

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.02.021

一种基于数据矩阵重构的相干信源二维测向新方法

王 凌¹, 李国林¹, 刘坚强², 毛维平¹

(1. 海军航空工程学院 七系, 山东 烟台 264001;

2. 海军装备研究院 标准规范研究所, 上海 200235)

摘要: 传统的二维波达方向估计算法在相干信源背景下性能会急剧下降甚至失效. 针对相干信源的二维波达方向估计问题, 提出了一种新的波达方向矩阵法——基于数据矩阵重构的波达方向矩阵法(DMR-DOAM). 该算法利用阵列接收数据之间的互相关信息, 构造两个 Toeplitz 矩阵形式的等效协方差矩阵, 通过对新的波达方向矩阵一次特征值分解, 即可实现解相干和二维波达方向估计. 该算法保留了原波达方向矩阵法无需二维谱峰搜索与参数配对的优点, 且由于构造的等效协方差矩阵只使用了原协方差矩阵的中间列元素, 因此计算量小, 实现简单. 理论分析与数值仿真均验证了算法的有效性.

关键词: 阵列信号处理; 波达方向; 二维 DOA 估计; 相干信号; Toeplitz 矩阵; 解相干; 参数估计

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2013)02-0130-08

New method for estimating 2-D DOA in the coherent source environment based on data matrix reconstruction

WANG Ling¹, LI Guolin¹, LIU Jianqiang², MAO Weiping¹

(1. No. 7 Dept., Naval Aeronautics and Astronautics Univ., Yantai 264001, China;

2. Institute of Specification and Standard, Navy Academy of Armament, Shanghai 200235, China)

Abstract: The performance of classical two dimensional (2-D) Direction-Of-Arrival (DOA) estimation algorithms degrade substantially in the presence of coherent environment. A new DOA matrix method——DOA matrix method based on data matrix reconstruction (DMR-DOAM) is proposed for 2-D DOA estimation in the coherent source environment. The proposed algorithm reconstructs two Toeplitz equivalent covariance matrices by using cross-correlation information among receiving data from arrays. Decorrelation and 2-D DOA estimation can be realized via the eigen-decomposition of the new DOA matrix. The algorithm can retain the advantages of the traditional DOA matrix method, such as automatical parameter alignment and no need of 2-D search spectrum peak. The equivalent covariance matrices only use the middle column of classical covariance matrices, so the calculation amount is reduced, and the algorithm can be realized easily. Furthermore, the paper analyzes the estimation performance and influencing factors of the proposed algorithm. Theoretical analyses and simulation results both show that the proposed algorithm is effective.

Key Words: array signal processing; direction of arrival; 2-D DOA estimation; coherent signals; Toeplitz matrix; decorrelation; parameter estimation

引战配合的中心问题是提高导弹对目标的终端毁伤能力, 随着目标中近程探测技术的发展, 定向战斗部技术得到越来越多的关注. 定向战斗部技术需要引信探测系统对目标具有测向能力, 尤其是能实时地测出目标的二维波达方向(DOA). 同时, 在现代电子战中, 探测系统面临各种复杂电磁干扰, 信号空间变得更加复

收稿日期: 2011-12-13

网络出版时间: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902054); 中国博士后科学基金资助项目(201003758, 20090460114); “泰山学者”建设工程专项经费资助项目

作者简介: 王 凌(1985—), 男, 海军航空工程学院博士研究生, E-mail: wang.ling1@yeah.net.

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20121116.0924.201302.159.006.html>

