

doi: 10.7690/bgzdh.2024.03.012

基于改进式特征值二次对角加载的信源数估计方法

王川川, 曾勇虎, 朱宁, 王华兵

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对应用阵列天线进行信号接收时的信源数估计问题, 提出一种基于改进式特征值二次对角加载的信源数估计方法。对天线阵列观测信号协方差矩阵进行特征值分解; 对特征值进行一次对角加载, 对角加载量取所有特征值的几何平均值, 将原始特征值与对角加载值相加, 取代原始特征值; 重新计算特征值对角加载量, 并进行二次对角加载, 使加载后的特征值满足噪声特征值的最大最小值之比不超过 2 的条件, 在此基础上, 使用信息论准则类方法和随机矩阵理论类方法实现信源数的估计。仿真实验结果表明, 该信源数估计方法具有可行性。

关键词: 信源数估计; 色噪声; 信息论准则方法; 一般渐近体系; 二次对角加载

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Source Number Estimation Method Based on Improved Quadratic Diagonal Eigenvalue Loading

Wang Chuanchuan, Zeng Yonghu, Zhu Ning, Wang Huabing

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China)

Abstract: To solve the problem of estimating the number of sources when receiving signals with array antennas, a method of estimating the number of sources based on improved quadratic diagonal loading of eigenvalues is proposed. The method comprises the following steps of: carrying out eigenvalue decomposition on an antenna array observation signal covariance matrix; carrying out primary diagonal loading on an eigenvalue, wherein the diagonal loading quantity is taken as the geometric mean value of all eigenvalues, and adding an original eigenvalue and a diagonal loading value to replace the original eigenvalue; For the eigenvalues after the first diagonal loading, the diagonal loading amount of the eigenvalues is recalculated, and the secondary diagonal loading is carried out on the eigenvalues after the first diagonal loading, so that the loaded eigenvalues meet the condition that the ratio of the maximum to the minimum of the noise eigenvalues does not exceed 2. On this basis, the information theory criterion method and the random matrix theory method are used to estimate the number of information sources. The simulation results show that the proposed method is feasible.

Keywords: source number estimation; colored noise; information theory criterion method; general asymptotic system; quadratic diagonal loading

0 引言

准确有效地确定空间中辐射源信号数量是许多信号处理方法的一个必要前提, 如波达方向估计、盲源分离、辐射源定位、波束成形等。

现阶段, 学者们已提出多种信源数估计方法, 这些方法本质上以观测数据及其矩函数的统计分析理论为基础, 主要有以下几类:

1) 信息论准则类方法^[1-3]。包括 Akaike 信息准则 (Akaike information criterion, AIC)、贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC)、最小化描述长度 (minimum description length, MDL)、Kullback 信息论准则 (Kullback information criterion, KIC) 等。这类方法适用于高斯白噪声环

境下。为使信源数估计能够适用于色噪声条件下, 通常采取特征值对角加载结合信息论准则的方法, 但对角加载量并没有理论上的确定方法, 这是影响基于对角加载的信息论准则方法在色噪声条件下应用效果的关键要素。

2) 观测信号协方差矩阵特征值/奇异值处理类方法^[2]。主要包括根据特征值/奇异值的比值确定信源数的方法等。这类方法适用于高斯白噪声条件下。

3) 盖尔圆变换法^[2]。该方法不是利用阵列协方差矩阵的特征值, 而是利用阵列协方差矩阵盖氏圆的半径来进行信号源数目的估计, 适用于白噪声和色噪声条件下。由于该方法涉及的一个关键参数设置缺乏理论指导, 而是依靠经验取值的问题, 不同的参数值情况下, 该方法信源数估计结果相差较大;

收稿日期: 2023-11-11; 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 国家重点实验室开放基金 (CEMEE2022Z0304B)

第一作者: 王川川 (1985—), 男, 河南人, 博士。

因此, 该方法不便于实际使用。

4) 假设检验类方法^[3]。假设检验类方法有球形检验和特征值检测等, 主要利用样本特征值的统计分布规律构造用于假设检验的观测统计量并设置判决门限。从观测信号混叠噪声角度而言, 这些方法适用于高斯白噪声环境下。

从天线阵列的角度而言, 1)—4)类方法适用于信号采样数远大于阵元数的情形。这些类别方法称为经典渐近体系下的信源数估计方法。

5) 基于随机矩阵理论的信源数估计方法^[3]。包括适用于阵元数少于信号采样数的 RMT-AIC 方法、BN-AIC 方法、BIC-variant 方法、LS-MDL 方法和基于 spike 模型的估计方法, 适用于阵元数多于、少于或等于信号采样数的基于球形检验的估计方法和基于修正 Rao 得分检验的估计方法 (CRST-GBIC)。这类方法主要适用于高斯白噪声条件下, 称为一般渐近体系下的信源数估计方法, 也能够用于经典渐近体系下的信源数估计。

6) 基于聚类有效性的信源数估计方法^[4-5]。聚类是数据挖掘理论中的一类重要方法, 模糊 C 均值聚类是其中一种典型且获得广泛应用的聚类方法。许多聚类算法需要用户预定义聚类数目, 这个数目会严重影响聚类算法的性能。聚类有效性分析就是通过建立一个有效性函数(其变量为聚类数目 K), 即聚类有效性指标, 然后根据指标的最优值确定最优聚类结果或最优类数。将聚类算法用于观测信号聚类处理, 通过聚类有效性指标评估可实现辐射源数目的估计。

文献[6]提出一种基于盖尔圆变换和修正 Rao 得分检验的信源数估计方法 (GDE-CRST-GBIC)。其基本思想是首先对观测信号求取其样本协方差矩阵, 然后针对样本协方差矩阵进行盖尔圆变换, 借助变换后信号盖尔圆半径和噪声盖尔圆半径区分更加明显的特点, 利用变换后的样本协方差矩阵特征值的估计值, 在修正 Rao 得分检验思想的基础上, 构造用于建立信息论准则似然函数的观测统计量, 在此基础上通过广义贝叶斯信息准则 (generalized Bayesian information criterion, GBIC) 实现信源数估计。该技术适用于天线阵元数大于、等于或小于信号采样数的条件。

