

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.03.013

基于双阵元的宽带相干信源数估计

邱月阳, 何培宇, 崔 敖, 徐自励

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 不同噪声条件下, 宽带相干信源数估计是阵列信号处理中的难点问题. 本文针对宽带信号的特点, 利用虚拟阵列扩展技术, 将宽带信号的不同频率成分虚拟为不同间距的虚拟阵元, 通过空间平滑削弱信号之间的相干性. 但由于噪声的功率谱非严格平坦, 虚拟阵列协方差矩阵的噪声特征值发散程度严重, 经典的信息论方法完全失效. 基于对角加载技术, 提出了一种新的加载量, 有效地平滑了噪声特征值, 减弱了其发散程度, 并在此基础上利用比率准则改进了信息论方法, 实现了两阵元对多个信源的数目估计. 仿真实验表明, 改进后的方法在白噪声和色噪声条件下均具有较好的性能, 优于盖氏圆方法.

关键词: 信源数估计; 宽带相干信源; 虚拟阵列; 空间平滑; 对角加载

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)03-0494-07

Estimation of wideband coherent source number based on two-element array

QIU Yue-Yang, HE Pei-Yu, CUI Ao, XU Zi-Li

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The estimation of wideband coherent sources number with different noises is a challenging problem in array signal processing. Aiming at the characteristics of wideband signals, a novel method is proposed based on two-element array, which employs virtual array extension technique to virtualize the different frequencies of incident signals into varying interval virtual elements. Additionally, the correlation among incident sources can be weakened by spatial smoothing technique. However, the noise eigenvalues of the virtual array covariance matrix is seriously divergent due to the non-strictly flat noise power spectrum, which neutralizes classical information methods. In this paper, a new loading value based on diagonal loading is proposed, which can effectively smooth the noise eigenvalues. Furthermore, the ratio criterion is applied to improve the information methods in this paper. Simulations demonstrate this improved method can achieve better performance than conventional Gerschgorin disk estimator with white and colored noises.

Keywords: Source number estimation; Wideband coherent source; Virtual array; Spatial smoothing; Diagonal loading

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61071159); 国家自然科学基金联合基金(U1733109)

作者简介: 邱月阳(1992-), 男, 四川内江人, 硕士, 研究方向为阵列信号处理. E-mail: qiuyueyang18@163.com

通讯作者: 何培宇. E-mail: hepeiyu@scu.edu.cn

1 引言

在高分辨波达方向估计中, 信源数估计具有极其重要的意义, Schmidt 的 MUSIC 算法、Roy 等人提出的 ESPRIT 算法等经典波达方向估计算法都是以准确估计信源数为前提的. 若判断出的信源数目与真实信源数目不一致, 将使得高分辨算法的谱峰数目与信源数目不相等, 导致漏警或虚警, 严重影响算法的性能^[1,2].

经典的信源数估计方法如信息论方法是建立在窄带信号模型基础上的, 包括 Akaike 信息论准则 (Akaike Information Criterion, AIC) 和最小描述长度准则 (Minimum Description Length, MDL). AIC 准则在小样本下存在过估计, 且不是一致性估计; MDL 是一致性估计, 但在低信噪比下性能较差, 两种方法在色噪声条件下均失效. 盖氏圆方法利用盖氏半径对矩阵特征值的限定关系区分信号子空间和噪声子空间, 能在色噪声情况下有效估计出信源数目, 具有较好的检测效果^[3,4].

