

# 基于小波变换的码元速率估计 优化算法

谭晓衡<sup>1,2</sup> 张雪静<sup>2</sup>

**摘 要** 针对低信噪比下 MPSK (M-ary phase shift keying) 信号的码元速率估计问题, 提出一种优化算法. 该算法无需先验知识, 通过 Hilbert 变换提取瞬时相位基带序列, 经多尺度小波变换, 对每个尺度下的小波系数的模值的平方进行叠加, 对叠加后的结果再进行功率谱计算, 在码元速率整数倍处有离散谱线, 估计正确率在信噪比大于 1 dB 时大于 90%.

**关键词** MPSK 信号, 码元速率估计, Hilbert 变换, 小波变换

**引用格式** 谭晓衡, 张雪静. 基于小波变换的码元速率估计优化算法. 自动化学报, 2020, 46(8): 1748–1752

**DOI** 10.16383/j.aas.c170518

## Symbol Rate Estimation Based on Wavelet Transform

TAN Xiao-Heng<sup>1,2</sup> ZHANG Xue-Jing<sup>2</sup>

**Abstract** To solve the problem of symbol rate estimation for MPSK signals at low signal-to-noise ratio (SNR), an optimization algorithm is proposed. Without any prior knowledge, this method extracts the baseband sequence of instantaneous phase by Hilbert transform. Then, multi-scale wavelet transform is applied to the above results. The square of the modulus of the wavelet coefficients at each scale is superposed. Finally, the power spectrum of the superposition result is calculated. Theoretical analysis shows that discrete spectral lines appear at the position of integer-times symbol rate. The results show that the correct rate of MPSK signal's symbol rate estimation is larger than 90% at SNR > 1 dB.

**Key words** MPSK signals, symbol rate estimation, Hilbert transform, wavelet transform

**Citation** Tan Xiao-Heng, Zhang Xue-Jing. Symbol rate estimation based on wavelet transform. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(8): 1748–1752

码元速率也称为符号速率, 它是数字调制信号的重要特征之一. 码元速率估计在很多领域都有着非常广泛的应用, 尤其是在非合作通信系统中有着重要地位, 它是后续数字调制信号识别与解调的基础, 此外, 它还可应用在无线电频谱监测领域. 这个参数可能不是先验已知的, 需要在接收机中进行估计, 对于 MPSK 信号的码元速率估计, 常见的有基于小波分析和基于循环平稳特征的方法.

收稿日期 2017-09-11 录用日期 2018-02-26  
Manuscript received September 11, 2017; accepted February 26, 2018

国家自然科学基金 (61571069), 中央高校基本科研业务费 (106112017CD-JQJ168817) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61571069), Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112017CDJQJ168817)

本文责任编辑 付俊  
Recommended by Associate Editor FU Jun

1. 生物感知与智能信息处理重庆市重点实验室 重庆 400044 2. 重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400044

1. Chongqing Key Laboratory of Bio-perception & Intelligent Information Processing, Chongqing 400044 2. School of Micro-electronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044

基于小波分析的方法, 文献 [1] 提出基于双尺度小波变换实现了 MPSK 信号的码元速率估计, 该方法对 2PSK (Binary phase shift keying) 信号在 3 dB 及以上时估计正确率达到 90% 以上, 而对 4PSK (Quadrature phase shift keying) 信号估计效果不佳. 文献 [2] 提出 Morlet 小波变换与自相关结合, 再利用快速傅氏变换 (Fast Fourier transformation, FFT) 和三点插值算法估计 MPSK 信号的码元速率, 该算法估计效果好但实现较为复杂. 文献 [3] 提出二次小波变换与循环累积量相结合的算法, 该算法在 0 dB 以上估计效果良好, 但由于引进了循环累积量增加了复杂度, 实时性不强. 文献 [4] 提出一种在无先验知识的条件下基于小波变换的 MPSK 信号码元速率估计算法, 在低载噪比下有良好效果. 文献 [5] 首次提出通过构造与原调制信号码率一致的单极性脉冲序列和功率谱分析, 检测其在码元速率整数倍处出现的离散谱线, 实现了信号的码元速率估计. 但是该算法在对 MPSK 信号进行码元速率估计时, 需要通过改变延迟时间搜索谱线来提高检测性能, 且提取的基带序列较易受噪声影响. 文献 [6] 提取已调信号的基带序列再小波变换, 计算谱特征, 对 2PSK 信号在大于 10 dB 时估计正确率大于 90%, 对 2PSK 信号性能不佳.