文献[7]提出了一种基于特征值二次对角加载的信源数估计方法。其基本思想是对天线阵列观测信号协方差矩阵进行特征值分解, 然后对特征值进行一次对角加载, 对角加载量取所有特征值的算术

平均值, 将原始特征值与对角加载值相加, 取代原始特征值, 对一次对角加载后的特征值进行二次对角加载, 以使加载后的特征值满足噪声特征值的最大最小值之比不超过 2 的条件; 在此基础上, 使用信息论准则类方法和随机矩阵理论类方法实现信源数的估计, 能够适用于天线阵元数与信号采样数为同一数量级的一般渐近体系之下, 噪声环境可为高斯白噪声或色噪声。但是, 该方法需要根据阵元数 M 与采样数 N 的比例关系来确定第 2 次对角加载量, 对方法的应用是一个不利因素。

信源数的准确快速估计十分重要, 在日益复杂的信号环境下, 要准确实现信源数的估计愈发困难, 已成为信号处理领域的一个基础性和热点问题。考虑到实际的信号环境中, 天线阵列数与信号采样数的比例关系, 以及观测信号混叠的噪声是白噪声还是色噪声都是未知的; 因此, 为提高信源数估计的可靠性, 还需大力发展适用于经典渐近体系又适用于一般渐近体系, 且无论在白噪声还是色噪声条件下都适用的信源数估计方法, 通过多种方法的综合利用, 能够更好地保证复杂环境条件下信源数估计的可靠性。笔者所提方法正是为满足这一需求而设计的。

1 问题的数学模型、所提出方法的思想及步骤

1.1 信源数估计的数学模型

假设 K 个远场信号从方向 $\theta_1, \dots, \theta_K$ 入射到由 M 个传感器组成的阵列上, t 时刻阵列观测信号为 $\mathbf{X}(t)$:

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}(\theta_k) s_k(t) + \mathbf{w}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{s}(t) + \mathbf{w}(t). \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(t)=[X_1(t), X_2(t), \dots, X_M(t)]^T$ 为阵列观测信号向量, 上标 T 表示转置; $\mathbf{a}(\theta_k)$ 为阵列方向向量; $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})=[\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]$ 为方向向量构成的矩阵; $\boldsymbol{\theta}=[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K]^T$ 为信号的来波角度参数向量; $\mathbf{s}(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ 为入射信号向量; $\mathbf{w}(t)=[w_1(t), w_2(t), \dots, w_M(t)]^T$ 为加性噪声向量; 采样时刻, $t=1, 2, \dots, N$, N 为信号采样数。

式(1)所示的阵列观测信号模型的基本假设条件如下:

1) 入射信号为相互独立的窄带平稳信号, 满足均值 $E\{s(t)\}=0$ 、协方差矩阵 $\mathbf{E}s(t)s^H(t)=\text{diag}\{p_{s_1}, p_{s_2}, \dots, p_{s_K}\}=\mathbf{P}_s \in R^{K \times K}$, 其中 p_{s_k} 为第 k 个信号的

功率；

2) 阵列观测信号向量中叠加噪声为加性噪声，与信号独立；

3) 入射信号数同时小于阵元数和样本数，即 $K < \min(M, N)$ ；

4) 信号在理想空间传播，阵列传感器具有全向一致性。

1.2 所提出方法的技术思想

在实际中，天线阵列接收的样本数据都含有噪声，并且可能并非理想的高斯白噪声，而是复杂的空间色噪声。而在复杂的空间色噪声环境中，天线阵列接收数据的协方差矩阵的噪声特征值部分将变得非常发散，并非像高斯白噪声下噪声特征值部分那样在噪声功率附近振动。色噪声造成的这种结果会使得利用假设检验和信息论准则进行信源数目估计的各种算法产生失效，利用基于盖尔圆定理的信源数估计方法，以及基于特征值对角加载结合信息论准则的信源数估计方法，都只能适用于经典渐近体系之下，即天线阵元数 M 与信号采样数 N 的关系为： M 固定且 $M/N \ll 1$ 。在一般渐近体系之下，即天线阵元数 M 与信号采样数 N 的关系为： M 与 N 以相同的速率趋于无穷， $M, N \rightarrow \infty$ 且 $M/N \rightarrow c \in (0, \infty)$ ，适用于色噪声环境下的信源数估计方法还比较缺乏。

从大量的实验数据中，发现天线阵列观测信号中噪声特征值的最大最小值之比不超过 2 时，信息论准则可以正确估计出信源数。通过对天线阵列观测信号协方差矩阵的特征值进行分析，发现在色噪声环境下噪声特征值非常发散；为此，学者们提出了特征值对角加载的思想。其中文献[8]提出了特征值二次对角加载的思想，具有很强的新颖性；但该方法存在一个阈值选择问题，即需要根据阵元数 M 与采样数 N 的比例关系来改变第 2 次加载量，实际应用中有不便。笔者在其基础上提出一种改进式特征值二次对角加载方法，具体技术思想为：对天线阵列观测信号协方差矩阵进行特征值分解，然后对特征值进行一次对角加载，对角加载量取所有特征值的几何平均值（文献[8]中的取值为算术平均值），将原始特征值与对角加载值相加，取代原始特征值；针对一次对角加载后的特征值，再重新计算特征值对角加载量，对一次对角加载后的特征值进行二次对角加载，不需要根据阵元数 M 与采样数 N 的比例关系来确定第二次对角加载量，以使加载后

的特征值满足噪声特征值的最大最小值之比不超过 2 的条件；在此基础上，使用信息论准则类方法和随机矩阵理论类方法实现信源数的估计。

1.3 实现所提出方法的具体步骤

步骤 1: 设 1 维均匀线性天线阵列有 M 个阵元，测量获得的 M 个观测信号为 $\mathbf{X}(t)$ ， $\mathbf{X}(t)=[\mathbf{X}_1(t), \mathbf{X}_2(t), \dots, \mathbf{X}_M(t)]^T$ （上标 T 表示转置），采样时刻， $t=1, 2, \dots, N$ ， N 为信号采样数，计算观测信号的协方差矩阵：

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{X}(t) \cdot \mathbf{X}^H(t) / N. \quad (2)$$