杂,要求空间谱估计算法能够“对抗”各种环境.因此,研究能够快速实时解算目标二维到达角,并能抑制相干信源影响的二维解相干算法显得尤为重要.近年来,空间谱估计研究领域取得了快速的发展,大量改进算法丰富了子空间类算法^[1-4].但空间信源在多径传播和复杂电磁干扰的背景下,会产生大量的相干和强相关信号,现有的基于特征子空间运算的超分辨率算法在相干信源背景下,信号子空间会向噪声子空间发散,发生亏秩,导致估计错误.目前,针对信源的解相干问题,相关学者提出不少算法^[5-11].最为常见的为空间平滑及其改进算法^[5-7],传统的空间平滑算法存在计算量大、孔径损失和需知道相干信源数等问题.文献[6]利用非圆信号特点,提出了一种虚拟空间平滑算法,有效地扩展了阵列孔径和角度估计的分辨率.文献[7]在虚拟空间平滑算法基础上,提出一种无需对信源初始相位作特别要求的修正虚拟空间平滑算法,不损失阵列有效孔径.近几年来,提出了不少利用 Toeplitz 矩阵的结构特点来构造数据矩阵的算法,文献[8]利用接收数据协方差矩阵的第一行数据并结合非圆信号特点,构造了一个 Toeplitz 矩阵实现解相干.文献[9]利用阵列天线的一次观测数据构造 Toeplitz 矩阵实现解相干,但在低信噪比情形下估计性能较差.文献[10]提出了一种利用最大特征矢量的 Toeplitz 去相干方法,不损失孔径,改善了低信噪比下的估计性能.但上述算法都是针对一维 DOA 估计的解相干方法,二维解相干算法常见为传统空间平滑算法的推广^[11],但增加了计算复杂度,导致实时性不强.

二维 DOA 估计作为阵列信号处理的一个重要分支,越来越受到学者关注^[11-17].针对二维 DOA 估计,最早提出的是 MUSIC 算法和 ESPRIT 算法的直接二维推广.但二维 MUSIC 算法需要在二维参数空间进行谱峰搜索,计算量大.二维 ESPRIT 算法也存在参数配对等问题.针对上述问题,殷勤业提出了波达方向矩阵法,较好地解决了上述问题.且可证明,ESPRIT 算法是 DOA 矩阵法的特例.针对 DOA 矩阵法存在角度兼并等问题,金梁和叶中付等相继提出了一些 DOA 矩阵类算法^[12-13],但这类算法只适用于独立源情形.

笔者针对相干信源的二维 DOA 估计问题,提出了一种能直接实现完全去相干的新的 DOA 矩阵法——基于数据矩阵重构的 DOA 矩阵法(DMR-DOAM),该算法利用阵列接收数据的互相关信息构造等效互协方差矩阵和等效自协方差矩阵,由于构造的等效协方差矩阵经过分解后形成的等效信号协方差矩阵为对角阵,其对角元素与信号相关性无关,此时可以等效为空间为 P 个完全独立的等效信号入射,因此实现了完全解相干.相较于文献[11]中提出的空域平滑 DOA 矩阵法实现解相干,本算法解相干能力更强,计算量大幅降低,且无需预知空间相干信源数.相较于文献[13]中算法,本文算法降低了需要进行特征分解的数据矩阵的维数,无需额外的参数配对过程.

1 阵列信号模型

阵列模型如图 1 所示,由两个相互平行的线性子阵列组成,分别记为 X_a 和 Y_a .每个子阵列都有 $2M-1$ 个阵元,相应的编号分别为 $-(M-1), \dots, 0, \dots, M-1$.两相邻阵元沿 X 轴方向的间距为 d_x ,两子阵的间距为 d_y .

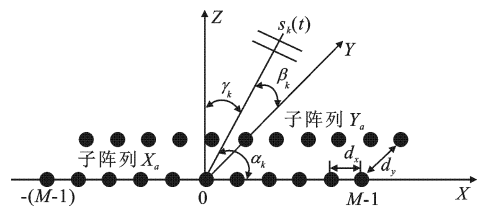


图 1 阵列系统模型

假设空间有 P 个已知载频为 ω_0 , 波长为 λ 的窄带源入射该阵列系统,波达方向矢量角分别为 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_P)$,其中 $\theta_k = (\alpha_k, \beta_k, \gamma_k)$, α_k, β_k 和 γ_k 分别为第 k 个信号入射方向与 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的夹角.并满足如下关系:

$$\cos^2 \alpha_k + \cos^2 \beta_k + \cos^2 \gamma_k = 1 \quad (1)$$

从式(1)可以看出,波达方向矢量角 θ_k 中只有两个角度是独立的,因此, θ_k 可以用 1×2 维的矢量表示,即 $\theta_k = (\alpha_k, \beta_k)$.以阵元 0 为参考阵元,则子阵列 X_a 中第 i 个阵元的输出信号可表示为

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^P s_k(t) u^i(\alpha_k) + \mathbf{n}_{x_i}(t) \quad , \quad i = -(M-1), \dots, 0, \dots, M-1 \quad (2)$$

$$u(\alpha_k) = \exp(j2\pi d_x / (\lambda \cos \alpha_k)) \quad (3)$$

其中, $s_k(t)$ 为第 k 个信号的复包络, λ 为其中心波长, $\mathbf{n}_{x_i}(t)$ 为子阵列 X_a 的第 i 个阵元中零均值高斯加性白

噪声.

