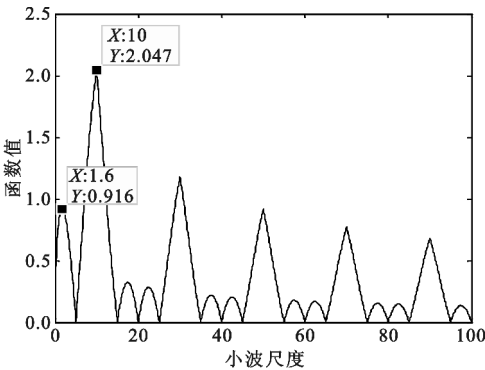
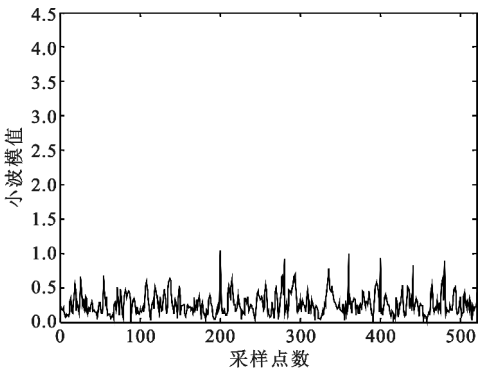


图 1 BPSK 尺度选择函数曲线

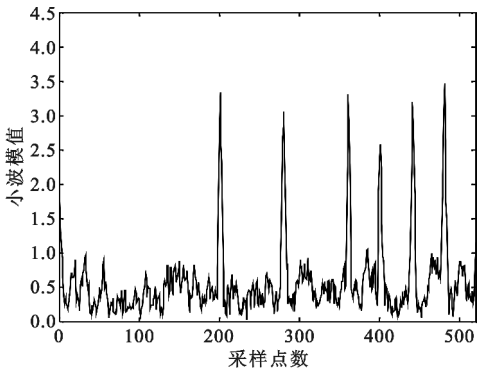
Fig. 1 The optimal scale choosing function of BPSK

由图 1 可知,当尺度 $a=10$ 时,尺度选择函数取得最大值,即此时的相位跳变检测性能最佳,也即 $a=10$ 为码速率估计的最优小波尺度。考虑到相位跳变点检测的抗噪性和准确性,在估计码速率时需要叠加双尺度模值,因此还需选择第二个最优尺度。虽然在尺度 $a=10$ 附近的尺度选择函数取值较大,但由于双尺度是为了综合相位跳变检测的定位能力与抗噪性,而两个较为接近的尺度不具有这种特性,并且小波尺度不能大于信号码元宽度^[3],因此第二个最优尺度选择曲线中的第一个峰值,即 $a=1.6$ 。实际信号处理中可以直接搜索最优尺度选择函数的前两个峰值,提取峰值对应的两个尺度作为码速率估计的最优双尺度。图 2 为 13 位 Baker 码信号在最优双尺度下的小波变换模值以及双尺度叠加模值,信噪比 6 dB。图 2 表明,小尺度小波模值峰值较窄,定位准确,但噪声基底相对较大;而大尺度小波模值峰值较宽,定位模糊,但噪声基底相对较小。经过双尺度模值叠加后,较好地综合了两个尺度各自

