

基于改进 MUSIC 算法的宽带信号 DOA 估计

黎昕婷, 钟舜聪, 钟剑锋

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: 现有的波达方向(DOA)估计算法在估计被动探测系统中的宽带信号方位时,存在 DOA 估计结果偏差大、运算复杂度高等问题,难以满足信号实时处理的要求。为提高多源信号 DOA 估计的空间分辨率,提出一种基于 S 变换且不需要预估信号源个数的多重信号分类改进算法。根据宽带信号的频域特征,利用 S 变换处理阵列接收信号,得到多分辨的时频谱矩阵,同时构建时频域的阵列信号数据模型,结合信号功率谱矩阵呈联合对角化结构的特点,设计基于 S 变换的子空间谱估计公式。在此基础上,通过谱峰搜索进行 DOA 估计,实现多源宽带信号的声源定位。仿真结果表明,在信噪比范围为-15~10 dB 的条件下,该算法的估计成功率始终保持在 90% 以上,相比 TCT、CS_TCT、CWT_MUSIC 算法,其具有较优的估计性能,并且无需预估信号源数。

关键词: 宽带信号;波达方向估计;MUSIC 算法;S 变换;声源定位

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 黎昕婷, 钟舜聪, 钟剑锋. 基于改进 MUSIC 算法的宽带信号 DOA 估计[J]. 计算机工程, 2022, 48(11): 201-206.

英文引用格式: LI X T, ZHONG S C, ZHONG J F. DOA estimation of wideband signal based on improved MUSIC algorithm[J]. Computer Engineering, 2022, 48(11): 201-206.

DOA Estimation of Wideband Signal Based on Improved MUSIC Algorithm

LI Xinting, ZHONG Shuncong, ZHONG Jianfeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

[Abstract] The existing Direction of Arrival (DOA) estimation algorithms estimate the wideband signal azimuth in the passive detection system, there are some problems such as large deviation of DOA estimation results and high computational complexity, which are difficult to meet the requirements of signal real-time processing. To improve the spatial resolution of DOA estimation of multisource signals, this paper proposes an improved multiple signal classification algorithm based on the S-transform that does not require the estimation of the number of signal sources. According to the frequency-domain characteristics of wideband signals, the S-transform is used to process the received signal of the array to establish the multi-resolution time spectrum matrix. At the same time, an array signal data model in the time-frequency domain is constructed. Based on the characteristics of the joint diagonalization structure of the signal power spectrum matrix, a subspace spectrum estimation equation based on the S-transform is formulated. On this basis, the DOA is estimated through a spectral search to realize the sound source location of multisource wideband signals. The simulation results show that the estimation success rate of the algorithm is always greater than 90% when the signal-to-noise ratio range is approximately -15~10 dB. Compared to the TCT and CS_TCT, CWT_MUSIC algorithms, the proposed algorithm has better estimation performance and does not need to estimate the number of signal sources.

[Key words] wideband signal; Direction of Arrival (DOA) estimation; MUSIC algorithm; S-transform; sound source location

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0063029

0 概述

基于传感器阵列的波达方向 (Direction of

Arrival, DOA) 估计是声纳、雷达、通信、语音处理等领域研究热点,然而现代化技术发展的需求使 DOA 估计不再局限于处理传统窄带信号。在工程

基金项目: 国家自然科学基金(51905102, 51675103); 中国博士后科学基金(2019M662226); 闽江学院福建省信息处理与智能控制重点实验室开放课题(MJUKF-IPIC202005)。

作者简介: 黎昕婷(1998—),女,硕士研究生,主研方向为声信号处理与定位;钟舜聪,教授、博士生导师;钟剑锋(通信作者),讲师、博士。

收稿日期: 2021-10-22 **修回日期:** 2021-12-07 **E-mail:** lixt1010@163.com

实践中,大部分信号是非平稳或谱时变的。在窄带信号源假设条件下,由于源信号的导向矢量具有频率不一致性,因此传统子空间算法,如多重信号分类算法(Multiple Signal Classification, MUSIC)、旋转不变子空间算法(ESPRIT)等,并不适用于工程实践^[1-3]。