针对宽带信号, 通常有基于非相干信号子空间算法 (Incoherent Signal-Subspace Method, ISM) 和基于相干信号子空间算法 (Coherent Signal-Subspace Method, CSM), ISM 不能充分利用宽带信号所携带的信息, 且不能处理相干信源, CSM 算法可以处理相干信源, 但需要频率聚焦, 运算量大. 文献[5]提出了基于噪声特征值统计特性的信源数估计方法, 但其可检测到的信源个数严格受限于阵元数目, 且只能用于白噪声条件下的宽带非相干信源数估计; 对于相干信号, 通常通过空间平滑技术进行去相干处理, 空间平滑是以牺牲阵列孔径为代价的, 故估计多相干源时需要大量阵元; 针对色噪声下的宽带信源数估计, 文献[6]给出了色噪声模型, 分析了色噪声下信息论方法失效原因, 并利用对角加载技术^[7]改进了信息论方法, 能有效估计信源数目, 但该方法在信噪比较高时仍存在一定的错误概率, 不是一致性估计. 文献[8-10]将虚拟阵列技术引入到宽带信号波达方向估计中, 增大了阵列的自由度, 突破了在常规空间谱估计中要求信号源个数必须小于阵元个数的限制, 实现了信源数多于阵元数的 DOA 估计. 但该方法是基于信源数目已知情况, 而实际中往往需要先估计信源数目, 虚拟阵列由于其协方差矩阵对应的噪声特征值发散严重而不能直接用于信源数估计, 且不能处理相干信源.

本文基于虚拟阵列扩展技术, 利用两阵元的实际阵列, 通过对子带的均匀划分, 将不同子带的数据映射为不同间距虚拟阵元的接收数据, 得到一个虚拟的均匀线阵. 针对虚拟线阵, 由于噪声功率谱非严格平坦, 各虚拟阵元上的噪声功率不同, 虚拟阵列协方差矩阵的噪声特征值存在不同程度的发散. 为平滑噪声特征值, 本文提出了基于局部特征值标准差的对角加载方法, 可有效减弱噪声特征值的发散程度; 并在此基础上利用比率方法改进信息论准则进行信源数目估计, 实现了两阵元对多个宽带相干源的数目估计. 仿真实验表明, 该方法准确率较高, 且在色噪声条件下仍具有较好的性能.

2 宽带信号模型

假设 P 个宽带信号分别以 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_P$ 角度入射到有 M 个阵元的均匀线阵, 阵元间距为 d , 则第 m 个阵元的接收数据可以表示为

$$x_m(t) = \sum_{p=1}^P s_p(t - \tau_{mp}) + n_m(t) \quad (1)$$

其中, $m=1, 2, \dots, M$; $p=1, 2, \dots, P$; $s_p(t)$ 为宽带入射信号; $n_m(t)$ 为第 m 个阵元上的加性高斯白噪声; $\tau_{mp} = \frac{(m-1)d \sin \theta_p}{c}$, 为第 p 个信号入射到第 m 个阵元相对于参考阵元的时延.

由于宽带信号的方向向量随信号频率的变化而变化, 是频率的函数, 因此通常在频域描述接收数据矩阵. 将宽带信号在带宽内划分为 K 个窄带, 利用 K 点离散傅里叶变换获得频域形式后并保证数据间互不相关, 则得到宽带模型^[11]表达式为

$$X_j(f_k) = A(f_k)S_j(f_k) + N_j(f_k) \quad (2)$$

式(2)中, $j=1, 2, \dots, J$; $k=1, 2, \dots, K$; $X_j(f_k)$, $S_j(f_k)$, $N_j(f_k)$ 分别表示频率 f_k 下的阵列接收信号、信源信号、噪声信号的 FFT 变换; $A(f_k) = [a_1(f_k), a_2(f_k), \dots, a_P(f_k)]$ 为窄带频率 f_k 对应的阵列流形矩阵; $a_p(f_k) = [e^{-j2\pi f_k \tau_{1p}}, e^{-j2\pi f_k \tau_{2p}}, \dots, e^{-j2\pi f_k \tau_{Mp}}]^T$ 为相应的导向矢量.

3 算法描述

3.1 虚拟阵列扩展

采用间距为 d 的两阵元的阵列, 宽带信号以 θ 角度入射到阵列上, 如图 1 所示.