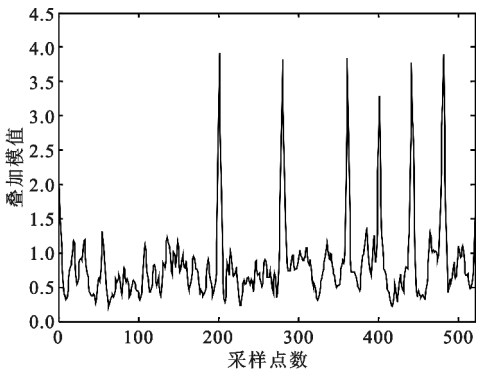
的优点,叠加模值图既具有较好的“信噪比”,又具有较高的定位精度。



(a) 最优小尺度



(b) 最优大尺度

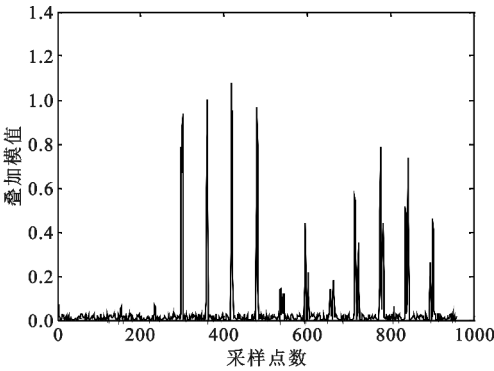


(c) 双尺度叠加

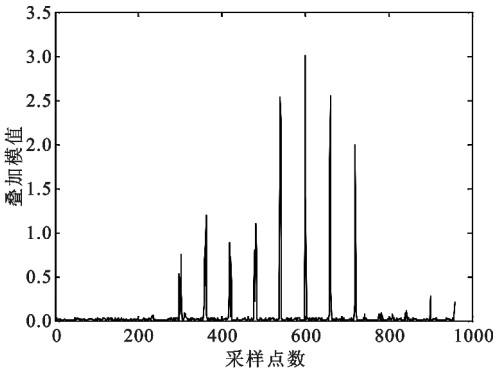
图 2 Baker 码最优尺度小波模值

Fig. 2 The optimal scale wavelet modulus of Baker code

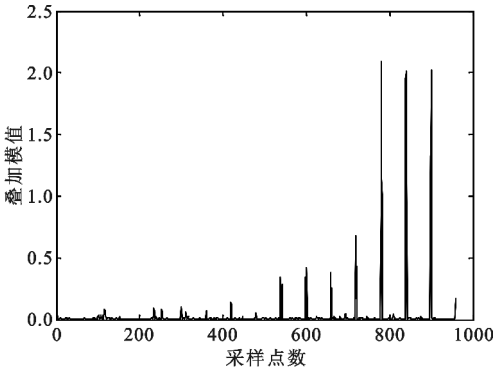
QPSK 信号的可能相位跳变值有 3 个,即 $\pi/2,\pi,3\pi/2$,因此 QPSK 信号需要选择 3 组最优双尺度,最后将 3 组最优双尺度的叠加模值进行二次叠加以实现信号相位跳变的最优检测。图 3 为 Frank 码信号的 3 组最优双尺度叠加模值和二次叠加模值,仿真中 Frank 码信号码元个数 $M=16$,相应的 15 个跳变相位为 $[0,0,0,0,\pi/2,\pi/2,\pi/2,\pi/2,\pi,\pi,\pi,\pi,3\pi/2,3\pi/2,3\pi/2]$,信噪比 6 dB。



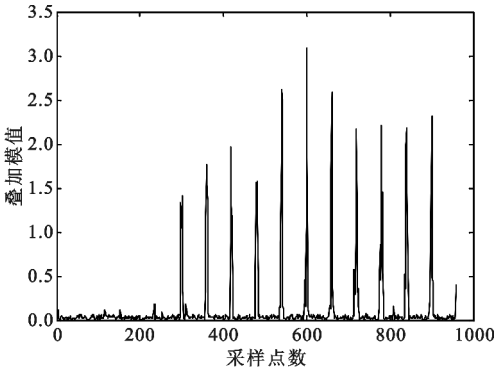
(a) $\beta=\pi/2$ 时双尺度叠加模值



(b) $\beta=\pi$ 时双尺度叠加模值



(c) $\beta=3\pi/2$ 时双尺度叠加模值



(d) 二次叠加模值

图3 Frank 码信号最优尺度模值图

Fig.3 The optimal scale wavelet modulus of Frank code

图3表明,不同相位跳变值的双尺度叠加模值分别实现了对应相位跳变的最佳检测,而二次叠加模值实现了整个 QPSK 信号跳变相位的最佳检测。根据不同的相位跳变值选择合理的小波尺度,进而实现码速率的最优估计,这是其他尺度选择方法所不具备的性能,仿真实验部分将验证本文尺度选择方法对 QPSK 信号码速率估计的优越性。