近年来,研究人员对宽带信号源条件下的DOA估计进行了大量研究^[4-6]。宽带信号DOA估计算法原理上^[7]包含非相干信号子空间方法(Incoherent Signals-subspace Method, ISM)^[8]与相干信号子空间方法(Coherent Signals-subspace Method, CSM)^[9]。非相干信号子空间方法基于频率分解原理,将宽带源信号分解为一系列窄带信号后进行DOA估计。相干信号子空间方法基于频率聚焦原理,其中最为典型的是双边相关变换^[10](Two-sided Correlation Transformation, TCT)方法,利用聚焦矩阵将分解得到的子信号变换到参考频率点上,进而使用窄带的处理方法实现DOA估计。但是该方法需要CSM预估信号源角度,而聚焦矩阵对预估角度的依赖导致最终DOA估计结果产生偏差。文献[11]提出一种聚焦的FTOPS算法,利用参考频点的信号子空间与阵列方向矢量投影矩阵间的正交性对DOA进行估计。文献[12]对平滑自相关矩阵进行特征分解,再根据特征向量空间之间的过渡性构建聚焦矩阵,从而实现完美聚焦的目的。但是该算法仅针对环境噪声为高斯噪声,并且需要预设参考频率的情况。文献[13]基于压缩感知理论,利用阵列协方差矩阵稀疏迭代估计的方法实现宽带信号DOA估计,但是该方法在信源数目预估出现错误时,其空间谱结果易产生伪峰。文献[14]对信号子空间聚焦法进行改进,采用奇异值分解重构协方差矩阵,通过Root-正交传播算子实现DOA估计,改进方法虽然降低了运算量,但是仍需要预估参考频点子频带。文献[15]提出一种频域时延补偿方法,该方法无需对角度进行预估,但是运算复杂度高,难以满足信号实时处理的要求。

针对宽带非平稳信号,研究人员尝试从时频域角度进行研究,根据宽带信号的时频信息获得更准确的DOA估计结果^[16-17]。基于可调窗函数的S变换和小波变换时频分析方法能进行多分辨率分析。文献[18]构建一种时频域的阵列数据模型,根据信号的时频信息来提高非平稳信号的DOA估计性能。文献[19]利用小波包变换对信号进行分解,再使用MUSIC算法对每个子带进行空间谱估计。文献[20]将S变换应用于MUSIC算法,并对跳频及交叉chirp阵列信号进行分析,然而该方法仍存在需要预知信号源个数的问题。文献[21]提出基于小波变换的多重信号分类改进算法,根据信号的时频域特

征来提高算法的分辨率。

本文提出一种基于改进MUSIC算法的宽带信号DOA估计。通过对接收信号进行S变换,获得多分辨的时频谱矩阵,同时构建时频域阵列信号模型,根据频率段不同时刻的功率谱矩阵呈联合对角化结构的特点,设计一种新的空间谱,从而实现宽带信号的DOA估计。

1 基于S变换的时频阵列数据模型

假设 M 个阵元等间隔线性排布,阵元间距为 d ,已知 P 个宽带信号源 $s_p(t)$ 从不同方向入射,入射角度分别为 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_P)$,不考虑传播过程中的信号幅值衰减,第 m 个阵元的接收信号如式(1)所示:

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

其中: $\tau_{mp} = (m-1)d \sin \theta_p / v$ 为第 p 个信号到达第 m 个阵元产生的时延; v 为信号的传播速度; $n_m(t)$ 为第 m 个阵元的加性噪声。

使用S变换对信号 $x_m(t)$ 进行处理,变换结果 S_m^T 如式(2)所示:

$$S_m^T(\tau, f_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{p=1}^P s_p(t - \tau_{mp}) + n_m(t) \right) \frac{|f_i|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f_i^2}{2}} e^{-j2\pi f_i t} dt \quad (2)$$

其中: τ 为时间因子; $f_i (i=1, 2, \dots, I)$ 为频率分量。将上式写成傅里叶频谱形式进行推导,如式(3)所示:

$$\begin{aligned} S_m^T(\tau, f_i) &= \sum_{p=1}^P \int_{-\infty}^{+\infty} (s_p(t - \tau_{mp}) e^{-j2\pi f_i(t - \tau_{mp})} e^{-j2\pi f_i \tau_{mp}}) \left(\frac{|f_i|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f_i^2}{2}} \right) dt + \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} (n_m(t) e^{-j2\pi f_i t}) \left(\frac{|f_i|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f_i^2}{2}} \right) dt = \\ &\sum_{p=1}^P \int_{-\infty}^{+\infty} S_p(\omega + f_i) e^{-\frac{2\pi^2 \omega^2}{f_i^2}} e^{j2\pi \omega(\tau - \tau_{mp})} d\omega + \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} N_m(\omega + f_i) e^{-\frac{2\pi^2 \omega^2}{f_i^2}} e^{j2\pi \omega \tau} d\omega = \sum_{p=1}^P x_{f_i, p}(\tau - \tau_{mp}) + n_{f_i, m}(\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $x_{f_i, p}(\tau - \tau_{mp})$ 为信号分量; $n_{f_i, m}(\tau)$ 为噪声分量。假设S变换的频宽和中心频率满足窄带信号条件,即变换得到的信号分量为窄带信号,如式(4)所示:

$$S_m^T(\tau, f_i) = \sum_{p=1}^P x_{f_i, p}(\tau) e^{-j2\pi f_i \tau_{mp}} + n_{f_i, m}(\tau) \quad (4)$$

在向量形式下,阵列接收信号的时频域模型表示如式(5)所示:

$$S^T(\tau, f_i) = X_f(\tau) H(\theta, f_i) + N_f(\tau) \quad (5)$$

其中: $X_f(\tau) = [x_{f_i, 1}(\tau), x_{f_i, 2}(\tau), \dots, x_{f_i, P}(\tau)]^T$ 为信号 $s_p(t) (p=1, 2, \dots, P)$ 的S变换结果向量; $N_f(\tau) = [n_{f_i, 1}(\tau), n_{f_i, 2}(\tau), \dots, n_{f_i, M}(\tau)]^T$ 为噪声的向量; $H(\theta, f_i) = [h(\theta_1, f_i),$

$\mathbf{h}(\theta_2, f_i), \dots, \mathbf{h}(\theta_p, f_i)]$ 为 $M \times P$ 维阵列数据模型的方向矩阵。导向矢量如式(6)所示:

$$\mathbf{h}(\theta_p, f_i) = [1, \exp(-j2\pi f_i \tau_{1p}), \dots, \exp(-j2\pi f_i \tau_{(M-1)p})]^T \quad (6)$$

2 ST_MUSIC 算法

2.1 算法原理

根据经典 MUSIC 算法原理^[22], $\mathbf{S}^T(\tau, f_i)$ 的协方差矩阵如式(7)所示:

$$\mathbf{R}_Y = E\{\mathbf{S}^T(\tau, f_i) \times \mathbf{S}^{TH}(\tau, f_i)\} = \mathbf{H}(\theta, f_i) \mathbf{R}_X(\tau, f_i) \mathbf{H}^H(\theta, f_i) + \sigma_i^2 \mathbf{I} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{R}_X(\tau, f_i)$ 为 $\mathbf{X}_f(\tau)$ 的协方差矩阵, 由于加性噪声与源信号不相关, 且自身互不相关, 则变换后的噪声方差可用 $\sigma_i^2 \mathbf{I}$ 表示; σ_i 为矩阵奇异值。

由于实际接收数据长度有限, 因此数据协方差矩阵取其最大似然估计, 如式(8)所示:

$$\hat{\mathbf{R}}_Y = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{S}^T \times \mathbf{S}^{TH} \quad (8)$$

对于第 $n(n=1, 2, \dots, P)$ 个信号源, 矢量 $\mathbf{b}_n(f)$ 的定义需要满足式(9):

$$\mathbf{h}^H(\theta_p, f) \mathbf{b}_n(f) = \begin{cases} \mathbf{h}^H(\theta_p, f) \mathbf{b}_n(f), & n=p \\ 0, & n \neq p \end{cases} \quad (9)$$

不考虑噪声项, 根据功率谱矩阵的联合对角化结构性^[23], 建立如下等式:

$$\mathbf{R}_Y(f) \mathbf{b}_n(f) = \sum_{p=1}^P \mathbf{h}(\theta_p, f) R_{X_p}(f) \mathbf{h}^H(\theta_p, f) \mathbf{b}_n(f) = d_n(f) \mathbf{h}(\theta_n, f) \quad (10)$$