基于循环平稳特征的方法, 由于通信信号具有周期平稳性的特点, 其循环平稳特征包含了码元速率等参数信息. 文献 [7] 提出利用循环自相关函数实现了 MPSK 信号的码元速率估计, 在 0 dB 以上估计效果良好, 但对 4PSK 信号在高信噪比下表现效果不佳, 而且这种方法计算量较大, 复杂度较高. 文献 [8] 提出对信号经离散小波消噪, 利用信号在小波域的循环平稳特征实现码元速率的估计, 该方法估计效果好, 但需要已知载频的先验信息, 以及引入了循环平稳特征增加了复杂度.

针对上述情况, 本文提出了一种瞬时相位提取和多尺度小波变换相结合的 MPSK 信号码元速率估计的优化算法, 该算法复杂度不高, 在低信噪比下估计性能良好, 而且在不同信噪比下估计结果性能稳定, 且与文献 [5] 中文未提到的数字基带信号码元速率估计性能较为接近.

## 1 载频的估计

循环重叠 Welch 功率谱 (Circular overlap Welch spectrum, COWelch) 是对 Welch 功率谱的改进<sup>[9]</sup>, 以分割段数  $k = 2$ , 重叠率  $r = 2/3$  为例: 它是将长度为  $L$  的数据首先平均分割成 2 段, 选取其中一段作为参照, 再按照重叠率为  $2/3$  选取第二段, 以此类推, 另外为了得到更加平滑的功率谱, 也在数据段的首尾选取了 2 小段, 计算时通过加窗截取得到不同的数据子段, 对每个数据子段的功率谱进行分段累加, 即为循环重叠功率谱值. 图 1 表示截取每个数据子段的窗函数.

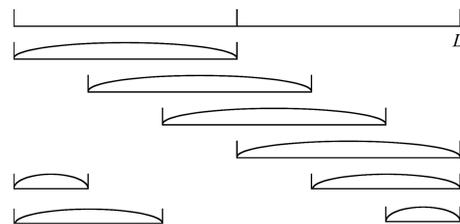


图 1 子段的窗函数

Fig. 1 Window function of segment

最终的功率谱表示为<sup>[9]</sup>:

$$S_{xx}(k) = \frac{1-r}{k} \left\{ \sum_{i=1}^{\frac{k-1}{1-r}+1} S_{xx}^{(i)}(k) + \sum_{i=\frac{k-1}{1-r}+2}^k S_{xx}^{(i)}(k) \right\} \quad (1)$$

其中<sup>[9]</sup>:

$$S_{xx}^{(i)}(k) = \left( \sum_{n=0}^{L-1} w^{(v_i)} \left( \frac{n}{L} \right)^2 \right)^{-1} |X_{w^{(v_i)}}^{(i)}(k)|^2 \quad (2)$$

$$X_{w^{(v_i)}}^{(i)}(k) = \left( \sum_{n=0}^{L-1} x^{(i)}(n) w^{(i)} \left( \frac{n}{L} \right) e^{-\frac{2\pi j k n}{L}} \right) e^{-\frac{2\pi j k \cdot (1-r)}{L}} \quad (3)$$

然后采用功率谱重心公式对载频进行估计<sup>[9]</sup>:

$$f = \frac{\sum i P(i)}{\sum P(i)} \cdot \frac{f_s}{N} \quad (4)$$

通过计算功率谱的均值与标准差的和来设置门限, 排除小于门限的点, 然后按上式进行计算, 得到载频的估计, 之后的瞬时相位去线性相位会用到。此种方法对 MPSK 信号载频估计在 0 dB 以上时都有较为精确的估计结果, 这为获得与原序列接近的瞬时相位基带序列奠定了基础。

## 2 小波消噪

与传统的去噪方法相比, 如线性滤波和非线性滤波, 采用离散小波变换可以避免传统去噪方法的一些局限性, 能够保留信号的非平稳特性和相关性, 因此本文采用离散小波变换对信号进行消噪处理。

小波消噪的过程一般可以分为 3 个步骤<sup>[10]</sup>:

1) 信号的小波分解。确定小波基的种类和分解层数, 然后进行分解计算。本文中选用 Haar 小波作为小波基, 分解层数选为 7。

2) 小波分解高频系数的阈值量化。对每个分解尺度下的高频系数进行软阈值量化处理。本文不进行阈值量化处理。

3) 小波重构。根据小波分解的最底层低频系数和各层高频系数进行一维小波重构。本文考虑到噪声是高频信号, 分解后一般是在高频系数的第一层和第二层, 所以重构时舍去第一层和第二层的高频系数。

仿真实验证明, 这种强制去噪处理的方法简单, 而且去噪后的信号也比较平滑, 也不会对接下来要提取的瞬时相位基带序列的阶跃点造成影响。

本文采用了两次小波消噪, 一是在提取瞬时相位基带序列之前, 二是在提取瞬时相位基带序列之后。通过两次 7 层离散 Haar 小波消噪, 能很好地滤除部分噪声。

## 3 瞬时相位基带序列的提取

设接收到的信号模型为:

$$r(i) = s(i) + n(i) \quad (5)$$

$s(i)$  表示 MPSK 调制信号,  $n(i)$  表示零均值高斯白噪声,  $s(i)$  的一般表达式为<sup>[5]</sup>:

$$s(i) = A \cos\left(\frac{2\pi f_c i}{f_s} + \theta(i) + \phi\right) \quad (6)$$

其中,

$$\theta(i) = \sum_{p=1}^{\infty} a_p g\left(\frac{i}{f_s} - pT_d\right), a_p \in \left\{ \frac{2\pi l}{M} \right\}_{l=0}^{M-1} \quad (7)$$

式中  $i = 0, 1, 2, \dots, A$  为幅度,  $\theta(i)$  为载波相位,  $\phi$  为初始相位,  $f_c$  为载波频率,  $f_s$  为采样频率,  $M$  为调制阶数,  $T_d$  为码元宽度,  $g(\cdot)$  是幅度为 1 持续时间为  $T_d$  的矩形脉冲。

利用 Hilbert 变换提取信号瞬时相位的方法如下<sup>[11]</sup>:

1) 对接收到的信号  $r(i)$  作 Hilbert 变换, 计算其瞬时相位  $\varphi(i)$ 。

2) 由于求得的瞬时相位  $\varphi(i)$  是以模  $2\pi$  来计算的, 是有折叠的相位, 所以需要对接相位进行修正, 修正相位序列  $C(i)$  由下式计算:

$$C(i) = \begin{cases} C(i-1) - 2\pi, & \varphi(i+1) - \varphi(i) > \pi \\ C(i-1) + 2\pi, & \varphi(i) - \varphi(i+1) > \pi \\ C(i-1), & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$C(1) = 0$$

得到无折叠相位:

$$\phi(i) = \varphi(i) + C(i) \quad (9)$$

3) 进行去线性相位处理:

$$\phi_{NL}(i) = \phi(i) - \frac{2\pi f_c i}{f_s} \quad (10)$$

这时得到的瞬时相位基带序列, 因为噪声的原因, 会出现很多幅度较小的假峰值, 由于小波变换对跳变点非常敏感, 为避免对其产生影响, 需进行一次中值滤波, 滤波的阶数根据实际的仿真结果可设置为 27 到 30。中值滤波可以很好地消除获得的基带序列中的大多数不是由于相位跳变引起的跳变点, 从而使得基带序列的小波变换结果只含有少量由噪声引起的脉冲序列。

## 4 瞬时相位基带序列的小波变换

为了方便, 将式 (10) 的  $\phi_{NL}(i)$  记为  $X(i)$ , 所以得到的基带序列可以表示为<sup>[5]</sup>:

$$Y(i) = X(i) + n_0(i) \quad (11)$$

$n_0(i)$  表示基带序列中的噪声。

对基带序列作离散小波变换, 离散小波变换由下式表示:

$$W_Y(a, n) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_i Y(i) \psi^*\left(\frac{i-n}{a}\right) \quad (12)$$

考虑到 Haar 小波计算简便, 且与提取的瞬时相位基带序列在波形上具有相似性, 因此本文小波基选择 Haar 小波, 离散 Haar 小波可表示如下:

$$\psi\left(\frac{i}{a}\right) = \begin{cases} 1, & i = -\frac{a}{2}, -\frac{a}{2} + 1, \dots, -1 \\ -1, & i = 0, 1, \dots, \frac{a}{2} - 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