设阵元 1 为参考阵元, 将阵元 2 上接收的宽带信号视为由频率为 $f_k, k=1, 2, \dots, K$ 的 K 个窄带信号组成, 则有

$$\begin{bmatrix} x_{21}(t) \\ x_{22}(t) \\ \vdots \\ x_{2K}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_{1,1}} & e^{j\varphi_{1,2}} & \cdots & e^{j\varphi_{1,P}} \\ e^{j\varphi_{2,1}} & e^{j\varphi_{2,2}} & \cdots & e^{j\varphi_{2,P}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{j\varphi_{K,1}} & e^{j\varphi_{K,2}} & \cdots & e^{j\varphi_{K,P}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_P(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_K(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, $\varphi_{k,p} = \frac{2\pi d f_k \sin\theta_p}{c}$; $s_p(t)$ 为第 p 个宽带入射信号, $p = 1, 2, \dots, P$, 每个宽带信号都被划分为 K 个子带, 并对应有不同子带的导向矢量; $x_{2k}(t)$ 、 $n_k(t)$ 分别为阵元 2 上第 k 个子带的接收信号和子带噪声信号, $k = 1, 2, \dots, K$.

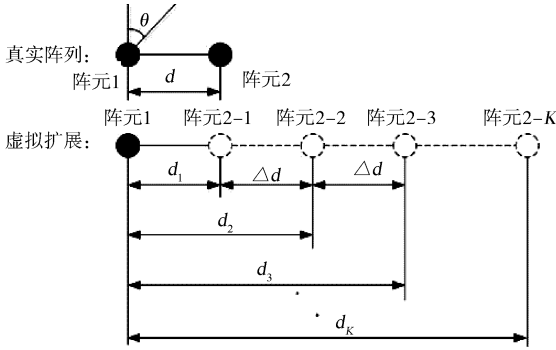


图 1 虚拟阵列扩展
Fig. 1 Virtual array extension

针对窄带信号 f_k , 设入射角为 θ , 则信号入射到阵列两阵元的相位差为

$$\varphi_k = \frac{2\pi d f_k \sin\theta}{c} \quad (4)$$

其中, c 为电磁波的传播速度. 对(4)式进行简单变换得到

$$\varphi_k = \frac{2\pi f_0 \sin\theta}{c} \left(\frac{f_k}{f_0} d \right) = \frac{2\pi f_0 \sin\theta}{c} d_k \quad (5)$$

式(5)中, $d_k = \left(\frac{f_k}{f_0} \right) d, k = 1, 2, \dots, K$, 上式表明, 由宽带信号不同频率成分引起的相位差变化可以等效为由窄带信号入射到不同间距阵元引起的变化, 故可以通过对阵元 2 的数据作子带划分处理得到虚拟阵元.

若对阵元 2 的数据均匀划分子带, 则可构成如图 1 虚线圆圈所表示的虚拟均匀线阵, 其阵元间距为

$$\Delta d = \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) d \quad (6)$$

其中, f_0 为参考频率; Δf 为子带划分时的频率间隔. 结合式(6), 则有

$$\varphi_{k,p} = \frac{2\pi(k-1)\Delta d f_0 \sin\theta_p}{c} \quad (7)$$

参考频率 f_0 取最低频率子带的中心频率, 结合图 1 可知, 阵元 2 接收信号划分为多个子带, 完成了阵列的虚拟扩展, 形成了一个新的均匀线阵, 此时得到的虚拟线阵 X_2 的数据不能立即使用, 需要进行相位补偿, 其目的是为了保证快拍的有效性, 本文采用文献[9]提出的方法用阵元 1 的数据对阵元 2 各子带数据进行相位补偿, 得到虚拟线阵的有效快拍 X_V .

$$X_V = [x'_{21}, x'_{22}, \dots, x'_{2K}]^T \quad (8)$$

式(8)中, x'_{2k} 为第 k 个虚拟阵元的接收数据; X_V 为虚拟线阵接收到的频率为 f_0 的有效数据.

为避免阵列流形模糊, 虚拟阵列的阵元间距需满足:

$$\Delta d = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0} \quad (9)$$

其中, λ_0 为参考频率 f_0 对应的波长, 结合式(6)可知, 真实阵列的阵元间距 d 应满足:

$$d = \frac{c}{2 \cdot \Delta f} = \frac{cK}{2B} \quad (10)$$

实际中, 阵元间距 d 在选定阵列时就固定了, 因此可将虚拟线阵的孔径表示为

$$d_{\text{virtual}} = (K-1)\Delta d = \frac{2(K-1)B}{2Kf_{\text{center}} - (K-1)B} d \quad (11)$$