4 算法实现

实际电子侦察中相位编码信号的载频是一个未知参数,因此需要预先估计信号载频,本文采用文献[11]给出的相位编码信号功率谱全序列频域平滑公式估计载频:

$$R_s(k)=\frac{1}{L}\sum_{l=k}^{k+L-1}|R(l)|^2。$$
 (9)

式中, $R(l)$ 为信号 $s(t)$ 的频谱, L 为平滑窗宽度。设平滑后功率谱 $R_s(k)$ 的最大幅值为 $R_s(k_0)$,搜索 $R_s(k)$ 中大于 $0.5R_s(k_0)$ 的所有谱线,计算这些谱线的重心 $\hat{k}$,则载频的估计值为

$$\hat{\omega}_e=\frac{2\pi\hat{k}f_s}{N_f}。$$
 (10)

式中, N_f 为计算频谱的 FFT 长度, f_s 为信号采样频率。估计出信号载频后,结合式(8)即可计算出相应的最优小波尺度。

相位编码信号码速率估计的具体步骤如下:

步骤 1:计算截获相位编码信号的频谱,利用式(9)进行功率谱平滑;

步骤 2:搜索平滑后功率谱中大于 $0.5R_s(k_0)$ 的所有谱线,计算这些谱线的重心,由式(10)得出信号的载频估计值;

步骤 3:根据载频估计值和相位跳变值计算最优尺度选择曲线,并自动选择曲线前两个峰值对应尺度为最优尺度,BPSK 信号只需选择一组最优尺度,QPSK 信号则需要选择 3 组最优尺度;

步骤 4:计算各最优尺度下相位编码信号的小波变换,并取模值;

步骤 5:叠加最优双尺度的小波模值,如信号为 QPSK 信号,还需要进行二次模值叠加;

步骤 6:计算叠加模值的频谱,提取第一峰值谱线对应的频率,得出码速率估计值(为提高谱线峰值提取的准确性,可以采用文献[12]提出的谱线提取算法)。

5 仿真分析

实际电子侦察的截获信号中含有噪声,因此基于功率谱平滑的载频估计必然存在误差,为验证载频估计误差对最优尺度选择的影响,进行如下仿真实验,仿真信号为 31 位 M 序列和为 64 位 Frank 码,信号载频为 10 MHz,采样频率为 80 MHz,码元宽度为 500 ns,设置载频估计误差范围为 0% ~ 5%,步进 0.5%,每个误差下进行 500 次蒙特卡洛仿真实验,尺度选择的正确率如图 4 所示,图中曲线为两种信号最优尺度选择正确率的平均值。

