

文章编号: 2095-4980(2024)11-1283-06

## 一种低信噪比条件下的码元速率估计算法

王勤民<sup>1</sup>, 赵津津<sup>2</sup>, 董丽元<sup>1</sup>, 李明媚<sup>1</sup>

(1. 天津仁爱学院 智能与信息工程学院, 天津 301636; 2. 郑州电力高等专科学校 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 针对非协作通信中的码元速率估计问题, 提出了基于经验模态分解的码元速率估计算法。算法通过对信号的瞬时幅度做低阶的经验模态分解(EMD), 找到包含码元速率信息的本征模态分量; 再通过谱线检测得到码元速率的估计。该算法可以通过频率的分离有效降低干扰对估计性能的影响, 提高估计精确度。仿真结果表明, 该算法可在低信噪比条件下, 直接从频带信号中获得对码元速率的估计。

**关键词:** 参数估计; 经验模态分解(EMD); 谱线检测

**中图分类号:** TP971

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2023073

## A symbol rate estimation algorithm under low signal-to-noise ratio

WANG Qinmin<sup>1</sup>, ZHAO Jinjin<sup>2</sup>, DONG Liyuan<sup>1</sup>, LI Mingmei<sup>1</sup>

(1. School of Information and Intelligence Engineering, Tianjin Ren'ai College, Tianjin 301636, China;

2. Power Engineering Department, Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou Henan 450001, China)

**Abstract:** For the problem of symbol rate estimation in non-cooperative communication, an algorithm based on empirical mode decomposition for symbol rate estimation is proposed. The algorithm performs a low-order Empirical Mode Decomposition(EMD) on the instantaneous amplitude of the signal to find the intrinsic mode components that contain information about the symbol rate; then, it estimates the symbol rate through spectral line detection. This algorithm can effectively reduce the impact of interference on estimation performance by separating frequencies, thereby improving estimation accuracy. Simulation results show that the algorithm can obtain an estimate of the symbol rate directly from the frequency band signal under low signal-to-noise ratio conditions.

**Keywords:** parameter estimation; Empirical Mode Decomposition(EMD); spectral line detection

码元速率也称为符号速率, 为通信系统中单位时间传输的码元个数, 也是数字通信的重要参数之一。非协作通信中信息更新过快且数据量大, 仅靠业务人员根据实际经验处理频谱监测数据, 在时效性方面是远远不够的, 亟需一种自适应、快速的码元速率估计算法<sup>[1]</sup>。

随着电子战任务的多样化与复杂化, 对码元速率估计的精确度与复杂度的要求越来越苛刻<sup>[2]</sup>。在一个码元中, 信号特征如幅度、频率和相位等参数变化很小, 但在码元与码元交界的时刻, 这些特征则变化明显。若这种变化可被检测, 则能够对码元速率进行估计。常见的码元速率估计算法有过零检测法<sup>[3]</sup>、二维循环平稳法<sup>[4]</sup>。幅相类调制的通信信号功率谱在码元速率的整数倍处存在离散谱线, 可通过检测该离散谱线实现码元估计。若不存在离散谱线, 也可采用算法提取码元跳变点之间的时间间隔估计码元速率<sup>[5]</sup>。小波变换对信号跳变具有优秀的检测能力, 且精确度较高<sup>[6]</sup>, 因此在码元速率估计中经常被采用。文献[7]先对信号进行预处理, 消除成型滤波器对信号的影响, 再采用 Harr 小波提取信号的码元速率; 文献[8]通过对信号的循环谱做主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)估计码元速率, 可有效降低噪声的影响, 提高估计精确度; 文献[9]先用离散小波法对信号进行去噪处理, 再利用信号在小波域的循环平稳特征进行码元速率的估计, 尽管该方法估计效果好, 但需要引入载频等先验信息, 降低了算法的适用性, 且算法复杂度较高; 文献[10]研究了基于数据辅助的码元速率估计算法, 可取得较好的估计性能, 但适用范围有限, 仅能在合作通信场景中应用; 文献[11]对循环自相关向量进行压缩采样, 并通过在变换域测量循环自相关向量的实、虚部, 获得对码元速率的估计; 文献[12]利用 Hilbert 变

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871405); 博士创新基金资助项目(3004/080401)