其中: $d_n(f) = R_{X_n}(f) \mathbf{h}^H(\theta_n, f) \mathbf{b}_n(f)$, 即当 θ 为真实波达方向时, 存在矢量 $\mathbf{b}(f)$ 使等式成立。因此, 在噪声条件下, 目标波达方向估计, 即最小化函数如式(11)所示:

$$J(\theta, \mathbf{b}(f), d(f)) = \|\mathbf{R}_Y(f) \mathbf{b}(f) - d(f) \mathbf{h}(\theta, f)\|_F^2 \quad (11)$$

其中: $d(f)$ 需满足 $\|d(f)\|_F^2 = 1$ 。

当 $\mathbf{R}_Y = \mathbf{R}_Y(\tau_k, f)$, $k=1, 2, \dots, K$ 时, 代价函数^[23]的简化结果如式(12)~式(14)所示:

$$\min J(\theta, f) = M - \max_{\text{eig}}(\mathbf{G}^H(\theta, f) \mathbf{F}^*(f) \mathbf{G}(\theta, f)) \quad (12)$$

$$\mathbf{F}(f) = \sum_{k=1}^K \mathbf{R}_Y^H(f, \tau_k) \mathbf{R}_Y(f, \tau_k) \quad (13)$$

$$\mathbf{G}(\theta, f) = [\mathbf{R}_Y^H(f, \tau_1) \mathbf{h}(\theta, f), \mathbf{R}_Y^H(f, \tau_2) \mathbf{h}(\theta, f), \dots, \mathbf{R}_Y^H(f, \tau_K) \mathbf{h}(\theta, f)] \quad (14)$$

由于本文基于 S 变换取得 $\hat{\mathbf{R}}_Y$ 为时间连续段处理结果, 即 $\hat{\mathbf{R}}_Y(\tau_k, f) \equiv \hat{\mathbf{R}}_Y(f)$, 将基于 S 变换的数据协方差结果代入, 得到 ST_MUSIC 算法的谱估计如式(15)所示:

$$P(\theta) =$$

$$\frac{1}{MI - \sum_{i=1}^I \mathbf{h}^H(\theta, f_i) \hat{\mathbf{R}}_Y(f_i) (\hat{\mathbf{R}}_Y^H(f_i) \hat{\mathbf{R}}_Y(f_i))^\dagger \hat{\mathbf{R}}_Y^H(f_i) \mathbf{h}(\theta, f_i)} \quad (15)$$

2.2 算法步骤

本文提出的 ST_MUSIC 算法主要分为以下 5 个步骤: 1) 根据信号的有效频段设置 S 变换的频率分量 $f_i(i=1, 2, \dots, I)$; 2) 利用式(5)对接收信号进行 S 变换得 $\mathbf{S}^T(\tau, f_i)$, 根据式(8)计算得到协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_Y$; 3) 根据式(6)构建时频域导向矢量 $\mathbf{h}(\theta, f_i)$; 4) 设置搜索范围和搜索步进 $\Delta\theta$, 根据式(15)计算空间谱估计 $P(\theta)$; 5) 通过谱搜索获得 $P(\theta)$ 所有谱峰所在的位置, 从而得到 DOA 的最大估计值。

2.3 算法分析

根据上述算法原理, ST_MUSIC 算法满足如下条件:

1) 本文算法要求符合所有宽带信号的窄带分量互不相关条件;

2) 算法可以直接扩展到二维源定位的情况, 此时, 算法的偏转角表现为方位角与俯仰角的结合, 平面范围的谱搜索转变为空间谱搜索, 峰值点坐标为 DOA 估计结果。

2.4 算法复杂度分析

本文对 ST_MUSIC 算法和后续仿真中使用的双边相关变换方法(TCT)、基于压缩感知理论的算法(CS_TCT)^[13]及基于小波变换的 MUSIC 算法^[21](CWT_MUSIC)的计算复杂度进行分析。本文设空间谱估计的观测范围的搜索点数为 N , 信号数据长为 L , 一个 $M \times M$ 维的数据协方差矩阵做特征分解, 其计算量为 $O(M^3)$ 。文献[13]已计算 TCT 算法的计算复杂度为 $O(M^3 + 2N^3 M^3 + N^2 M^3)$ 。在 k 个多频点采用 CS_TCT 算法, 其运算复杂度为 $O(kN^3 M^3 + M^2)$ 。相比 TCT、CS_TCT 算法, 由于 ST_MUSIC 与 CWT_MUSIC 算法中包含的 I 个尺度参数带来较大的计算量, 使算法复杂度显著提升, CWT_MUSIC 算法的总计算量约为 $O(2IML \ln L + IM^3 + N)$ ^[21]。相比 CWT_MUSIC 算法, ST_MUSIC 算法在谱估计运算中增加了 $O(IM)$ 的运算量, 由于其不需要做特征值分解, 总计算量仍小于 CWT_MUSIC 算法, 为 $O(2IML \ln L + N + IM)$ 。