则虚拟线阵与真实阵列的孔径之比为

$$r = \frac{d_{\text{virtual}}}{d} = \frac{2(1 - \frac{1}{K})}{2 \frac{f_{\text{center}}}{B} - (1 - \frac{1}{K})} \quad (12)$$

虚拟线阵的孔径 d_{virtual} 与信号的相对带宽 $\frac{B}{f_{\text{center}}}$ 和划分的子带数目 K 有关, 信号相对带宽由入射信号决定, 当 $\frac{B}{f_{\text{center}}}$ 确定时, $K \rightarrow \infty, d_{\text{virtual}}$ 将趋于一个常数. 因此, 无限制的增加划分的子带数目并不能有效增大阵列孔径.

3.2 前后向空间平滑

前后向空间平滑是前向空间平滑与后向空间平滑的结合, 如图 2 所示.

将具有 K 个阵元的均匀线阵划分成 L 个子阵, 每个子阵具有 N 个阵元, 则有 $L = K - N + 1$, 前向、后向空间平滑各子阵的接收数据分别为

$X_l^f = [x_l(t), \dots, x_{l+N-1}(t)]^T, X_l^b = [x_{K-l+1}^*(t), \dots, x_{l+1}^*(t)]^T, l=1, 2, \dots, L$; 前后向空间平滑后总的协方差矩阵为

$$R = \frac{R^f + R^b}{2} \quad (13)$$

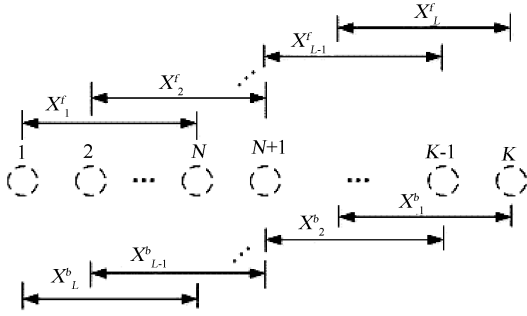


图 2 前后向空间平滑
Fig. 2 Forward backward spatial smoothing

其中, $R^f = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L R_l^f, R^b = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L R_l^b$ 分别为前向、后向空间平滑后阵列的协方差矩阵, R_l^f, R_l^b 为对应的第 l 个子阵的协方差矩阵。

对于单向空间平滑方法, 在阵元数 K 一定时, 只能分辨出 $K/2$ 个相干信号。前后向空间平滑可以进一步均匀线阵处理相干信号的能力, 与单向空间平滑方法相比, 在阵元数 K 一定时, 前后向空间平滑可以处理 $\frac{2K}{3}$ 个相干信号^[12]。

3.3 改进的信源数估计方法

信息论方法具有统一的表示形式, 通常由似然函数项 $L(k)$ 和罚函数项 $P(k)$ 构成。

$$J(k) = L(k) + P(k) \quad (14)$$

通过对 $L(k), P(k)$ 的不同选择就可以得到不同的准则, AIC 准则, MDL 准则可以表示为

$$AIC(k) = 2L(M - k) \ln \Delta(k) + 2k(2M - k)$$

$$MDL(k) = L(M - k) \ln \Delta(k) + 0.5k(2M - k) \ln L$$

其中, $\Delta(k) = \frac{1}{M - k} \sum_{i=k+1}^M \lambda_i$ 为似然函数项, λ_i 为阵元协方差矩阵的特征值; L 为快拍数; M 为阵元数; k 为待估计的信源数。

将协方差矩阵 R 的特征值按降序排列为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_P, \lambda_{P+1}, \dots, \lambda_M$ 。信息论方法中, 似然函数项 $\Delta(k)$ 为特征值的算术平均与几何平均的比值, 在理想情况下, 数据协方差矩阵的大特征值数目对应信号源的数目, 而其他小特征值是相等的, 且等于噪声功率, 即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_P \geq \lambda_{P+1} = \lambda_{P+2} = \dots =$