步骤 2: 对协方差矩阵 $\mathbf{R}(t)$ 进行特征值分解，

$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H$ ，其中特征值 λ_i 和特征向量 \mathbf{u}_i 也称为样本特征值和样本特征向量，将特征值序列表示为 $\{\lambda_k\}_{k=1}^M$ ，其为按取值大小降序方式进行排列的数值序列。

步骤 3: 针对特征值序列 $\{\lambda_k\}_{k=1}^M$ ，进行一次对角加载，对角加载量计算公式表示为：

$$jz1 = \left(\prod_{k=1}^M \lambda_k \right)^{0.1}. \quad (3)$$

步骤 4: 根据样本协方差矩阵 $\mathbf{R}(t)$ 和特征值一次对角加载量计算公式，计算对角加载以后的新的样本协方差矩阵，表示为：

$$\tilde{\mathbf{R}}_1(t) = \mathbf{R}(t) + jz1 \cdot \mathbf{I}_M. \quad (4)$$

式中 \mathbf{I}_M 为一个 M 维的单位矩阵。

步骤 5: 针对一次对角加载后的样本协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_1(t)$ 进行特征值分解，得到新的特征值序列 $\{\tilde{\lambda}_k\}_{k=1}^M$ 。

步骤 6: 针对特征值序列 $\{\tilde{\lambda}_k\}_{k=1}^M$ ，进行二次对角加载。对角加载方法确定过程如下：

1) 求取连续 2 个特征值比值最大的特征值序号：对降序排列的特征值序列 $\{\tilde{\lambda}_k\}_{k=1}^M$ ，选择

$$\tilde{k} = \max_k \frac{\lambda_{k+1}}{\lambda_k}, \quad k=1, 2, \dots, M-1.$$

2) 计算使得 $(\lambda_{\tilde{k}+1} + 0.1 \times \hat{k}) / (\lambda_{\tilde{k}} + 0.1 \times \hat{k}) < 2$ 成立的最小的整数 \hat{k} ， $\hat{k} = \text{向上取整}(\text{绝对值}((\lambda_{\tilde{k}+1} - 2\lambda_M) / 0.1))$ 。

3) 令二次对角加载量 $jz2 = 0.1 \times \hat{k}$ ，针对特征值

序列 $\{\tilde{\lambda}_k\}_{k=1}^M$ 进行第 2 次对角加载, 得到新的特征值序列 $\{\hat{\lambda}_k\}_{k=1}^M$:

$$\hat{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k + jz2, \quad k=1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

步骤 7: 针对新的特征值序列 $\{\hat{\lambda}_k\}_{k=1}^M$, 应用信息论准则类方法和随机矩阵理论方法进行信源数估计。

2 仿真实验与分析

实验验证是在 DELL9020MT 型个人计算机, Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU @3.40 GHz, 64 位 Windows 操作系统的仿真条件下进行的, 仿真软件采用 Matlab R2010a。为充分验证所提方法(后文称本方法)的有效性, 共开展 4 组实验测试。

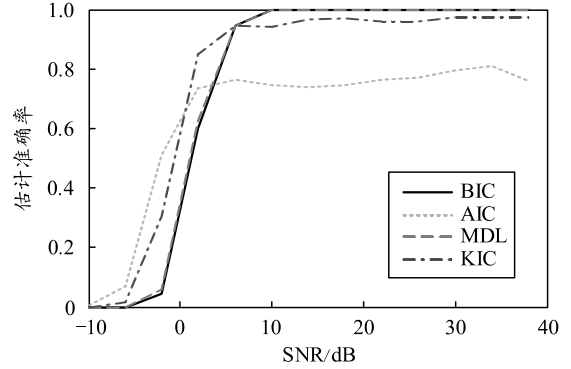
实验 1: 本方法与信息论准则方法(BIC、AIC、MDL、KIC)相结合, 以及直接采用信息论准则方法(BIC、AIC、MDL、KIC), 在高斯白噪声环境下的估计效果对比。辐射源信号设置为:

- 1) s_1 为 BPSK 信号, 码元宽度为 10/31 μs , 载波频率为 10 MHz;
- 2) s_2 为 CW 信号, 子脉冲宽度为 15 μs , 载波频率为 10 MHz;
- 3) s_3 为 LFM 信号, 脉冲宽度为 10+10•rand(1) μs , 起始频率为 10 MHz, 调频带宽为 10/(1+rand(1)) MHz;
- 4) s_4 为 MPSK 信号, 弗朗克编码方式, 码元宽度为 0.4 μs , 载波频率为 50 MHz。

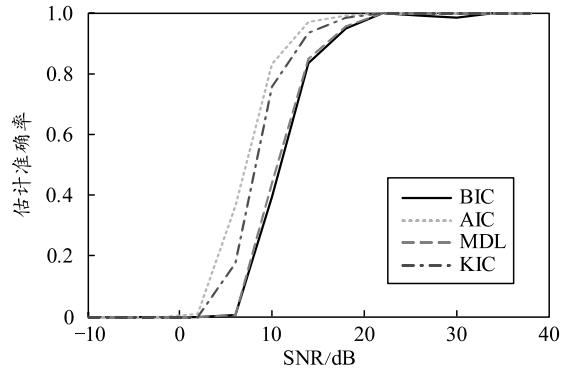
信源数 $K=4$, 阵列天线阵元数分别设置为 $M=10, 100, 300, 310$, 导向矩阵 A 由随机函数 randn 产生, 采样频率为 120 MHz, 信号采样点数为 $N=300$, 混合信号叠加高斯白噪声, 信噪比变化范围为 -10~30 dB, 步长为 2 dB, 在每个信噪比上进行 200 次 Monte Carlo 仿真, 实验结果如图 1 所示。

从图 1(a)和(b)可看出, 此时 $M/N \ll 1$, 天线阵列阵元数与样本数的关系满足经典渐近体系要求, 在高斯白噪声条件下, 基于本方法结合信息论准则方法, 以及直接应用信息论准则方法, 在一定信噪比条件下, 都能准确实现信源数的估计, 应用本方法比不应用本方法所需的信噪比条件要高。在图 1(c)和(d)中, $M/N=1/3$, 天线阵列阵元数与样本数的关系近似满足经典渐近体系要求, 在应用本方法与不应用本方法与信息论准则方法结合, 都可达到很好的估计效果, 且所需的信噪比条件没有明显