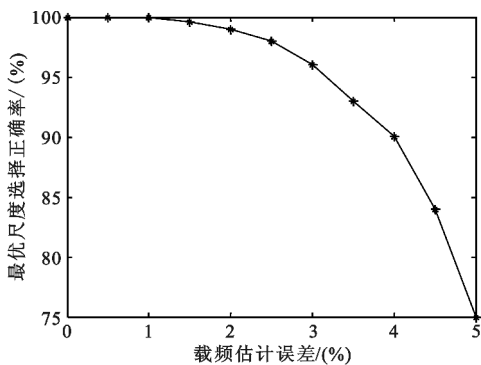


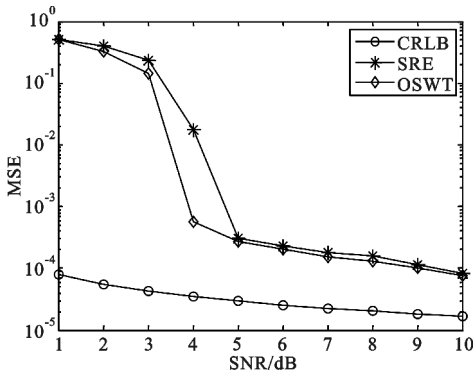
图 4 载频估计误差的影响

Fig. 4 The influence of carrier frequency estimation error

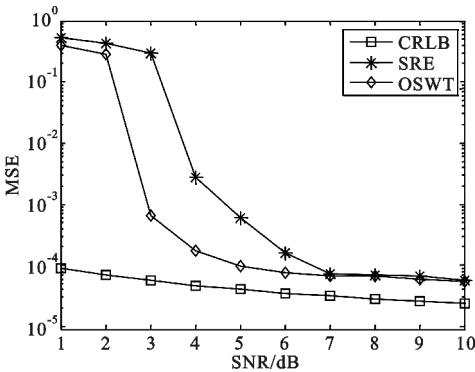
仿真结果表明,载频估计误差对最优尺度选择的影响很小,载频估计误差为 4% 时,最优尺度选择的准确率仍然大于 90%。仿真实验还表明,即使错误的最优尺度也十分接近真实最优尺度,码速率的估计性能仍然优于基于经验设定的小波尺度。实际应用中信号频率的估计精度能够满足最优尺度的选取要求。

为进一步验证本文算法(简记为 OSWT)的码速率估计性能,仿真实验中将本文方法与文献[10]给出的尺度选择方法(SRE,尺度为 $a_1 = 0.4T_b$, $a_2 = 0.6T_b$, $a_3 = 0.75T_b$)以及 CRLB 进行比较。仿真信号及参数不变,信噪比步进 1 dB,每个信噪比下进行 500 次蒙特卡洛仿真实验。图 5 给出了信号码速率估计的最小均方误差(MSE)。仿真结果表明,当信噪比较高时,基于两种尺度选择方法的小波变换均能有效地完成码速率估计,且归一化均方误差均接近 CRLB。但当信噪比降低时,相比文献[10]的尺度选择方法,本文尺度选择方法的码速率估计均方误差更小,即本文方法码速率估计的信噪比门限较低。这是由于本文以相位跳变检测性能最佳为依据选择码速率估计的最优小波尺度,此尺度下的小波

变换在信号相位跳变点的峰值最大,相对压低了噪声基底,因而能够在较低信噪比下完成码速率估计。对比分析图 5(a)和图 5(b)可知,相比文献[10]的尺度选择方法,本文提出的尺度选择方法对 BPSK 信号码速率估计的信噪比门限降低大约 1 dB,而对 QPSK 信号码速率估计的信噪比门限降低大约 3 dB,即本文方法对 QPSK 信号码速率的估计性能有较大提高。这是由于理论上码速率估计的最优尺度与相位跳变值有关,QPSK 信号相位跳变取值为 3 个,需要根据每个相位跳变值选取不同的最优小波尺度,而其他的尺度设置方法不具备此特点^[6-10],因此对 QPSK 信号的估计性能不佳。



(a) 31 位 M 序列



(b) 64 位 Frank 码

图 5 码速率估计性能对比

Fig. 5 The performance comparison of symbol rate estimation

6 结束语

本文研究了小波变换应用于相位编码信号码速率估计时的尺度选择问题,提出了以检测相位跳变为依据的最优小波尺度选择方法。该方法根据编码信号的不同相位跳变值选择最优小波尺度,通过叠加最优尺度小波模值完成码速率估计,显著降低了相位编码信号码速率估计的信噪比门限,仿真实验