根据小波变换的线性性,  $Y(i)$  的小波变换等于  $X(i)$  的小波变换与  $n_0(i)$  的小波变换的叠加。而零均值噪声  $n_0(i)$

的 Haar 离散小波变换为:

$$W_{n_0}(a, n) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=-\frac{a}{2}}^{-1} n_0(i) - \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=0}^{\frac{a}{2}-1} n_0(i) = 0 \quad (14)$$

本文选取  $a \leq \frac{f_s}{f_d}$ , 即小于一个码元宽度当 Haar 小波在一个码元宽度内, 且不包含跳变处时, 有:

$$W_X(a, n) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=-\frac{a}{2}}^{-1} X(i) - \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=0}^{\frac{a}{2}-1} X(i) = 0 \quad (15)$$

当 Haar 小波在一个码元宽度内且包含跳变处时, 设跳变处时刻为  $k$ ,  $-\frac{a}{2} \leq k \leq \frac{a}{2} - 1$ . 当  $k = 0$  时,

$$W_X(a, 0) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=-\frac{a}{2}}^{-1} X_{j_1}(i) - \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=0}^{\frac{a}{2}-1} X_{j_2}(i) \quad (16)$$

式中  $X_{j_2}(i)$  和  $X_{j_1}(i)$  表示相邻的两个基带信号<sup>[5]</sup>.

当  $0 < k \leq \frac{a}{2} - 1$  时<sup>[5]</sup>,

$$W_X(a, k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=-\frac{a}{2}}^{-1} X_{j_1}(i) - \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=0}^{k-1} X_{j_1}(i) - \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=k}^{\frac{a}{2}-1} X_{j_2}(i) \quad (17)$$

比较式 (16) 和式 (17), 有

$$|W_X(a, 0)| > |W_X(a, k)| \quad (18)$$

当  $-\frac{a}{2} \leq k < 0$  时, 式 (18) 仍然成立, 即当  $k = 0$  时是一个模极大值点, 同时它也表征了相位跳变的时刻, 也是 MPSK 信号的码元跳变时刻, 通过前面的处理后, 仿真结果发现, 在单一固定尺度下的小波变换结果中, 仍含有少量由噪声引起的脉冲序列, 但是这种脉冲序列的幅度一般都比较小, 在 0 到 0.3 之间, 因此对小波变换结果进行模值平方运算, 使噪声引起的脉冲序列幅度更小, 以便之后设置固定门限予以消除. 且由文献 [12] 可知, 不同尺度参与运算的噪声不同, 把结果进行叠加可以对消部分噪声, 因此本文采用的是多尺度小波变换模值平方的叠加, 设置固定门限, 对幅度较小和幅度过大的伪脉冲序列进行消除, 从而消除噪声.

### 5 码元速率的估计

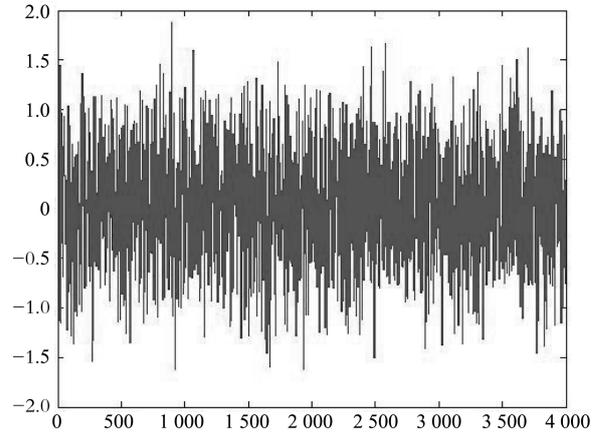
对得到的小波系数模值平方计算功率谱, 其单极性脉冲序列的双边功率谱密度为<sup>[13]</sup>:

$$P(\omega) = f_d P(1 - P) |G(f)|^2 + \sum_{m=-M}^M |f_d(1 - P)G(mf_d)|^2 \delta(f - mf_d) \quad (19)$$