同样,可以得到子阵列 Y_a 中第 i 个阵元的输出信号表达式

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^P s_k(t) u^i(\alpha_k) v(\beta_k) + n_{y_i}(t) \quad , \quad i = -(M-1), \dots, 0, \dots, M-1 \quad , \quad (4)$$

$$v(\beta_k) = \exp(j2\pi d_y / (\lambda \cos \beta_k)) \quad . \quad (5)$$

其中, $n_{y_i}(t)$ 为子阵列 Y_a 的第 i 个阵元中零均值高斯加性白噪声. 则两子阵列的输出信号矢量可表示为

$$\mathbf{X}(t) = [x_{-(M-1)}(t), \dots, x_0(t), \dots, x_{(M-1)}(t)]^T = \mathbf{A}_1 \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_x(t) \quad , \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}(t) = [y_{-(M-1)}(t), \dots, y_0(t), \dots, y_{(M-1)}(t)]^T = \mathbf{A}_1 \Phi(\beta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_y(t) \quad . \quad (7)$$

式中, $\mathbf{A}_1 = [\mathbf{a}(\alpha_1), \mathbf{a}(\alpha_2), \dots, \mathbf{a}(\alpha_p)] \quad , \quad (8)$

为 $(2M-1) \times P$ 维阵列流形矩阵, 从式(8)可见, \mathbf{A}_1 矩阵仅与信源的入射角 α 有关, $\mathbf{a}(\alpha_k)$ 又仅与一个信源的入射角 α_k 有关, 因此 $\mathbf{a}(\alpha_k)$ 被称为信号方向矢量^[11], 且有

$$\mathbf{a}(\alpha_k) = [u^{-(M-1)}(\alpha_k), \dots, 1, \dots, u^{(M-1)}(\alpha_k)]^T \quad , \quad k = 1, \dots, P \quad . \quad (9)$$

其中, $\Phi(\beta)$ 是一个 $P \times P$ 的对角矩阵, Φ 的每一个对角元素 $v(\beta_k)$ 只和入射角 β_k 有关, 所以 $v(\beta_k)$ 被称为信号方向元素^[11], 且有

$$\Phi(\beta) = \text{diag}[v(\beta_1), v(\beta_2), \dots, v(\beta_p)] \quad . \quad (10)$$

其中, $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_p(t)]^T$, 为 P 个人射信号矢量. 各子阵接收的噪声矢量如下:

$$\mathbf{N}_x(t) = [n_{x_{-(M-1)}}(t), \dots, n_{x_0}(t), \dots, n_{x_{M-1}}(t)]^T \quad , \quad (11)$$

$$\mathbf{N}_y(t) = [n_{y_{-(M-1)}}(t), \dots, n_{y_0}(t), \dots, n_{y_{M-1}}(t)]^T \quad . \quad (12)$$

2 基于数据矩阵重构的波达方向矩阵法

文献[17]利用接收数据的相关运算, 构造了 3 个 $M \times M$ 维的 Toeplitz 矩阵, 然后再构造 2 个 $3M \times M$ 和 $M \times 3M$ 的扩展矩阵, 通过对这两个高维矩阵进行特征值分解, 再利用二维 ESPRIT 算法实现二维 DOA 估计, 因此算法复杂度高且需要实现角度参数配对. 笔者利用 DOA 矩阵法思想, 只需构造两个 $M \times M$ 维的等效协方差矩阵, 进一步构造基于数据矩阵重构的波达方向矩阵 \mathbf{R} , 通过一次特征分解即可实现参数配对和二维解相干.