3 仿真结果分析

3.1 算法有效性分析

在多声源场景下, 本文对 ST_MUSIC 算法进行仿真实验, 并与 TCT、CS_TCT 以及 CWT_MUSIC 这 3 种算法进行对比。本文采用 16 元均匀线性阵列, 构建信噪比为 0 dB、频率范围为 165~300 Hz 的两不相关线性调频信号, 设置信号入射角度分别为 -20° 和 20° , 采样频率为 4 kHz, 信号总长度为 1 024 个数

据点。当阵元数为 16 时,CS_TCT、TCT、CWT_MUSIC、ST_MUSIC 算法的空间谱图如图 1 所示。从图 1 可以看出,4 种算法均可以较准确地估计信号角度,但是估计效果存在差异,当信源数估计不准确时,CS_TCT 算法的伪峰抑制效果受限,而伪峰抑制效果最优的 TCT 算法在精度上较其他 3 种算法略差,CWT_MUSIC 算法与本文算法具有较优的分辨率和精度。

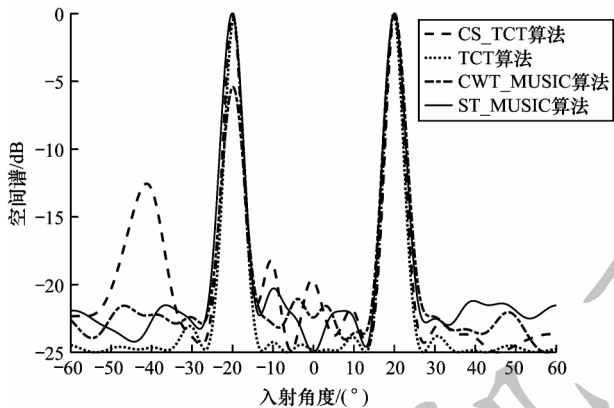


图 1 不同算法的空间谱图对比(阵元数为 16)

Fig.1 Spatial spectrogram comparison among different algorithms (the number of array elements is 16)

为进一步验证算法的有效性,本文将阵元数减少至 12,其他仿真条件不变,进行二次仿真实验。不同算法的空间谱图对比如图 2 所示。从图 2 可以看出,TCT 算法在阵元数减少后出现多个明显伪峰,结果出现错乱,其他 3 种算法对阵元数敏感度低,结果更稳定。CS_TCT 算法估计结果准确度为 -20.5° 和 20.4° 。虽然阵元数的减少不影响 CS_TCT 算法最终估计结果,但是在算法仿真的零度位置出现较高伪峰。CWT_MUSIC 算法估计结果为 -20.8° 和 20.9° 。本文算法估计结果为 -20.6° 和 20.6° ,验证了本文算法的有效性。

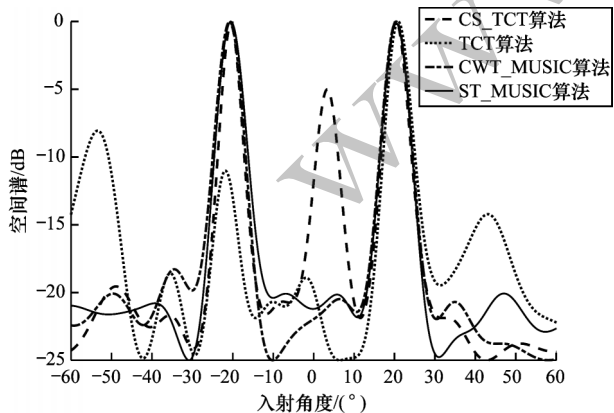


图 2 不同算法的空间谱图对比(阵元数为 12)

Fig.2 Spatial spectrogram comparison among different algorithms (the number of array elements is 12)