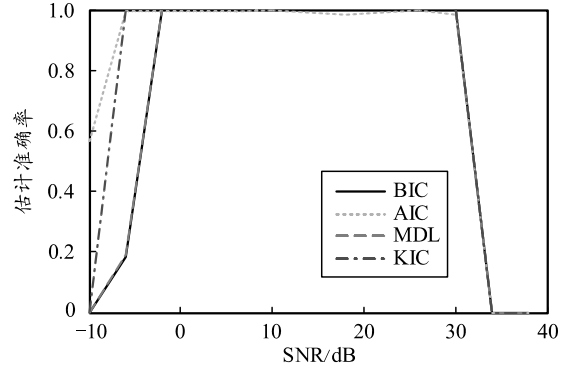
差别。在图 1(e)-(h)中, $M/N \geq 1$, 天线阵列阵元数与样本数的关系满足一般渐近体系要求, 应用本方法技术结合信息论准则方法, 在较低信噪比能够稳健的实现信源数的准确估计; 而不应用本方法, 单纯采用信息论准则方法, 则估计失败。



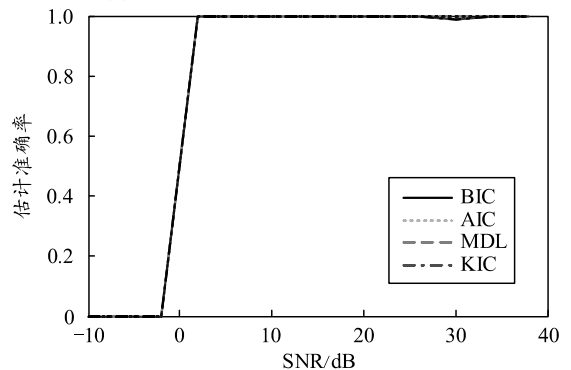
(a) 无对角加载, $M=10, N=300$



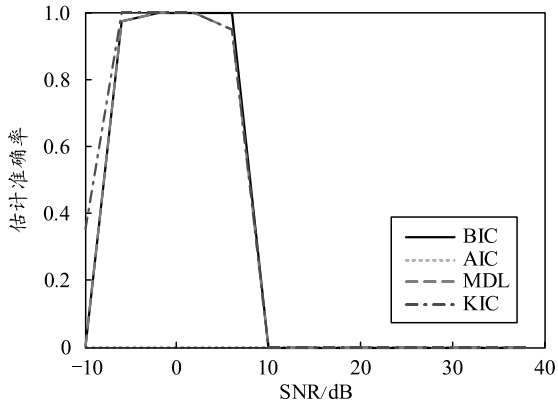
(b) 对角加载, $M=10, N=300$



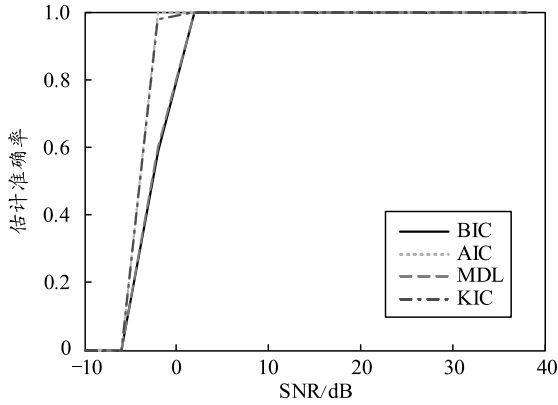
(c) 无对角加载, $M=100, N=300$



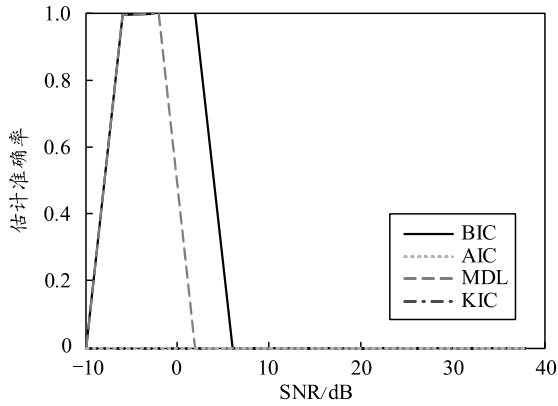
(d) 对角加载, $M=100, N=300$



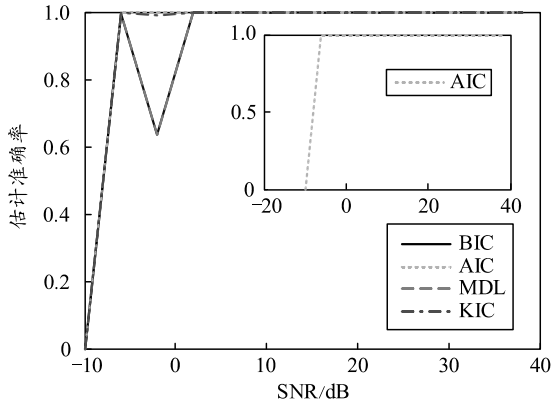
(e) 无对角加载, $M=300, N=300$



(f) 对角加载, $M=300, N=300$

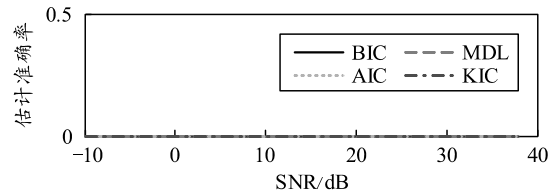


(g) 无对角加载, $M=310, N=300$

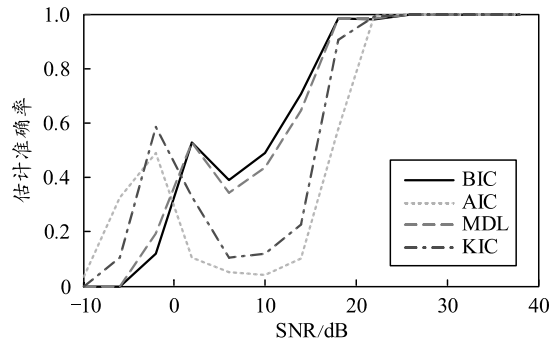


(h) 对角加载, $M=310, N=300$

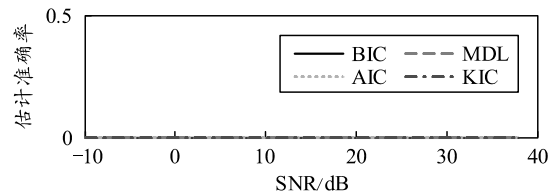
实验 2: 本方法与信息论准则方法 (BIC、AIC、MDL、KIC) 相结合, 以及直接采用信息论准则方法 (BIC、AIC、MDL、KIC), 在色噪声环境下的估计效果。信号源与实验 1 相同。信源数 $K=4$, 阵列天线阵元数分别设置为 $M=10, 100, 300, 310$, 导向矩阵 A 由随机函数 randn 产生, 采样频率为 120 MHz, 信号采样点数为 $N=300$, 混合信号叠加色噪声, 其协方差矩阵的元素由下式给出: $n_{ik} = \sigma_n^2 0.9^{|i-k|} \exp[j(i-k)\pi/2]$, $i, k=1, 2, \dots, M$, 其中 σ_n 是一个可调参数, 用于设定观测信号的信噪比, 信噪比变化范围为 $-10 \sim 40$ dB, 步长为 4 dB, 在每个信噪比上进行 200 次 Monte Carlo 仿真, 实验结果如图 2 所示。