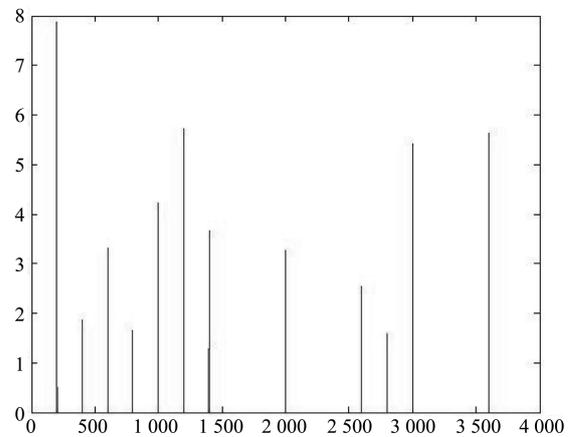
式中  $f_d$  表示信号的码元速率,  $P$  为任一码元内单极性脉冲的出现概率,  $G(f)$  为单极性脉冲序列的傅氏变换. 上式表明, 对瞬时相位基带序列求多尺度小波变换得到的脉冲序列再求功率谱, 在码元速率的整数倍处都会出现离散谱线, 检测这些离散谱线的位置即可实现对 MPSK 信号的码元速率估计.

通过设定门限搜索功率谱的峰值, 可以得到  $N$  个离散谱线分量  $f_d(i)$ , 选择第一个离散谱线分量  $f_d(1)$  作为码元速率的参照, Round 表示取整, 利用下述公式对其进行估计:

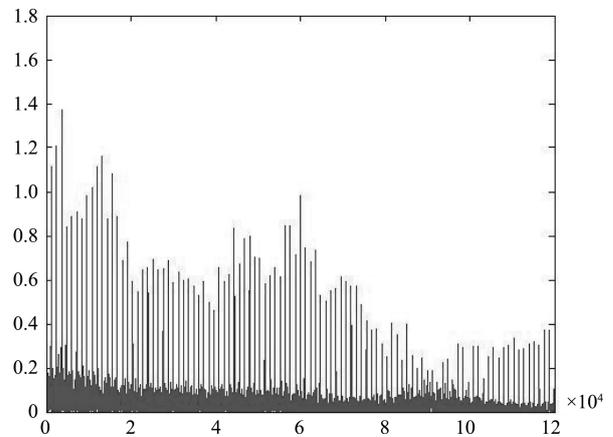
$$f_{dg} = \frac{\sum_{i=1}^N f_d(i)}{\sum_{i=1}^N \text{Round} \left[ \frac{f_d(i)}{f_d(1)} \right]} \quad (20)$$



(a) 经离散小波消噪后的已调信号  
(a) The modulated signal is denoised by discrete wavelet



(b) 多尺度小波变换  
(b) Multi-scale wavelet transform



(c) 功率谱  
(c) Power spectrum

图 2 2PSK 信号码元速率估计

Fig. 2 Symbol rate estimation for 2PSK signal

### 6 MATLAB 仿真结果与分析

#### 实验 1. 2PSK 信号的码元速率估计

仿真参数设置为: 采样频率  $f_s = 240\text{kHz}$ , 载波频率  $f_c = 15\text{kHz}$ , 码元速率  $f_d = 1200\text{B}$ , 符号个数  $N = 50$ , 噪声采用零均值高斯白噪声, 在信噪比  $SNR = 0\text{dB}$  的情况下, 小波尺度组合选取为  $a = [2, 3, 4]$ , 仿真结果如图 2. 图 2(a) 为 2PSK 调制信号经第一次离散小波消噪后得到的结果. 图 2(b) 为提取的瞬时相位基带序列经多尺度小波变换后取模平方再叠加的结果. 图 2(c) 为小波系数的功率谱值, 从图中可以看出在码元速率的整数倍处出现离散谱线, 由这些谱线可估计出码元速率为  $1199.914\text{B}$ , 与真实码元速率仅相差  $0.086\text{B}$ , 误差率约为  $0.007\%$ .

#### 实验 2. MPSK 信号的码元速率估计结果对比

与上节相同仿真条件下, 对每种调制信号每个信噪比下做 100 次 Monte Carlo 仿真实验, 以码元速率估计的误差率小于  $0.1\%$  判为正确估计, 比较 2PSK、4PSK、8PSK 信号的估计正确率结果如图 3.

从图 3 可以发现, 2PSK 信号在  $1\text{dB}$  及以上估计正确率大于  $90\%$ , 4PSK 和 8PSK 信号在  $2\text{dB}$  及以上估计正确率大于  $90\%$ .