为进一步探究阵元数对算法有效性产生的影响,在同等仿真条件下,ST_MUSIC 算法在不同阵元数下的空间谱图如图 3 所示。从图 3 可以看出,阵元数的增加使主峰更尖锐,在提高估计精度的同时也会带来更多的旁瓣,但其对估计结果没有影响,而阵元数过少降低估计结果的精度,当阵元数为 4 时,DOA 估计结果偏差 3° 和 4° ,相比阵元数 16,阵元估计结果的误差保持在 $\pm 0.2^{\circ}$ 。

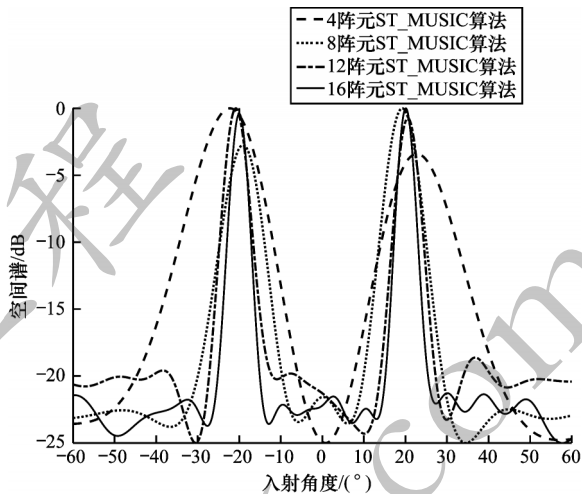


图 3 在不同阵元数下 ST_MUSIC 算法的空间谱图

Fig.3 Spatial spectrogram of ST_MUSIC algorithm under different numbers of array elements

3.2 分辨性能对比

本文采用 16 元均匀线性阵列,信噪比设为 -10 dB ,分别在信号入射角度相距 120° (-45° 和 75°)、 90° (-45° 和 45°)、 60° (-45° 和 15°)、 30° (-20° 和 10°)、 10° (-5° 和 5°) 条件下,进行 50 次随机重复实验并计算 4 种算法的平均分辨率。分辨率参数采用 $\rho = [P(\theta_1) + P(\theta_2)]/2 - \min\{P(\theta_1), P(\theta_1 + \Delta\theta), \dots, P(\theta_2)\}^{[15]}$,其中 θ_1, θ_2 为信号入射角, $\Delta\theta$ 为搜索步进,分辨率单位为 dB 。

在仿真实验中,当信噪比降低为 -10 dB 时,TCT 算法的仿真结果不稳定,并出现较为严重的伪峰,因此,本节仅对其他 3 种算法进行分辨率对比,如表 1 所示。从表 1 可以看出,分辨率随两信号的入射角距增大而增高,基于压缩感知的 CS_TCT 算法相较于 TCT 算法增大了角度分辨率,且分辨率结果较稳定。本文算法在 60° 和 120° 处出现较高的分辨值,但是这 3 种算法分辨率差距不大。

表 1 不同算法的分辨率对比

算法	分辨率/dB				
	角距 10°	角距 30°	角距 60°	角距 90°	角距 120°
CWT_MUSIC 算法	18.39	18.64	18.88	21.16	20.48
CS_TCT 算法	17.04	19.57	19.63	19.06	19.78
ST_MUSIC 算法	17.54	18.30	20.42	18.77	20.64

3.3 误差性能对比

本文仿真条件与 3.1 节设置一致。本文仿真信号的信噪比范围设置为-15~10 dB,分别通过 50 次重复随机实验对比 4 种算法 DOA 估计结果的均方根误差,如图 4 所示。在信噪比为-15 dB 与-10 dB 时,TCT 算法估计的均方根误差大于 1°,分别为 3.33°、1.60°,因此图 4 中未显示其结果,CS_TCT 算法的 DOA 估计结果在高信噪比条件下表现更佳。此外,在实验过程中,当信噪比为-15 dB 与-10 dB 时,TCT 算法的估计成功率低于 50%,而 CWT_MUSIC 算法与 ST_MUSIC 算法在整个信噪比范围内估计成功率始终保持 90% 以上。