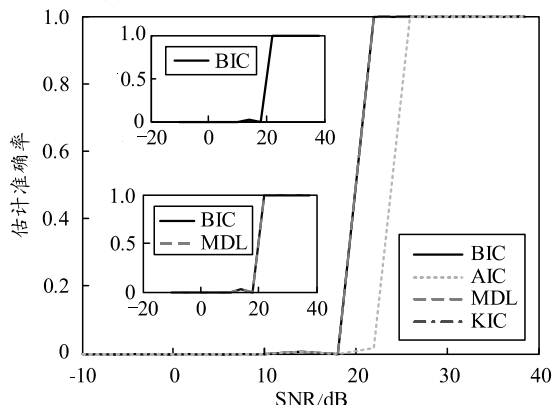
(a) 无对角加载, $M=10, N=300$



(b) 对角加载, $M=10, N=300$



(c) 无对角加载, $M=100, N=300$



(d) 对角加载, $M=100, N=300$

图 1 本方法与信息论准则类方法在高斯白噪声条件下的信源数估计结果对比

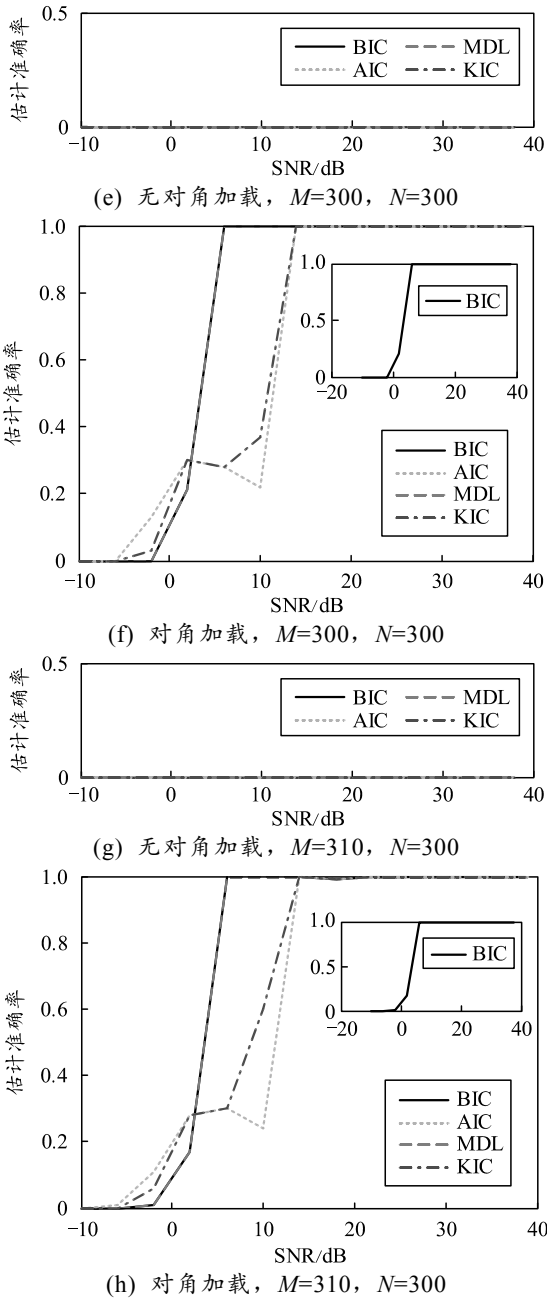


图 2 本方法与信息论准则类方法在色噪声条件下的信源数估计结果对比

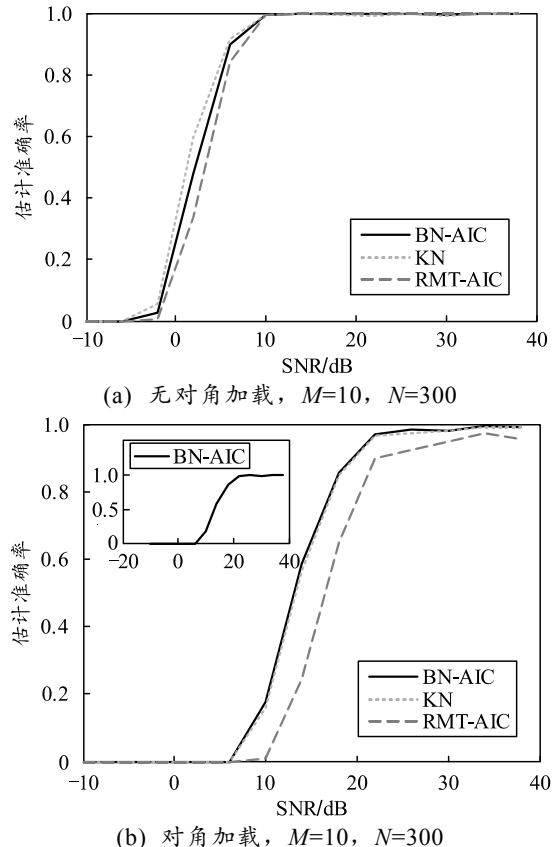
从图 2(a)和(b)可看出, 此时 $M/N \ll 1$, 天线阵列阵元数与样本数的关系满足经典渐近体系要求, 在色噪声条件下, 基于本方法结合信息论准则方法, 在一定信噪比条件下, 都能准确实现信源数的估计; 不应用本方法, 不能实现信源数的准确估计。在图 2(c)和(d)中, $M/N=1/3$, 天线阵列阵元数与样本数的关系近似满足经典渐近体系要求, 在应用本方法与信息论准则方法结合, 能达到很好的信源数估计效果, 否则信源数估计失败。在图 2(e)一(h)中, $M/N \geq 1$, 天线阵列阵元数与样本数的关系满

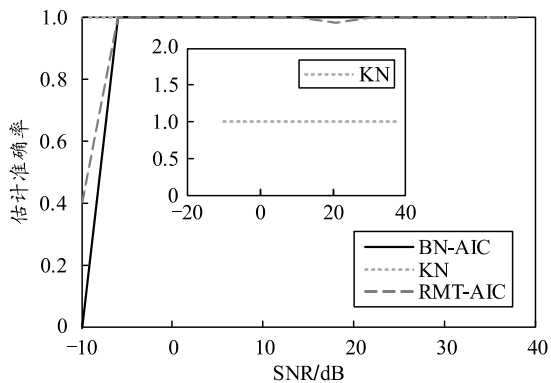
足一般渐近体系要求, 应用本方法结合信息论准则方法, 在较低信噪比能够稳健的实现信源数的准确估计; 而不应用本方法, 则信源数估计错误。

实验 3: 本方法与基于随机矩阵理论的信源数估计方法(BN-AIC、KN^[8]、RMT-AIC)相结合, 在 Gaussian 白噪声环境下的实验结果对比。辐射源信号设置为:

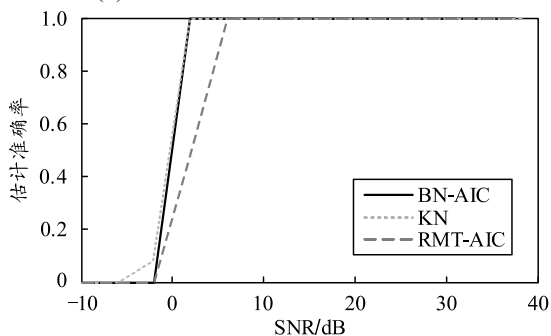