换提取瞬时相位基带序列, 再进行多尺度小波变换, 并把每个尺度下的小波系数的模值的平方进行叠加, 通过谱线检测估计码元速率; 文献[13]针对多径信道, 采用信号的自相关, 部分克服了发送的滚降滤波对估计性能的影响; 文献[14]则考虑通信信号的循环平稳特性, 把循环自相关与非线性滤波相结合, 对码元速率做盲估计。

以上的这些码元速率估计算法, 或复杂度较高, 或仅在信噪比较高条件下有效, 或需要先验信息把信号转换到基带, 更有甚者, 以上各点兼而有之。因此, 在工程中急需一种可适用于低信噪比、适用范围广的码元速率估计算法。对此, 本文提出一种基于低阶经验模态分解的码元速率估计算法。该算法复杂度低, 可在低信噪比的场景下, 不需要载频等先验信息, 能够对信号的码元速率做出正确的估计。

## 1 信号模型

常见的幅相类调制信号为:

$$r(t) = \text{Re} \left[ A_m g(t - mT_s) e^{j(2\pi f_c t + \theta_m)} \right] + n(t) \quad (1)$$

式中:  $A_m$  与  $\theta_m$  分别为调制信号的第  $m$  个符号的幅度与相位;  $g(t)$  为发送脉冲成型滤波器;  $T_s$  为码元周期;  $f_c$  为载波频率;  $n(t)$  为零均值且方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声。

若调制为多进制数字相位调制(Multiple Phase Shift Keying, MPSK), 则  $A_m$  为常量,  $\theta_m$  承载信息; 若调制为多进制正交幅度调制(Multiple Quadrature Amplitude Modulation, MQAM), 则信息由  $A_m$  与  $\theta_m$  共同承载。在接收信号无先验信息的条件下, 通常先进行调制分类, 再按不同的方法获得基带信号。对于幅相类调制信号, 可通过 Hilbert 变换把实信号变为复信号:

$$x(t) = r(t) + j\hat{r}(t) \quad (2)$$

式中  $\hat{r}(t)$  为接收信号  $r(t)$  的 Hilbert 变换。对式(2)做适当变换可获得信号的瞬时幅度、瞬时频率以及瞬时相位, 从而可依据信号的调制方式, 提取信号相应的参数, 对码元速率做出估计。

## 2 算法描述

由于脉冲成型滤波器  $g(t)$  的影响, 不仅幅度变化的 MQAM 调制信号, 而且恒幅调制的 MPSK 信号的幅度也会发生明显的周期变化, 且该周期与码元速率成反比。因此, 可在未知调制类型与具体的发送成型滤波器的前提下, 通过分析信号幅度的变化, 估计码元速率。

具体地, 首先对信号取模值:

$$A_x(t) = \sqrt{r(t)^2 + \hat{r}(t)^2} \quad (3)$$

在一个符号之内, 由于  $g(t)$  变化较慢, 对信号的幅度  $A_x(t)$  的影响较小, 通常为连续的。但在符号与符号的交界处, 由于  $g(t)$  剧烈变化, 因此信号幅度  $A_x(t)$  也会发生剧烈的周期性变化, 即  $A_x(t)$  变化的周期主要受码元速率的周期影响。通过有效检测该变化, 可对码元周期做出准确的估计。通信信号的幅度谱会表现为在多个频率位置上出现峰值, 仅通过普通的谱分析, 并不能准确地确定码元速率所对应的谱线。经验模态分解(EMD)可把信号分解为若干个波动模式的叠加, 即任何信号都可分解成若干个本征模态函数(Intrinsic Mode Functions, IMF)与一个残余分量的和。其中, 每个本征模态对应原信号的一个谱峰值, 若可以确定对应于码元速率的峰值, 则可以对码元速率做出准确的估计。