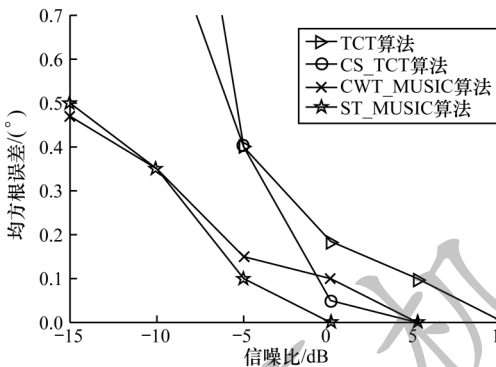


图 4 不同算法的均方根误差对比

Fig.4 Root mean square error comparison among different algorithms

3.4 计算量对比

本节仿真条件的设置与 3.1 节保持一致。本文分别设置 2 种仿真情形,分别为 2 个信号(-20°和 20°)和 3 个信号(-60°、-20°和 20°),通过 50 次随机重复实验对比算法的运算时间。不同算法的平均运算时间如图 5 所示,CS_TCT 算法的运算时间最短,与复杂度分析结果对应,基于频率聚焦的 TCT 算法明显比基于频率分解的 CWT_MUSIC 算法与 ST_MUSIC 算法运算时间短,但是这 4 种算法的运算时间均在正常可接受范围内,ST_MUSIC 算法略优于 CWT_MUSIC 算法。

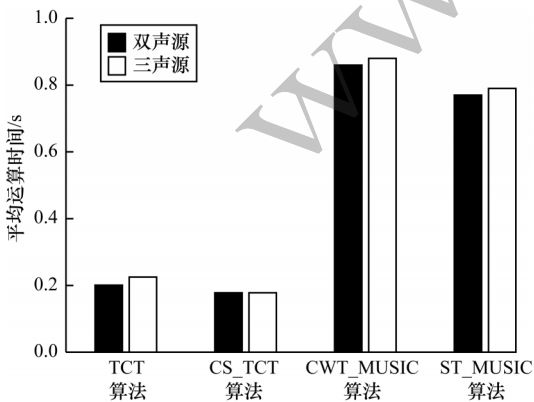


图 5 不同算法的平均运算时间

Fig.5 Average computing time of different algorithms

3.5 二维定位仿真实验

本文对所提算法进行二维声源定位仿真实验,其他仿真条件不变,在信噪比为 0 dB 条件下,采用真实语音信号进行实验,在不考虑环境混响的情况下,设置 2 个语音声源的方位角和俯仰角,分别为 40°和 40°、40°和-20°,定位结果如图 6 所示,从中可以看出,该算法在二维定位中能够得到准确的 DOA 估计结果。

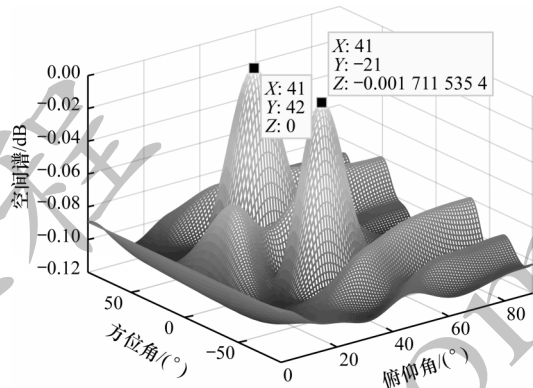


图 6 ST_MUSIC 算法的二维 DOA 估计谱图

Fig.6 Two-dimensional DOA estimation spectrogram of ST_MUSIC algorithm

4 结束语

针对被动探测系统中的宽带信号 DOA 估计问题,本文提出一种基于 S 变换且无需预估信源数的多重信号分类改进算法。根据 S 变换的多分辨率特性,通过构建时频阵列信号模型,提高多源 DOA 估计的空间分辨率,利用谱搜索实现 DOA 估计,实现多源宽带信号的声源定位。二维语音定位仿真实验验证了该算法的有效性。仿真结果表明,该算法具有较优的分辨率性能和估计性能。后续将从 S 变换参数的角度优化本文算法,同时通过增强信号分量、弱化噪声分量,降低算法运算复杂度并提升其在复杂噪声情况下的估计性能。

参考文献

[1] LIU A F, YANG D S, SHI S G, et al. Augmented subspace MUSIC method for DOA estimation using acoustic vector sensor array[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(6):969-975.

[2] ABEIDA H, DELMAS J P. Robustness of subspace-based algorithm with respect to the distribution of the noise. application to DOA estimation[J]. Signal Processing, 2019, 164:313-319.

[3] YAN F G, JIN M, ZHOU H J, et al. Low-degree root-MUSIC algorithm for fast DOA estimation based on variable substitution technique [J]. Science China Information Sciences, 2019, 63(5): 1-3.