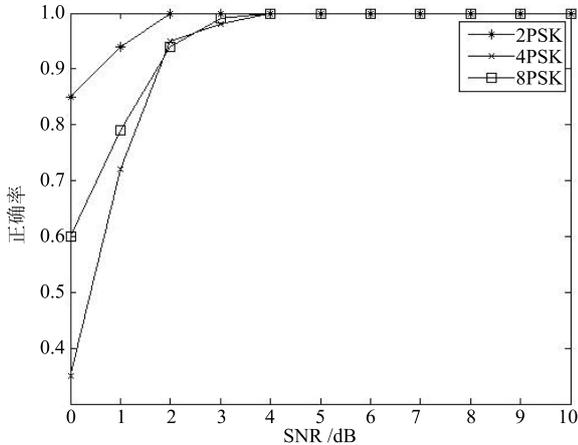


图 3 不同信噪比下 MPSK 信号码元速率估计正确率

Fig. 3 Correct rate of symbol rate estimation for MPSK signals in different SNR

#### 实验 3. 与其他算法性能对比

比较本文算法与文献 [14] 算法, 仿真条件为: 载波频率  $f_c = 1200\text{Hz}$ , 码元速率  $f_d = 600\text{B}$ , 采样频率  $f_s = 60\text{kHz}$ , 符号个数  $N = 100$ , 噪声采用零均值高斯白噪声, 信噪比  $SNR$  从  $0\text{dB}$  到  $10\text{dB}$ , 信号采用 4PSK、8PSK, 每种信号在每个信噪比下做 100 次 Monte Carlo 仿真实验, 以码元速率估计的误差率小于  $0.1\%$  判为正确估计, 统计其各自的估计正确率.

从图 4 可以看出, 本文的算法在  $1\text{dB}$  估计正确率达到  $90\%$  以上, 而文献 [14] 算法在  $1\text{dB}$  估计正确率只有  $60\%$  左右, 如文献中所述在  $4\text{dB}$  时估计正确率才能达到  $90\%$  以上. 可见在低信噪比时相同仿真条件下本文算法具有更高的估计正确率.

### 7 结语

通过前文的理论分析和仿真结果表明, 本文提出的算法

能够在低信噪比下实现 2PSK、4PSK、8PSK 信号的码元速率的精确估计. 该算法通过计算 COWelch 功率谱对载频进行估计, 提取信号的瞬时相位基带序列, 前后进行两次离散小波消噪处理和一次中值滤波处理, 再进行多尺度小波变换模平方的叠加, 最后计算功率谱. 本文提出的基于瞬时相位提取和多尺度小波变换结合的优化算法简便, 复杂度不高, 效果良好, 在工程实践中具有一定应用价值.

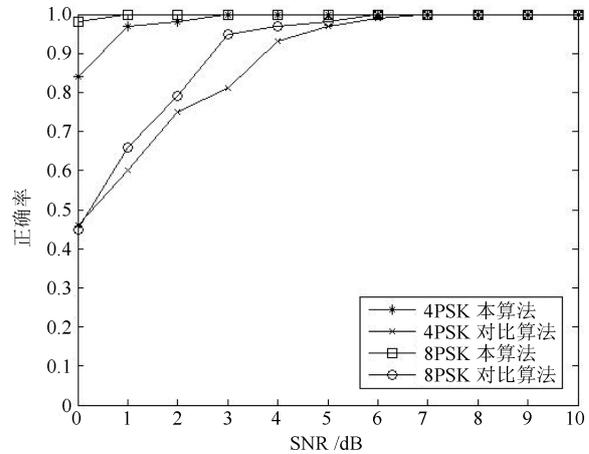


图 4 两种不同算法的码元速率估计正确率比较

Fig. 4 Comparison of correct rate of symbol rate estimation for two different algorithms