$\lambda_M = \sigma^2, \sigma^2$ 为噪声功率。信息论方法正是基于这一特点, 可以准确地估计出信号源数。

实际中, 由于快拍数、信噪比的限制会使得那些小特征值围绕噪声功率大小左右波动, 不会相差太大, 满足:

$$\lambda_i \leq \sigma^2 \pm \epsilon^2, i = P + 1, P + 2, \dots, M \quad (15)$$

式中, ϵ^2 为一个很小的数, 远小于 σ^2 , 因此在快拍数和信噪比满足一定条件时, 即使协方差矩阵的较小特征值不相等, 信息论方法仍然能有效估计信源数目。

针对本文所得到的虚拟线阵, 每个虚拟阵元的接收数据为宽带信号的某个子带的的数据, 由于噪声功率谱非严格平坦, 噪声在不同子带的功率不同, 导致虚拟线阵协方差矩阵对应的噪声特征值严重发散, 不再满足式(15), 信息论方法失效。

空间平滑技术在对信号进行去相干处理的同时, 也能在一定程度上平滑噪声特征值, 但其能力是有限的^[12]。对角加载技术通过对特征值进行修正, 有效减弱了噪声特征值的发散程度, 加载方式如下。

$$\bar{R} = R + \lambda_{DL} I \quad (16)$$

式中, \bar{R} 为加载后的阵列协方差矩阵; I 为单位矩阵; λ_{DL} 为加载量; 设 γ_i 为 \bar{R} 的特征值, λ_i 为 R 的特征值, 加载量会使 R 的特征值变化, $\gamma_i = \lambda_i + \lambda_{DL}$, 不会影响其特征向量。

加载量的确定是一个难题, 太大会影响低信噪比下算法的性能, 太小则不能平滑噪声特征值, 文献^[7]基于色噪声背景给出了一种加载量, 如下式。

$$\lambda_{DL} = \sqrt{\sum_{i=1}^M \lambda_i} \quad (17)$$

该加载量为一个固定值, 相当于引入了白噪声, 在低信噪比下性能较差, 且对 AIC 准则来说仍然不是一致性估计; 为有效地平滑噪声特征值, 提出了一种新的加载量, 该加载量不是一个固定值, 而是根据特征值的局部方差而变化, 第 i 个特征值加载量为 c_i 。

$$c_i = \sqrt{\text{var}(\Delta_i)}, i = 1, 2, \dots, K \quad (18)$$

其中, $\Delta_i = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i]$, 特征值 λ_i 按降序排列; $\text{var}(\ast)$ 为求方差操作, 加载后的特征值为 $\gamma_i = \lambda_i + c_i$ 。当噪声特征值差异较大时, 对应加载量就较大, 差异较小时, 对加载量越小, 故此加载量能有效平滑噪声特征值。

为提高估计的准确度, 克服 AIC 准则非一致性估计的缺点, 利用比率准则进一步修正信息论方法。

$$RL - AIC(k) = \frac{CAIC(k)}{CAIC(k+1)}$$

$$RL - MDL(k) = \frac{CMDL(k)}{CMDL(k+1)} \quad (19)$$

其中, CAIC、CMDL 为对修正后的特征值使用 AIC、MDL 准则的结果, RL-AIC、RL-MDL 为比率改进后的方法, 求得使 RL-AIC 或 RL-MDL 最大的 k 值即为信源数目。

4 仿真实验

基于上述方法, 采用两个阵元的实际阵列, 对宽带相干入射信号进行检测。设所有信号具有相同的带宽, 中心频率均为 2 GHz, 带宽为 400 MHz, 即相对带宽为 0.2, 信号传播速度为 $c=3 \times 10^8$ m/s。

实验 1 两阵元阵列估计多个宽带相干信源

6 个宽带相干信号, 来波方向分别为 -30° 、 -15° 、 0° 、 15° 、 30° 、 45° , 入射信号由 1 个增加到 6 个; 假设真实阵列的两个阵元信噪比均为 10 dB, 快拍数为 1024, 将接收到的宽带信号划分为 22 个窄带分量, 对应虚拟阵元的间距 $\Delta d = \frac{\lambda_0}{2}$, λ_0 为参考频率 f_0 对应的波长, 应用本文方法, 前后向空间平滑中每个子阵包含 9 个虚拟阵元, 进行 300 次 Monte Carlo 仿真实验, 结果如图 3 所示。