2.1 算法描述

定义如下两个互相关运算:

$$\xi_1(i) = E[x_i(t)x_0^*(t)] \quad , \quad i = -(M-1), \dots, 0, \dots, M-1 \quad , \quad (13)$$

$$\xi_2(i) = E[y_i(t)y_0^*(t)] \quad , \quad i = -(M-1), \dots, 0, \dots, M-1 \quad . \quad (14)$$

由于噪声和信号之间是统计独立的, 根据式(2)和式(4)的表达式, 将式(13)和式(14)展开, 得到如下关系式:

$$\xi_1(i) = \sum_{k=1}^P g_k u^i(\alpha_k) + \sigma^2 \delta(i, 0) \quad , \quad i = -(M-1), \dots, 0, \dots, M-1 \quad , \quad (15)$$

$$\xi_2(i) = \sum_{k=1}^P g_k u^i(\alpha_k) v(\beta_k) \quad , \quad i = -(M-1), \dots, 0, \dots, M-1 \quad . \quad (16)$$

式中, $g_k = \sum_{j=1}^P s_j^*(t) s_k(t) \quad , \quad (17)$

$$\delta(i, 0) = \begin{cases} 1 & , \quad i = 0 \\ 0 & , \quad i \neq 0 \end{cases} \quad . \quad (18)$$

利用式(15)和式(16)得到的互相关矢量, 构造如下形式的等效自协方差矩阵 \mathbf{R}_{xx} 和等效互协方差矩阵 \mathbf{R}_{xy} :

$$\mathbf{R}_{xx} = \begin{bmatrix} \xi_1(0) & \xi_1(-1) & \cdots & \xi_1(-(M-1)) \\ \xi_1(1) & \xi_1(0) & \cdots & \xi_1(-(M-2)) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_1(M-1) & \xi_1(M-2) & \cdots & \xi_1(0) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\mathbf{R}_{yy} = \begin{bmatrix} \xi_2(0) & \xi_2(-1) & \cdots & \xi_2(-(M-1)) \\ \xi_2(1) & \xi_2(0) & \cdots & \xi_2(-(M-2)) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_2(M-1) & \xi_2(M-2) & \cdots & \xi_2(0) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

由式(15)、(16)和 $u(\alpha_k)$ 、 $v(\beta_k)$ 的特点可得

$$\xi_1(i) = \sum_{k=1}^P g_k u^i(\alpha_k) + \sigma^2 \delta(i,0) = \sum_{k=1}^P g_k u^{i+m}(\alpha_k) u^{-m}(\alpha_k) + \sigma^2 \delta(i,0), \quad (21)$$

同理可得
$$\xi_2(i) = \sum_{k=1}^P g_k u^{i+m}(\alpha_k) u^{-m}(\alpha_k) v(\beta_k), \quad (22)$$

其中, $m=0,1,\dots,M-1$, 则式(19)、(20)可写为

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{A}_2 \mathbf{G} \mathbf{A}_2^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M, \quad (23)$$

$$\mathbf{R}_{yy} = \mathbf{A}_2 \Phi(\beta) \mathbf{G} \mathbf{A}_2^H. \quad (24)$$

其中, \mathbf{I}_M 为 $M \times M$ 维单位阵,
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & g_P \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_1(M; 2M-1, :)$. 从等效信号协方差矩阵 \mathbf{G} 中元素 g_k 的表达式(17)可知, 不论信号是否相干, g_k 始终不为零, 且当信号完全独立时, g_k 等于第 k 个信号的功率, 当信号完全相干时, g_k 等于 P 个信号功率的叠加. 因此, \mathbf{G} 的秩等于入射信源数目 P , 与信号相关性无关. 从等效信号协方差矩阵 \mathbf{G} 的对角形式可进一步看出, 此时算法已经实现了对相干信源的完全解相干, 等效为 P 个完全独立的信号入射到阵列, 且存在

$$E[\tilde{\mathbf{s}}_k \cdot \tilde{\mathbf{s}}_k^H] = \sum_{j=1}^P s_j^*(t) s_k(t), \tilde{\mathbf{s}}_k \text{ 为入射到阵列系统的第 } k \text{ 个等效独立信号.}$$

消除噪声项对数据矩阵 \mathbf{R}_{xx} 的影响, 得到

$$\mathbf{R}_{xx0} = \mathbf{A}_2 \mathbf{G} \mathbf{A}_2^H, \quad (26)$$

对 \mathbf{R}_{xx0} 进行特征值分解, 得到
$$\mathbf{R}_{xx0} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{V}_i \mathbf{V}_i^H, \quad (27)$$

式中, $\{\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_M\}$ 是特征值, 而 $\{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_M\}$ 是相应的特征矢量.