- 1) s_1 为 BPSK 信号, 码元宽度为 $10/31 \mu\text{s}$, 载波频率为 10 MHz;
- 2) s_2 为 CW 信号, 子脉冲宽度为 $15 \mu\text{s}$, 载波频率为 10 MHz;
- 3) s_3 为 LFM 信号, 脉冲宽度为 $10+10 \cdot \text{rand}(1) \mu\text{s}$, 起始频率为 10 MHz, 调频带宽为 $10/(1+\text{rand}(1)) \text{ MHz}$;
- 4) s_4 为 FSK 信号, 13 位巴克码, 码元宽度为 $10/13 \mu\text{s}$, 两码元处的频率分别为 25 和 50 MHz;
- 5) s_5 为 MPSK 信号, 弗朗克编码方式, 码元宽度为 $0.4 \mu\text{s}$, 载波频率为 50 MHz。

信源数 $K=5$, 阵列天线阵元数分别设置为 $M=10, 200, 310$, 导向矩阵 A 由随机函数 randn 产生, 采样频率为 120 MHz, 信号采样点数为 $N=300$ 。信噪比变化范围为 $-10 \sim 40 \text{ dB}$, 步长为 4 dB, 在每个信噪比上进行 200 次 Monte Carlo 仿真, 实验结果如图 3。

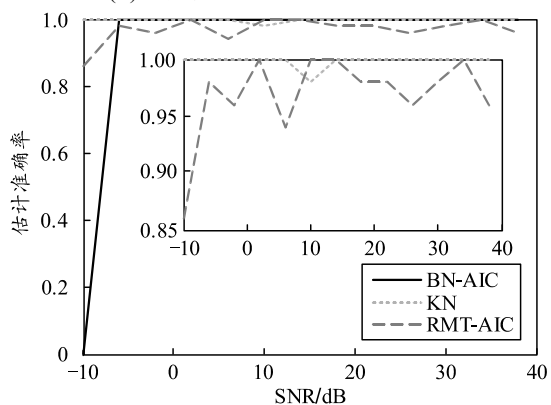




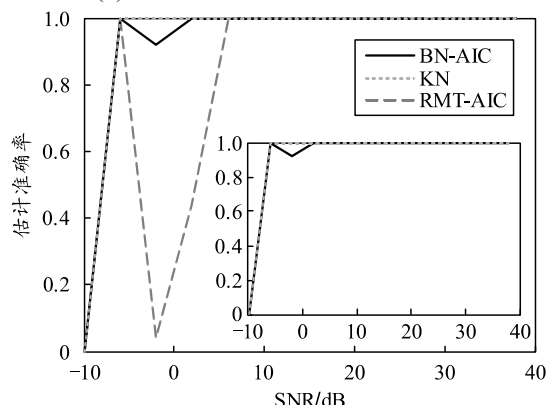
(c) 无对角加载, $M=200, N=300$



(d) 对角加载, $M=200, N=300$



(e) 无对角加载, $M=310, N=300$



(f) 对角加载, $M=310, N=300$

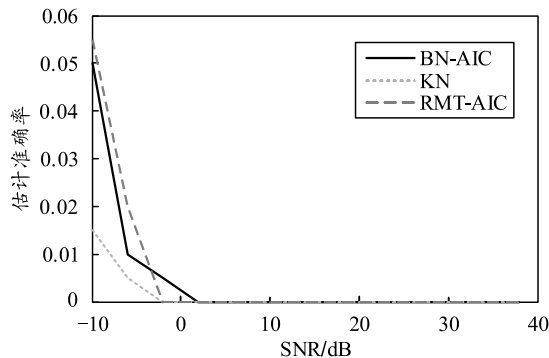
图 3 本方法与基于随机矩阵理论的信源数估计方法在 高斯白噪声条件下的估计结果对比