EMD 分解具有自适应性、正交性与完备性等特点, 可在不改变信号调制特性的条件下, 自适应地、几乎无损失地将各个时间尺度的分量分离出来。而码元周期存在于其中的一个 IMF 分量中, 因此可直接通过 EMD 分解, 获得码元周期的信息。EMD 分解根据信号本身的特征时间尺度, 把信号分解为若干个 IMF 分量, 其中每个分量对应信号不同的频率成分。 $K$  次分解后, 信号分解为  $K$  个 IMF 分量与余量  $r^{(k)}$  的和<sup>[15]</sup>:

$$X(t) = \sum_{k=1}^K \text{IMF}_k(t) + r^{(k)}(t) \quad (4)$$

其中, 每个 IMF 分量占据着由高到低的不同的频域空间。所有的复杂信号都是高频分量与低频分量叠加而成的, 因此, 在频域中按从高到低的顺序可把信号分离开。

具体分解过程为: 首先找到原信号序列  $x(n)$  的所有极大值点与极小值点; 然后采用三次样条插值函数, 分别

拟合得到原信号的上包络线与下包络线，进而得到上包络线与下包络线的均值  $m_1$ ，把原信号序列  $x(n)$  与该平均包络  $m_1(n)$  作差，获得信号第 1 个 IMF 序列：

$$h_1(n) = x(n) - m_1(n) \quad (5)$$

若新的信号序列仍存在局部极大值与局部极小值，表明它不是一个本征模函数，则继续分解，直到所有分量都是本征模函数为止。

由于  $g(t)$  的影响，通信信号的幅度具有周期性的特点，且该周期与信号码元速率一致。因此对信号的幅度  $A_x(t)$  做 EMD 分解，则第 1 个 IMF 分量所对应的频率分量即为相对应码元速率。

为降低噪声对估计结果的影响，仅考虑功率较大的分量，若功率较小，则该分量置为零。即在包含码元周期的 IMF<sub>1</sub> 中，仅选取较大的信号分量。采用式(6)对 IMF<sub>1</sub> 进行去噪声：

$$\text{IMF}_1(n) = \begin{cases} \text{IMF}_1(n), & |\text{IMF}_1(n)| \geq \alpha \cdot \max |\text{IMF}_1(n)| \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\cdot$  表示数乘，即通过设置阈值，减轻噪声对估计性能的影响。该操作可有效减轻噪声影响，但并不能去除时间尺度相同且能量较强的干扰的影响。干扰虽具有较强的能量，但周期性不强，只偶尔且无规律地出现，通过傅里叶变换，干扰会平铺在整个频谱上，对估计性能的影响较小。通信信号具有循环平稳的特性，它的统计特性随时间的变化呈现出周期性变化，即便个别分量的能量很小，也不影响频域分析的结果。

综上所述，EMD 分解不仅可以去除噪声的影响，还可以去除与码元周期时间尺度相同的干扰影响，从而得到码元周期的准确估计。具体的算法过程如图 1 所示。



Fig.1 Block diagram of algorithm implementation

图 1 算法实现框图

### 3 数据仿真及分析

采用数值仿真的方法验证算法的有效性。仿真中采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制，载波频率为 20 MHz，数据采样率为 800 kHz，符号速率为 200 kB，每次采样时间为 5  $\mu$ s， $g(t)$  为根升余弦滚降滤波器，滚降因子为 0.35，噪声为高斯白噪声。

当  $R_{SN}=0$  dB 时，信号进行 EMD 分解后的一阶本征函数 IMF<sub>1</sub>(即码元速率所对应的本征函数成分)在去噪前后的时域波形、经过小波分解后的时域波形如图 2 所示。从图中可以看出，去噪操作可以去除大部分噪声对码元周期的影响，本征函数表现出明显的周期特性。同时注意到时域波形中仍混有较弱的干扰，但干扰并不具有周期性，而是随机性较强。因此，若对信号做频域分析，可以提取周期成分，即码元速率。与小波变换的结果周期则不是特别明显，受噪声影响严重。

为进一步验证算法的性能，对 EMD 分解以及小波变换的结果进行傅里叶变换，它们的幅度谱如图 3 所示。从图中可以看出，EMD 分解去噪后比去噪前频域波形更稳定，受噪声的干扰更小。需要指出的是，EMD 分解的结果并不是单频信号，频谱存在很多谐波分量。其中，频率最低的基波频率，即为信号的码元速率估计。而基于小波分解的频域信号，在码元速率处也存在极大值，但当信噪比较低时，波形的规整程度较 EMD 要差，有可能引起误判。另外，这是在低信噪比时的分析结果，随着信噪比的提高，三者之间的差别会变小。