### References

- Chi Q X, Yuan J Q, Chen X Q, Pei H C, Li Y B. The CWT estimation of PSK symbol rate estimation used for radar recognition. In: Proceedings of the 2009 IET International Radar Conference. Guilin, China: IET, 2009. 1-4
- Gao Yong, Huang Zhen, Lu Jian-Hua. Symbol rate estimation algorithm for MPSK signal based on wavelet transform. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2009, **24**(S1): 167-170  
(高勇, 黄振, 陆建华. 基于小波变换的 MPSK 信号符号速率估计算法. *数据采集与处理*, 2009, **24**(S1): 167-170)
- Xu Bin, Lu Mao-Chang, Qin Wen-Bing. Research on code rate estimation algorithm at low SNR. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, **35**(2): 60-63  
(许斌, 鲁茂昌, 秦文兵. 低信噪比下的码率估计算法研究. *遥测遥控*, 2014, **35**(2): 60-63)
- Feng Xu-Zhe, Yang Jun, Luo Fei-Lu. Symbol rate estimation of digital signals based on wavelet transform. *Journal of System Simulation*, 2008, **20**(5): 1259-1261, 1320  
(冯旭哲, 杨俊, 罗飞路. 基于小波变换的通信信号码元速率估计. *系统仿真学报*, 2008, **20**(5): 1259-1261, 1320)
- Luo Ming, Yang Shao-Quan, Zheng Wen-Xiu, Wei Qing. On symbol rate estimation for signal reconnaissance. *Electronic Warfare Technology*, 2005, **20**(5): 3-6  
(罗明, 杨绍全, 郑文秀, 魏青. 一种用于信号侦测的码元速率估计方法. *电子对抗技术*, 2005, **20**(5): 3-6)

- 6 Xu J Y, Zhang Y, Jiang H J. Symbol rate estimation based on wavelet transform. In: Proceedings of the 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Shanghai, China: IEEE, 2012. 1–4
- 7 Yin W X, Wang K R. A new method to symbol rate estimation of MPSK signals. In: Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing. Hainan, China: IEEE, 2008. 394–398
- 8 Kumar S, Bohara V A, Darak S J. Blind symbol rate estimation by exploiting cyclostationary features in wavelet domain. In: Proceedings of the 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. Jaipur, India: IEEE, 2016. 1757–1763.
- 9 Yan Zhan, Kang Kai, Wang Hong-Jun. An improved blind carrier frequency estimation algorithm for satellite MPSK signals. *Telecommunication Engineering*, 2013, **53**(9): 1186–1190  
(燕展, 康凯, 王红军. 一种改进的卫星 MPSK 通信信号盲载频估计算法. 电讯技术, 2013, **53**(9): 1186–1190)
- 10 Zhang De-Feng. *MATLAB Wavelet Analysis*. Beijing: China Machine Press, 2009. 223–225  
(张德丰. MATLAB 小波分析. 北京: 机械工业出版社, 2009. 223–225)
- 11 Yang Jie, Liu Heng, Bu Xiang-Yuan, Sun Gang-Can, Yuan Ying-Ying. *Modulation Recognition for Communication Signals: Principles and Algorithms*. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2014. 7–8  
(杨杰, 刘珩, 卜祥元, 孙钢灿, 袁莹莹. 通信信号调制识别: 原理与算法. 北京: 人民邮电出版社, 2014. 7–8)
- 12 Deng Zhen-Miao, Liu Yu. Blind symbol rate estimation of MPSK signals based on multi-scale Haar wavelet transform. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, **30**(1): 36–40  
(邓振淼, 刘渝. 基于多尺度 Haar 小波变换的 MPSK 信号码速率盲估计. 系统工程与电子技术, 2008, **30**(1): 36–40)
- 13 Fan Chang-Xin, Cao Li-Na. *Principles of Communications*. Sixth Edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2013. 183  
(樊昌信, 曹丽娜. 通信原理. 第 6 版, 北京: 国防工业出版社, 2013. 183)
- 14 Qin Yong, Wan Guo-Jin, Xie Fang-Juan. Wavelet transform based symbol rate estimation of MPSK signals. *Communications Technology*, 2009, **42**(1): 81–83  
(秦永, 万国金, 谢芳娟. 基于小波变换的 MPSK 信号符号率估计方法. 通信技术, 2009, **42**(1): 81–83)

谭晓衡 重庆大学教授. 主要研究方向为无线通信, 卫星通信, 移动通信.  
E-mail: txh@cqu.edu.cn

(TAN Xiao-Heng Professor at Chongqing University. His research interest covers wireless communication, satellite communication, mobile communication.)

张雪静 重庆大学硕士研究生. 主要研究方向为通信信号处理. 本文通信作者.

E-mail: gslzcqzj@163.com

(ZHANG Xue-Jing Master student at Chongqing University. Her main research interest is communication signal processing. Corresponding author of this paper.)