从图 3(a)和(b)可看出, 此时 $M/N \ll 1$, 天线阵列阵元数与样本数的关系满足经典渐近体系要

求, 在高斯白噪声条件下, 基于本方法结合随机矩阵理论方法, 当信噪比达到 20 dB 时能以接近概率 1 实现信源数估计; 直接应用随机矩阵理论方法, 信噪比达到 10 dB 时, 3 种方法能以概率 1 实现信源数估计。在图 3(c)和(d)中, $M/N=1/3$, 天线阵列阵元数与样本数的关系近似满足经典渐近体系要求, 在应用本方法与随机矩阵理论方法结合, 3 种方法估计准确率随信噪比增大而提高, 当信噪比增大到约 -5 dB 以上时, 估计准确率能达到概率 1。直接采用随机矩阵方法, BN-AIC、KN 方法估计准确率在信噪比达到约 0 以上时, 能以概率 1 实现信源数估计, RMT-AIC 方法需要信噪比达到 5 dB 以上时能以概率 1 实现源数估计。在图 1(e)和(f)中, $M/N > 1$, 天线阵列阵元数与样本数的关系满足一般渐近体系要求, 在应用本方法与随机矩阵理论方法结合, 3 种方法在信噪比达到 -5 dB 以上时能以概率 0.95 实现信源数准确估计; 直接采用随机矩阵理论方法, BN-AIC 和 KN 方法在信噪比达到 2 dB 以上时能以概率 1 实现信源数准确估计, RMT-AIC 在信噪比约为 5 dB 以上时方能以概率 1 实现信源数准确估计。

实验 4: 本方法与基于随机矩阵理论的信源数估计方法(BN-AIC、KN、RMT-AIC)相结合, 在色噪声环境下的实验结果对比, 辐射源信号与实验 3 相同。

信源数 $K=5$, 阵列天线阵元数分别设置为 $M=10, 200, 310$, 导向矩阵 A 由随机函数 randn 产生, 采样频率为 120 MHz, 信号采样点数为 $N=300$, 观测信号叠加空间色噪声, 其协方差矩阵的元素由下式给出: $n_{ik} = \sigma_n^2 0.9^{|i-k|} \exp[j(i-k)\pi/2]$, $i, k=1, 2, \dots, M$, 其中 σ_n 是一个可调参数, 用于设定观测信号的信噪比, 信噪比变化范围为 -10~40 dB, 步长为 4 dB, 在每个信噪比上进行 200 次 Monte Carlo 仿真, 实验结果如图 4 所示。



(a) 无对角加载, $M=10, N=300$

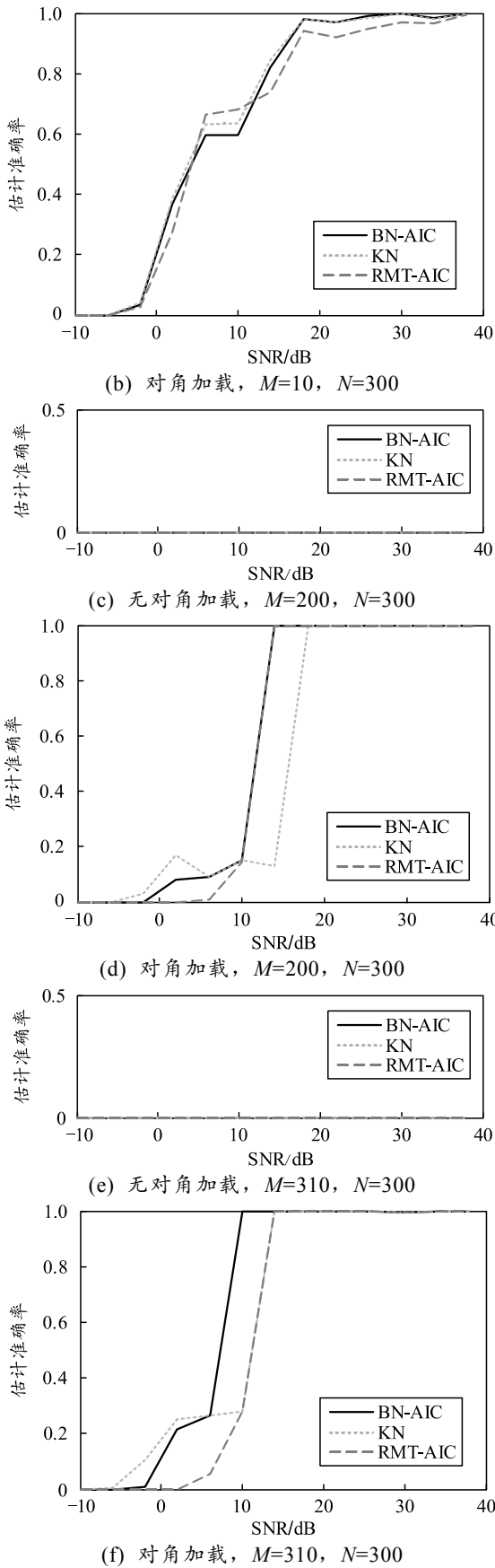


图 4 本方法与基于随机矩阵理论的信源数估计方法在色噪声下的估计结果对比

从图 4(a)和(b)可看出,此时 $M/N \ll 1$, 天线阵元数与样本数的关系满足经典渐近体系要求, 在色噪声条件下, 基于本方法结合随机矩阵理论方法, 当信噪比达到约 18 dB 以上时, 能以不低于 90% 的准确率实现信源数的估计; 不应用本方法, 则 3 种方法估计失败。在图 4(c)和(d)中, $M/N=1/3$, 天线阵列阵元数与样本数的关系近似满足经典渐近体系要求, 应用本方法与随机矩阵理论方法结合, 3 种方法当信噪比达到约 17 dB 以上时, 能够以概率 1 准确实现信源数估计; 不采用本方法, 不能准确实现信源数估计。在图 4(e)和(f)中, $M/N > 1$, 天线阵列阵元数与样本数的关系满足一般渐近体系要求, 应用本方法与随机矩阵理论方法结合, BN-AIC 方法当信噪比达到 8 dB 以上时, KN 和 RMT-AIC 方法当信噪比达到 10 dB 以上时, 能够以概率 1 准确实现信源数估计; 不采用本方法, 不能准确实现信源数估计。