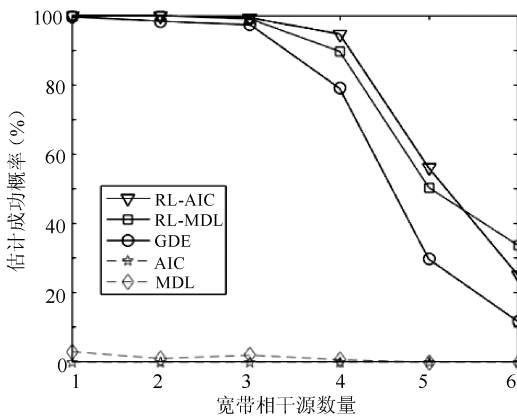


图 3 估计准确率与信源数量的关系

Fig. 3 Probability of correct detection versus number of source

由图 3 可以看出, 利用两阵元虚拟扩展后的阵列估计信源数目, AIC 准则、MDL 准则完全失效, RL-AIC 方法、RL-MDL 方法及盖氏圆方法均能估计出信源数目, 在入射信号较少时准确率很高, 当入射信号超过 4 以后, 算法性能下降较快。

信息论方法失效是由于虚拟阵列协方差矩阵噪声特征值非常发散, RL-AIC 方法和 RL-MDL

方法通过对噪声特征值进行标准差修正, 在一定程度上平滑了噪声特征值, 减弱了噪声分量的不相等性, 能达到较高的准确率。盖氏圆方法是利用盖氏半径对特征值的限定进行信源数估计, 不需要具体特征值的信息, 故可以有效地进行估计。

实验 2 虚拟阵列孔径极限。

两个宽带相干信号以 -20° 、 10° 入射到阵列上, 噪声为白噪声, 信噪比为 -5 dB, 快拍数为 1024, 对阵列的接收数据划分不同数量的窄带, 进行 300 次 Monte Carlo 仿真实验, 表 1 为不同子带数目对估计准确率的影响, 图 4 为虚拟线阵和真实阵列的孔径之比 $\frac{(K-1)\Delta d}{d}$ 与子带数目 K 的关系。

表 1 估计准确率与子带数目的关系

Tab. 1 Probability of correct detection versus K

子带数目	10	20	30	40	50
RL-AIC(%)	40.67	91.67	92.67	92.00	90.67
RL-MDL(%)	12.33	74.00	74.33	75.67	73.67
GDE(%)	34.33	51.67	50.00	54.33	50.00

由表 1 知, 划分 10 个子带时, 准确率较低, 因为空间平滑的子阵数量太少; 当 K 增加到 20 时, 准确率有了很大的提高, 尤其是 RL-AIC 方法, 达到了 91.67%; 但当 K 继续增加时, 各方法的性能并没有显著的提高。结合图 4 可知, 当 $K > 20$ 时, 再继续增加 K , 虚拟阵列的孔径只有很小的增量, 即此时虚拟阵元数的增加是以缩小阵元间距为代价的, 阵列孔径并没有显著的变化。因此, 无限制的增大 K 是无意义的。

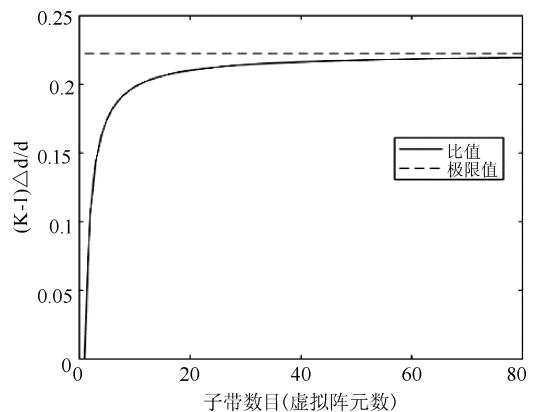


图 4 虚拟阵列与真实阵列孔径比值与子带数关系
Fig. 4 Curve of array aperture ratio versus K

实验 3 白噪声及色噪声下算法的性能。

两个宽带相干信号以 -20° 、 10° 入射到阵列上, 在白噪声和色噪声条件下分别进行实验, 用文

献[6]的色噪声模型, $n_{ik} = \sigma_n^2 \rho^{|i-k|} \exp(j(i-k) \frac{\pi}{2})$, n_{ik} 为协方差矩阵 R_N 的第 (i, k) 个元素, ρ 为噪声相关系数, 取为 0.6. 进行 300 次 Monte Carlo 仿真实验, 结果如图 5~8 所示.