定义 由 $\mathbf{R}_{xx}^\#$ 和 \mathbf{R}_{yy} 按式(28)构造的矩阵为基于数据矩阵重构的波达方向矩阵, 记为 \mathbf{R} .

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{yy} \mathbf{R}_{xx}^\# \quad (28)$$

$$\mathbf{R}_{xx}^\# = \sum_{i=1}^P \lambda_i^{-1} \mathbf{V}_i \mathbf{V}_i^H, \quad (29)$$

式中, $\mathbf{R}_{xx}^\#$ 是 \mathbf{R}_{xx0} 的一种伪逆.

定理 1 如果 \mathbf{A}_2 满秩, Φ 无相同的对角元素, 则信号方向元素和信号方向向量分别是基于数据矩阵重构波达方向矩阵 \mathbf{R} 的非零特征值和相应的特征向量, 即

$$\mathbf{R} \mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_2 \Phi \quad (30)$$

定理 1 的证明过程可以参考文献[11].

从上文的推导可知, 波达方向矩阵 \mathbf{R} 构建过程中, 通过利用两个子阵列的多次快拍数据求得近似的互相关矢量 ξ_1 和 ξ_2 , 然后构造 Toeplitz 矩阵实现解相干. 因此, 只需对构建的波达方向矩阵 \mathbf{R} 进行一次特征分解, 通过得到的 \mathbf{A}_2 和 Φ , 按照式(3)和式(5)中的对应关系, 即可求得各信源的二维波达方向 $\theta_i = (\alpha_i, \beta_i)$. 同

时本文算法还保留了原波达方向矩阵法无需二维谱峰搜索和角度参数配对的优点.

2.2 算法步骤

由上文分析,可得到基于数据矩阵重构的波达方向矩阵方法步骤如下:

- (1) 通过阵列天线获取两个子阵列的观测矢量 $\mathbf{X}(t)$ 和 $\mathbf{Y}(t)$;
- (2) 根据式(13)和式(14)计算互相关矢量 ξ_1 和 ξ_2 ;
- (3) 利用互相关矢量构造等效自协方差矩阵 \mathbf{R}_{xx} 和等效互协方差矩阵 \mathbf{R}_{yx} ;
- (4) 对 \mathbf{R}_{xx} 进行去噪,按式(28)构造波达方向矩阵 \mathbf{R} ;
- (5) 对 \mathbf{R} 进行特征值分解,根据特征值和特征矢量的对应关系,按照式(3)和式(5)计算信源的二维波达方向 $\theta_i = (\alpha_i, \beta_i)$.

3 数值仿真

为验证本文方法的有效性,从 3 个方面进行数值仿真验证.(1)验证本文算法对不相关信源的估计性能;(2)验证算法对相干信源的二维解相干性能;(3)验证本文算法对快拍数、阵元数和信噪比的敏感度.因为本文算法为 DOA 矩阵类算法的二维解相干推广,仿真中对比了具有相同阵列结构的文献[11]中的 DOA 矩阵算法(DOAM).

1) 不相关信源的二维 DOA 估计

仿真 1 利用图 1 中的阵列天线模型,设置 $M=10$,为避免角度估值模糊,阵元间距 d_x 和子阵间距 d_y 都取 $\lambda/2$, DOA 矩阵法采用完全相同的阵列结构.空间存在 3 个不相关的信源,二维波达方向分别为 $(30^\circ, 90^\circ)$, $(60^\circ, 60^\circ)$ 和 $(85^\circ, 75^\circ)$. 设置快拍数为 500,信噪比为 10 dB,利用本文算法和 DOA 矩阵法进行 200 次的 Monte-Carlo 统计试验,得到的星座图如图 2 所示.图 2(a)的仿真结果显示本文算法估计的二维波达方向密集地分布在期望方向周围,因此,该算法能有效地估计不相关信源的二维 DOA.和图 2(b)的结果对比可知,本文只利用了 DOA 矩阵法 $1/(2M-1)$ 的数据量(只取了 DOAM 算法中协方差矩阵中间列的互相关数据),就可以达到和 DOA 矩阵法相近的估计效果.