为比较 EMD 算法与小波算法对信噪比的适应性，进行 10 000 次蒙特卡罗仿真。若估计值与真实值的误差小于门限值(Threshold, T)，则判定为正确估计；否则，为错误估计，门限值由式(7)给出。以正确判决次数与总仿真次数的比值作为对累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)的估计，基于 EMD 与小波码元速率估计的 CDF 如图 4 所示。

$$T = \begin{cases} 1, & \text{if } \left| \frac{\hat{R}_s - R_s}{R_s} \right| \leq 0.001 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\hat{R}_s$  为码元速率  $R_s$  的估计值。

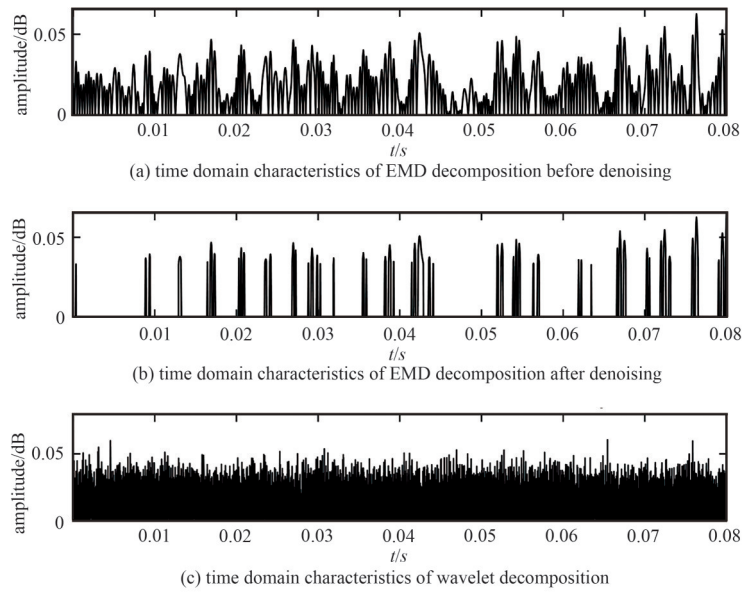


Fig.2 The time domain characteristics of EMD decomposition and wavelet decomposition  
图2 EMD分解与小波分解的时域特性

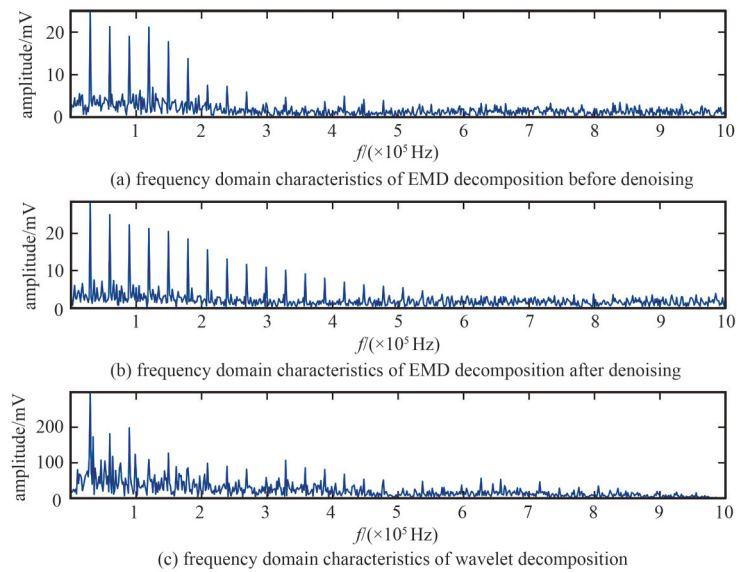


Fig.3 Frequency domain characteristics of EMD and wavelet decomposition  
图3 EMD与小波分解频域特性图