- [4] ZHANG J C, QIU T S, LUAN S Y, et al. Bounded non-linear covariance based ESPRIT method for noncircular signals in presence of impulsive noise[J]. Digital Signal Processing, 2019, 87: 104-111.
- [5] HERZOG A, HABETS E A P. Eigenbeam-ESPRIT for DOA-vector estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(4): 572-576.
- [6] SHI J, ZHANG Q F, SHI W T. Wideband DOA estimation with deficient snapshots using low rank Toeplitz structure[J]. Electronics Letters, 2019, 55(17): 961-963.
- [7] SHI J, ZHANG Q F, TAN W J, et al. Underdetermined DOA estimation for wideband signals via focused atomic norm minimization[J]. Entropy, 2020, 22(3): 359.
- [8] WANG G, HE M H, TANG Y W, et al. DOA estimation for different frequency with different angles based on wideband co-prime array[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(21): 7738-7741.
- [9] BILGEHAN B, ABDELBAR A. Fast detection and DOA estimation of the unknown wideband signal sources[J]. International Journal of Communication Systems, 2019, 32(11): 1-10.
- [10] SELLONE F. Robust auto-focusing wideband DOA estimation[J]. Signal Processing, 2005, 86(1): 17-37.
- [11] 蔡进, 刘春生, 陈明建, 等. 聚焦的子空间正交性测试宽带 DOA 估计方法[J]. 信号处理, 2018, 34(2): 221-228. CAI J, LIU C S, CHEN M J, et al. Focused test of orthogonality of projected subspaces for wideband DOA estimation[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(2): 221-228. (in Chinese)
- [12] 曹司磊, 曾维贵, 胥辉旗. 基于特征向量空间聚焦的宽带 DOA 估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 294-299. CAO S L, ZENG W G, XU H Q. Broadband DOA estimation method based on eigenvector space focusing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(2): 294-299. (in Chinese)
- [13] 窦慧晶, 丁钢, 高佳, 等. 基于压缩感知理论的宽带信号波达方向估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2237-2245. DOU H J, DING G, GAO J, et al. Wideband signal direction of arrival estimation based on compressed sensing theory[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2237-2245. (in Chinese)
- [14] 贾思宇, 路茗, 丁华泽, 等. 一种改进的信号子空间聚焦宽带 DOA 估计算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(1): 175-181. JIA S Y, LU M, DING H Z, et al. A modified wideband DOA estimation algorithm for focusing signal subspace[J]. Computer Engineering, 2022, 48(1): 175-181. (in Chinese)
- [15] 张兴良, 樊甫华. 宽带 DOA 估计的频域时延补偿算法[J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1633-1638. ZHANG X L, FAN F H. DOA estimation algorithm for wideband signals using delay compensation method in frequency domain[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(7): 1633-1638. (in Chinese)
- [16] WANG B H, WANG Y L, CHEN H. Spatial wavelet transform preprocessing for direction of arrival estimation[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, 4: 672-675.
- [17] BELOUCHRANI A, AMIN M G. Time-frequency MUSIC[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 6(5): 109-110.
- [18] 刘云, 李志舜. 基于时频阵列模型的波达方向估计[J]. 声学学报, 2005, 30(2): 115-119. LIU Y, LI Z S. Direction of arrival estimating using array model in time-frequency domain[J]. Acta Acustica, 2005, 30(2): 115-119. (in Chinese)
- [19] XUE Y, WANG J, LIU Z. Wavelet packets-based direction-of-arrival estimation[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004: 1-10.
- [20] 刘香荣. 基于 S 变换的阵列信号处理的理论与方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011. LIU X R. Research on theories and methods for array signal processing based on S-transform[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [21] 李冉冉, 张君, 鲍明, 等. 瞬态信号的小波变换波达方向估计[J]. 声学学报, 2019, 44(1): 77-85. LI R R, ZHANG J, BAO M, et al. Direction of arrival estimation of transient signals using wavelet transform[J]. Acta Acustica, 2019, 44(1): 77-85. (in Chinese)
- [22] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. WANG Y L, CHEN H, PENG Y N, et al. Spatial spectrum estimation technique[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [23] ZENG W J, LI X L. High-resolution multiple wideband and nonstationary source localization with unknown number of sources[J]. IEEE Transactions on Signal Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2010, 58(6): 3125-3136.