3 结论

笔者提出一种改进式特征值二次对角加载信源数估计方法。相比于已有的特征值二次对角加载方法, 该方法不需要根据阵元数 M 与采样数 N 的比例关系来确定第 2 次对角加载量, 能够适用于天线阵元数与信号采样数为同一数量级的一般渐近体系之下, 噪声环境可为高斯白噪声或色噪声。该方法还实现了对随机矩阵理论信源数估计方法适用领域的拓展, 使之能适用于色噪声环境下。

参考文献:

- [1] WANG C C, XU J Q, ZENG Y H. Research on influence of source Enumeration on application of blind source separation algorithms[J]. Procedia Computer Science, 2017, 107: 379-384.
- [2] 冷巨昕. 盲信号处理中信源个数估计方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [3] 刘妍妍. 大维随机矩阵理论在阵列信号参数估计中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [4] WANG C C, JIANG L, ZENG Y H, et al. Underdetermined Mixing Matrix Estimation by Comprehensive Application of Cluster Validity Indexes[J]. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2020, 27(6): 73-86.
- [5] 谢娟英. 无监督学习方法及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 1-50.
- [6] WANG C C, ZENG Y H, WANG L D. Source Enumeration Method Combining Gerschgorin Circle

Transform and Generalized Bayesian Information Criterion in Large-scale Antenna Array[J]. Applied Computational Electromagnetic Society Journal, 2020, 35(7): 758-769.

[7] WANG C C, ZENG Y H, LI Z P, et al. Accurate Signal Source Number Estimation using Eigenvalue Quadratic

(上接第 37 页)

4 结束语

笔者鉴于 SVRM 优良的预测精度高、泛化能力强但运算效率较低的问题,深入研究 SVRM 延拓参数对延拓性能的影响,探索参数设置依据,提出了一种基于 SVRM 预测快速 EMD 延拓算法来解决端点效应。主要结论如下:

1) 以信号极值尺度自适应调节延拓长度与样本数量的方法,可在一定程度上解决在 EMD 分解过程中可能存在的过延拓和欠延拓问题;

2) 基于 SVRM 极值预测延拓的算法,可较小运算量获得较长延拓数据,并用仿真和试验验证了方法可显著提高 EMD 的分解精度及运算效率。

参考文献:

[1] CHEN B, YU S Y, YU Y, et al. Nonlinear active noise control system based on correlated EMD and Chebyshev filter[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 74-86.

[2] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. The Royal Society, 1998, 454: 903-995.

[3] 宿文才, 张树团, 刘陵顺. 基于改进极值波延拓的极点对称模态分解端点效应抑制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(z1): 294-301.

[4] HUANG N E. A new view of nonlinear waves: The Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,

(上接第 50 页)

[2] 王振宇, 封雪松, 宁方. 国外声共振混合技术在火炸药中的应用[J]. 兵工自动化, 2022, 41(5): 92-96.

[3] 孙晓乐, 刘海青, 万力伦, 等. 高效隔热材料在战斗部中的热防护性能研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 122-124.

[4] 余定洋. 短隧道采用太阳光光纤照明技术的优势分析[J]. 居业, 2019(6): 99, 101.

Diagonal Loading Method[J]. Sensors and Materials, 2022, 34(6): 1-19.

[8] KRITCHMAN S, NADLER B. Determining the number of components in a factor model from limited noisy data[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory System, 2008, 94(1): 19-32.

1999, 31: 417-457.

[5] 黄大吉, 赵进平, 苏纪兰. 希尔伯特-黄变换的端点延拓[J]. 海洋学报, 2003, 25(1): 1-11.

[6] 王录雁, 王强. EMD 自适应三角波延拓算法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 94-99.

[7] 薛冬林. 基于最小平方距离相关的 EMD 改进算法及应用[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 62-66.

[8] 邓拥军. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 257-263.

[9] 张郁山, 梁建文, 胡幸贤. 应用自回归模型处理 EMD 方法中的边界问题[J]. 自然科学进展, 2003, 13(10): 1054-1059.

[10] 张梅军, 陈灏, 曹勤. 基于 SVM 信号延拓改进的 EEMD 方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 93-97.

[11] 胡劲松, 杨世锡. EMD 方法基于径向基神经网络预测的数据延拓与应用[J]. 机械强度, 2007, 29(6): 894-899.

[12] 郝如江, 李非. EMD 端点效应抑制方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 341-345.

[13] 杨剑锋, 石戈戈, 周天奇, 等. 基于自适应序贯相似性检测波形匹配延拓的 EMD 端点效应抑制[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 121-125.

[14] HUANG D J, ZHAO J P. Practical implementation of Hilbert-Huang transform algorithm[J]. High Technology Letters, 2002, 8(3): 40-47.

[15] LIN D C, GUO Z L, AN F P, et al. Elimination of end effects in empirical mode decomposition by mirror image coupled with support vector regression[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 31: 13-28.

[5] 卢世杰, 史玲娜, 涂耘, 等. 短隧道采用太阳光光纤照明技术的优势分析[J]. 照明工程学报, 2017, 28(3): 62-65, 79.

[6] 付晓奇, 孙炳源, 李海生, 等. 光导照明技术及应用研究[J]. 电子世界, 2020(17): 15-16.

[7] 何铁峰. 光导照明系统在隧道工程中的应用[J]. 隧道与轨道交通, 2018(4): 30-32, 58.

[8] 田红光, 李晓丹. 光纤照明系统在井下照明的应用研究[J]. 微型机与应用, 2015, 34(18): 48-49.