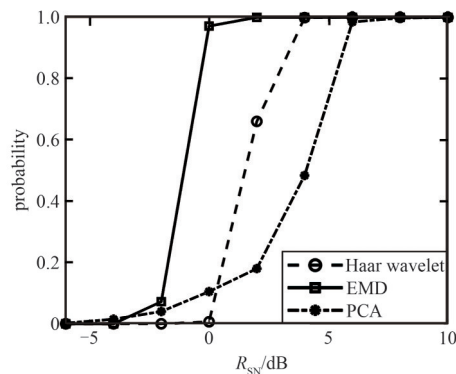


Fig.4 CDF comparison chart for symbol rate estimation based on EMD and wavelet  
图4 基于EMD与小波的码元速率估计的CDF比较图

从图中可以看出，基于EMD的算法在 $R_{SN} > 2$  dB时，判决基本无误；而小波算法要实现类似的效果，需 $R_{SN} \geq 4$  dB；主成分分析则需 $R_{SN} = 6$  dB左右才可以基本避免错误。主要原因是采用小波对信号进行分析时，仅能检测信号的跳变点，并没有充分利用这种变化的规律。而EMD不仅在时间尺度上对信号跳变点进行检测，还考虑了变化的周期性，进一步降低了干扰对估计性能的影响。

为评估算法的误差性能，用归一化均方根误差(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE)表征估计误差：

$$E_{NRMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left( \frac{\tilde{R}_s - R_s}{R_s} \right)^2} \quad (8)$$

进行5 000次蒙特卡罗仿真，对比EMD算法与小波算法估计的性能差别，如图5所示。从图中可以看出，基于EMD的算法在低信噪比时，性能与循环谱的PCA法性能略有差距，但在高信噪比时，性能要远优于PCA法。主要原因是EMD在信噪比过低时，会引起码元速率成分分离的失败，但只要能够获得码元速率成分，则该成分受噪声的影响很小；而PCA则不存在这种情况。与Haar小波相比，虽然算法收敛时性能差距不大，但EMD算法收敛更快。这主要是因为EMD算法相比于小波算法，抑制噪声与干扰影响的能力更强。

因为基于EMD算法的码元速率的信息在IMF1中，进行EMD分解时，可采用提前终止迭代的方法，仅获得低阶分量即可，在实际操作中可明显降低计算复杂度。由图5还可以看出，当信噪比较高时，估计精确度并不能提高，这主要是因为最终的估计精确度受限于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的点数。若提高FFT点数，采用相位差法，可进一步有效提高估计的精确度。

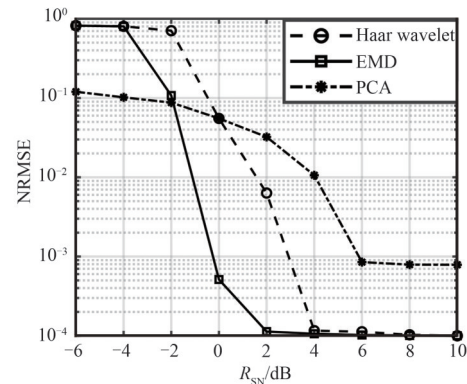


Fig.5 Comparison chart of estimation error performance of algorithms  
图5 算法的估计误差性能比较图

## 4 结论

本文提出一种在信号侦测中幅相类调制码元速率的估计方法。首先提取调制信号的瞬时幅度，通过低阶EMD分解获得包含码元速率的分量，然后通过傅里叶变换检测信号中的离散谱线，对码元速率做出估计。由于在频域估计，这种算法与传统的时域统计及小波类方法相比性能稳定，精确度较高，在较低信噪比下估计仍有效，且不依赖于先验信息，可直接在频带获得对码元速率的估计。