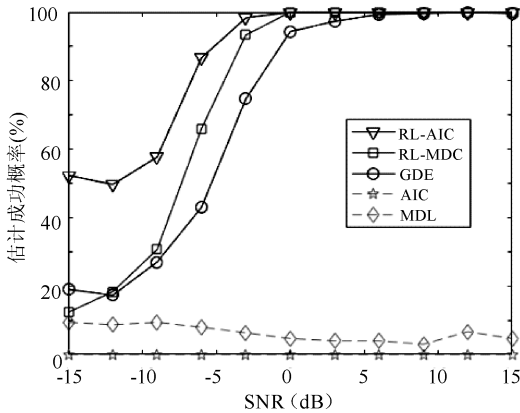


图 5 白噪声下算法的估计准确率

Fig. 5 Probability of correct detection versus SNR under white noise

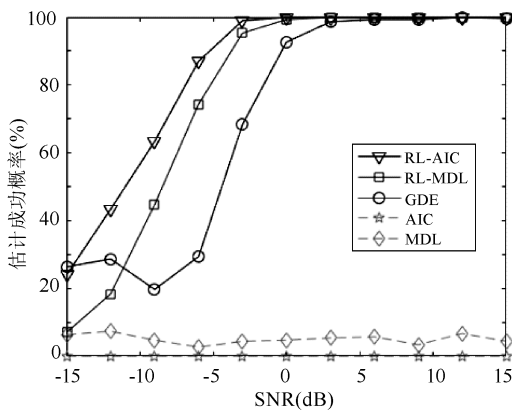


图 6 色噪声条件下算法的估计准确率

Fig. 6 Probability of correct detection versus SNR under colored noise

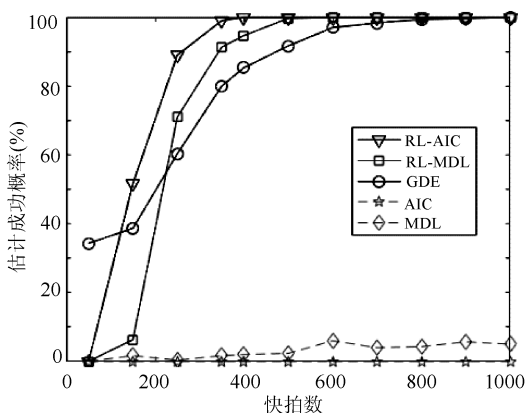


图 7 白噪声条件下不同快照下算法的性能

Fig. 7 Probability of correct detection versus number of snapshots under white noise

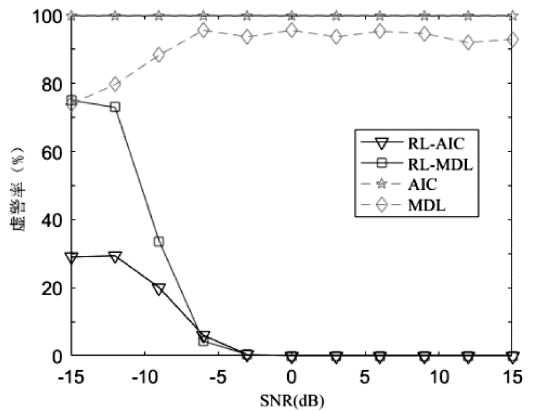


图 8 白噪声下各算法虚警率

Fig. 8 False alarm rate of several criterions versus SNR under white noise

图 5 为白噪声条件下, 信噪比对算法的估计准确率的影响, 可以看出, 信息论方法 (AIC、MDL 准则) 完全失效, RL-AIC 方法具有最好的性能, RL-MDL 方法在低信噪比时与 GDE 方法性能接近, 但随着信噪比的增大, 前者性能迅速提高. 盖氏圆方法需要确定一个与快拍数有关的调整因子 $D(L)$, 如果选择不合适, 将会严重影响其性能.