验证了该最优小波尺度选取方法的有效性。噪声仍然是影响码速率估计的关键因素,如何更有效地抑制噪声,进一步提高码速率估计方法的抗噪性是下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] Pace P E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar [M]. Norwood, MA: Artech House, 2004:113-166.
- [2] 刘勇,张国毅,李科学. 脉内相位编码信号的识别与码序恢复[J]. 电讯技术,2014,54(2): 139-144.
LIU Yong, ZHANG Guoyi, LI Kexue. Recognition and Symbol Sequence Recovery of PSK Signals on Pulse[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(2): 139-144. (in Chinese)
- [3] Daubechies I. The wavelet transform, time frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1990,36(5): 961-1005.
- [4] Ho K C, Prokopiw W, Chan Y T. Modulation identification of digital signals by the wavelet transform[J]. IEEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(4):169-176.
- [5] Chan Y T, Piew J W, Ho K C. Symbol rate estimation by the wavelet transform[C]//Proceedings of 1997 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Hong Kong: IEEE,1997:177-180.
- [6] 李利,司锡才,柴娟芳. 基于双尺度连续小波变换的二相编码信号识别[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(9): 1432-1435.
LI Li, SI Xicai, CHAI Juanfang. Recognition of two phase-code signals based on double-scale CWT [J]. Systems Engineering and Electronics,2007,29(9): 1432-1435. (in Chinese)
- [7] 李少凯,刘承承,李刚磊. 数字通信信号小波变换尺度选取问题研究[J]. 计算机与数字工程,2010,38(7): 33-35.
LI Shaokai, LIU Chengcheng, LI Ganglei. Study on the Appropriate Scale of WT for Digital Modulation Signals [J]. Computer&Digital Engineering,2010,38(7): 33-35. (in Chinese)
- [8] 王欢,李昌兴,李永壮. 基于小波变换的一种通信信号码元速率估计算法[J]. 西安邮电大学学报,2013,18(1): 58-61.
WANG Huan, LI Changxing, LI Yongzhuang. Symbol rate estimation algorithm for communication signals based on wavelet transformation [J]. Journal of Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, 2013, 18(1): 58-61. (in Chinese)
- [9] 宁辉,陈超. 基于小波变换的二相编码信号检测[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2011,29(6): 524-528.
NING Hui, CHEN Chao. Detection of Two Phase-Code

Signal Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2011, 29(6): 524-528. (in Chinese)

- [10] 邓振森,刘渝. 基于多尺度 Haar 小波变换的 MPSK 信号码速率盲估计[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(1): 36-40.
DENG Zhenmiao, LIU Yu. Blind Symbol Rate Estimation of MPSK Signals Based on Multiscale Haar Wavelet Transform [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008,30(1): 36-40. (in Chinese)
- [11] Mammone R J, Rot haker R J, Podilchuk C I, et al. Estimation of carrier frequency modulation type and bit rate of an unknown modulated signal [C] // Proceedings of 1987 IEEE International Conference on Communications. Seattle: IEEE,1987:1006-1012.
- [12] 周龙键,罗景青,房明星. 基于 IIN 算法和修正 Rife 算法的正弦波频率估计算法[J]. 数据采集与处理,2013,28(6): 839-842.
ZHOU Longjian, LUO Jingqing, FANG Mingxing. Frequency Estimation of Sinusoid Wave Based on IIN Algorithm and Rife Algorithm [J]. Journal of Data Acquisition and Processing,2013,28(6):839-842. (in Chinese)

作者简介:



王晓峰(1987—),男,河北承德人,2011年获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为信号与信息处理;

WANG Xiaofeng was born in Chengde, Hebei Province, in 1987. He received the M. S. degree in 2011. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns signal and information processing.

Email:wx870516@126.com

张国毅(1965—),男,吉林长春人,2002年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为信号与信息处理和电子对抗;

ZHANG Guoyi was born in Changchun, Jilin Province, in 1965. He received the Ph. D. degree in 2002. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns signal and information processing, electronic countermeasure.

田润澜(1973—),女,吉林长春人,2005年获硕士学位,现为副教授,主要研究方向为雷达极化信息处理和电子对抗;

TIAN Runlan was born in Changchun, Jilin Province, in 1973. She received the M. S. degree in 2005. She is now an associate professor. Her research concerns radar polarization information processing, electronic countermeasure.

李大卫(1983—),男,山东烟台人,2009年获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为水声信号处理。

LI Dawei was born in Yantai, Shandong Province, in 1983. He received the M. S. degree in 2009. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns underwater acoustic signal processing.