### 参考文献：

- [1] 单中尧,林枫,王景岩,等. 自适应估计信号个数的频谱信号提取算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(12):1335-1342. (SHAN Zhongyao, LIN Feng, WANG Jingyan, et al. Spectrum extraction algorithm for adaptive estimation of the signal number[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(12): 1335-1342.) doi: 10.11805/TKYDA2022044.
- [2] 陈梁栋,李梦瑶,刘昕卓. 欠采样条件下基于DCS的LFM信号带宽估计方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(5): 797-801. (CHEN Liangdong, LI Mengyao, LIU Xinzhuo. Bandwidth estimation method of LFM signal based on DCS under unsampled conditions[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(5): 797-801.) doi: 10.11805/TKYDA2019090.
- [3] CIBLAT P, LOUBATON P, SERPEDIN E, et al. Asymptotic analysis of blind cyclic correlation-based symbol-rate estimators[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002,48(7):1922-1934. doi:10.1109/TIT.2002.1013133.
- [4] CAO Sisi, ZHANG Weiyan. Carrier frequency and symbol rate estimation based on cyclic spectrum[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020,31(1):37-44. doi:10.21629/JSEE.2020.01.05.
- [5] LIANG Yajun. A blind symbol rate estimation of weak signal based on cyclic spectrum and wavelet transform[J]. Journal of Information & Computational Science, 2013,10(7):1917-1924. doi:10.12733/JICS20101734.
- [6] 程文帝,程郁凡,陆炫宇,等. 单载波MPSK/MQAM调制信号的参数盲估计改进算法研究[J]. 信号处理, 2019,35(1):39-48. (CHENG Wendi, CHENG Yufan, LU Xuanyu, et al. Blind parameter estimation algorithm for single-carrier MPSK/MQAM modulation signal[J]. Journal of Signal Processing, 2019,35(1):39-48.) doi:10.16798/j.issn.1003-0530.2019.01.006.

- [7] WANG Long,ZHANG Gengxin,BIAN Dongming,et al. Blind symbol rate estimation of satellite communication signal by Haar wavelet transform[J]. Journal of Electronics(China), 2011,28(2):198–203. doi:10.1007/s11767-011-0592-y.
- [8] 王蒙,汪伟,于宏毅,等. 一种基于 PCA 的 MPSK 信号码元速率估计方法[J]. 计算机应用研究, 2013,30(6):1786–1789. (WANG Meng,WANG Wei,YU Hongyi,et al. Symbol rate estimation method of MPSK signals using principal component analysis[J]. Application Research of Computers, 2013,30(6):1786–1789.) doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.048.
- [9] KUMAR S,BOHARA V A,DARAK S J. Blind symbol rate estimation by exploiting cyclostationary features in wavelet domain[C]// 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics(ICACCI). Jaipur,India:IEEE, 2016: 1757–1763. doi:10.1109/ICACCI.2016.7732302.
- [10] 许维伟,叶江峰,胡茂海,等. 多进制相移键控信号信噪比估计方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):81–87. (XU Weiwei, YE Jiangfeng, HU Maohai, et al. SNR estimation techniques for MPSK signals[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):81–87.) doi:10.11805/TKYDA201601.0081.
- [11] 金艳,田田,姬红兵. 基于稀疏贝叶斯学习的码元速率估计[J]. 电子与信息学报, 2018,40(7):1598–1603. (JIN Yan,TIAN Tian, JI Hongbing. Symbol rate estimation based on sparse Bayesian learning[J]. Journal of Electronics&Information Technology, 2018,40(7):1598–1603.) doi:10.11999/JEIT170906.
- [12] 谭晓衡,张雪静. 基于小波变换的码元速率估计优化算法[J]. 自动化学报, 2020,46(8):1748–1752. (TAN Xiaoheng,ZHANG Xuejing. Symbol rate estimation based on wavelet transform[J]. Acta Automatica Sinica, 2020,46(8):1748–1752.) doi:10.16383/j.aas.c170518.
- [13] BA Junhao,HUANG Zhiping,ZUO Zhen,et al. Blind symbol rate estimation using nonlinearity on sample correlation for digital coherent systems[J]. Optics Communications, 2019(451):246–254. doi:10.1016/j.optcom.2019.06.016.
- [14] 谢纪岭,卢彦卿. 一种数字调制信号符号速率盲估计方法[J]. 电讯技术, 2022,62(1):54–58. (XIE Jiling,LU Yanqing. A blind estimation algorithm for symbol rate of digitally modulated signals[J]. Telecommunication Engineering, 2022,62(1):54–58.) doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2022.01.008.
- [15] HUANG N E,SHEN Zheng,LONG S R,et al. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis[J]. Royal Society, 1998,454(1971):1364–5021. doi:10.1098/rspa.1998.0193.

#### 作者简介:

王勤民(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为非协作通信信号处理. email:wqinmin@vip.163.com.

赵津津(1975-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为信号处理、新能源发电技术.

董丽元(1987-) 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电子与通信技术.

李明媚(1984-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为信号与信息系统.