图 6 为色噪声条件下, 信噪比对估计准确率的影响, 可以看出, 在 $SNR > 0$ dB 时, RL-AIC、RL-MDL、GDE 方法均能有效估计出信源数目, RL-AIC 方法性能最好.

图 7 为白噪声条件下, 快拍数对信源数估计的影响, 可看出, 在小快拍数时, GDE 方法性能更好, 随着快拍数增加, RL-AIC、RL-MDL 的准确率迅速上升, 且 RL-AIC 的准确率更高, 两者均为一致性估计.

图 8 为白噪声情况下, 各算法的虚警率, 由图可以看出, 信息论方法 (AIC、MDL 准则) 具有极高的虚警概率, RL-MDL 方法在低信噪比虚警率较高, 随着信噪比的增加, 虚警率降低, 最终为 0, RL-AIC 方法虚警率最低, 性能最好.

5 结论

针对宽带信号的特点, 利用虚拟阵列扩展技术, 实现了两阵元对多个相干信源的数目估计. 信息论方法因噪声特征值严重发散而失效, 改进后的 RL-AIC、RL-MDL 方法能有效估计出信源数目, 性能优于盖氏圆方法, 且在色噪声条件下仍具有较高的准确率, 其中 RL-AIC 方法性能最优. 在划分子带构造虚拟阵列时, 虚拟阵列的孔径存在一个极限值, 与信号的相对带宽有关. 对于相对带宽较大

的信号,在选定阵列后,可在一定范围内通过划分更多的子带增加阵列孔径,提高算法性能.

参考文献:

- [1] Nadakuditi R R, Silverstein J W. Fundamental Limit of sample generalized eigenvalue based detection of signals in noise using relatively few signal-bearing and noise-only samples[J]. *IEEE J Selected Topics Signal Proces*, 2009, 4: 468.
- [2] Kritchman S, Nadler B. Non-parametric detection of the number of signals: hypothesis testing and random matrix theory[J]. *IEEE Trans Signal Proces*, 2009, 57: 3930.
- [3] Wu H T, Yang J F, Chen F K. Source number estimators using transformed Gerschgorin radii [J]. *IEEE Trans Signal Proces*, 1995, 43: 1325.
- [4] Huang L, Long T, Wu S. Source enumeration for high-resolution array processing using improved gerschgorin radii without eigendecomposition[J]. *IEEE Trans Signal Proces*, 2008, 56: 5916.
- [5] 张恒利, 赵拥军, 张培峰. 一种新的宽带信号源数目快速估计方法[J]. *信号处理*, 2009, 25: 567.
- [6] Stoica P, Cedervall M. Detection tests for array processing in unknown correlated noise fields[J]. *IEEE Trans Signal Proces*, 1997, 45: 2351.
- [7] Carlson B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays[J]. *IEEE Trans Aerospace El*, 1988, 24: 397.
- [8] Krolik J, Swingler D. Focused wide-band array processing by spatial resampling[J]. *IEEE Trans Acoustics Speech Signal Proces*, 1990, 38: 356.
- [9] 宋彦发, 甘露, 魏平. 宽带信号源的波达方向估计新方法[J]. *现代电子技术*, 2008, 31: 81.
- [10] 周鹤, 何培宇, 张勇. 一种改进的虚拟阵列语音信号 DOA 估计算法[J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2015, 52: 319.
- [11] Wang H, Kaveh M. Estimation of angles-of-arrival for wideband sources[C]// *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP*. [s. l.]: IEEE, 1984.
- [12] Williams R T, Prasad S, Mahalanabis A K, *et al*. An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment [J]. *IEEE Trans Acoustics Speech Signal Proces*, 1988, 36: 425.
- [13] 顾帅楠, 李玉翔, 赵峰, 等. MIMO 雷达非均匀子阵划分方法研究[J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2017, 54: 309.