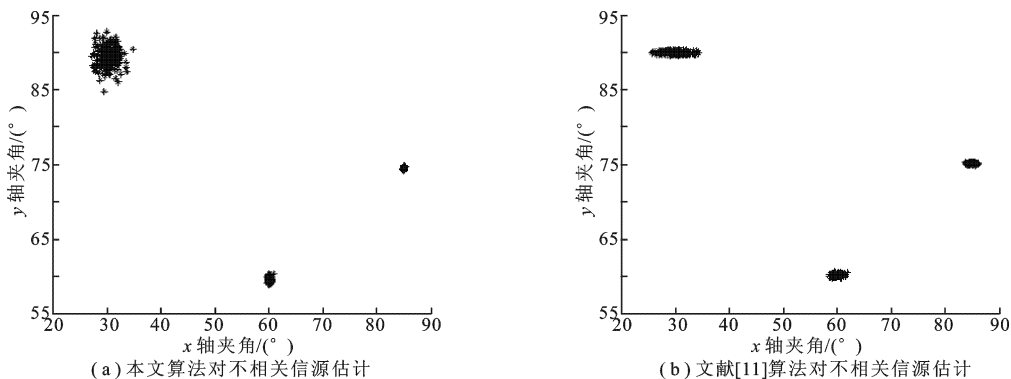


图 2 空间信源二维到达角的星座图

2) 相干信源的二维 DOA 估计

仿真 2 仿真参数与仿真 1 相同,仅改变空间信源的相关性,使 3 个信源完全相干,二维波达方向分别为 $(30^\circ, 90^\circ)$, $(60^\circ, 60^\circ)$ 和 $(85^\circ, 75^\circ)$. 利用本文算法和 DOA 矩阵法进行 200 次的 Monte-Carlo 统计试验,得到的星座图如图 3 所示.仿真结果表明,在信源完全相干的情形下,利用构造的基于数据重构的波达方向矩阵能够实现解相干,但 DOA 矩阵法在相干源的影响下已经失效.

3) 信噪比、快拍数和阵元数对本文算法的影响

前两个仿真只是定性说明了本文算法的估计性能,下面通过 3 个仿真试验验证本文算法的估计均方根误差大小随信噪比、阵元数和快拍数的变化趋势.

仿真 3 阵列模型与仿真 1 的相同,仿真中对比了利用空域平滑技术实现解相干的 DOA 矩阵法,前向

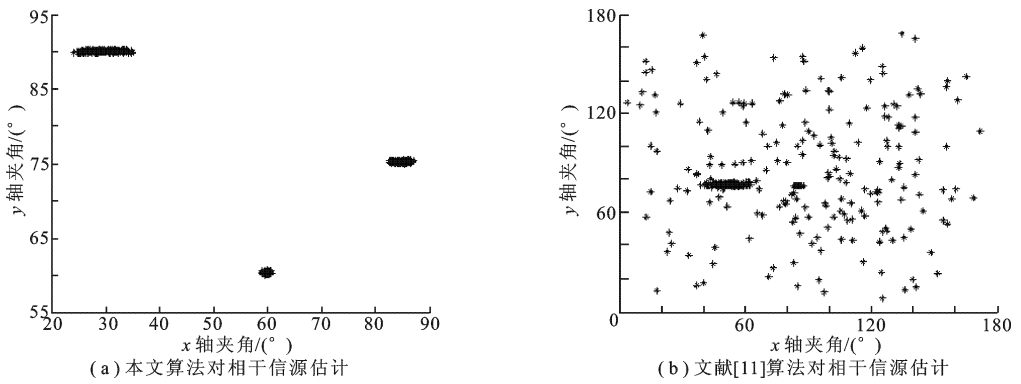


图 3 空间信源二维到达角的星座图

平滑次数为 3 次. 空间 3 个信源的二维波达方向分别为 $(30^\circ, 90^\circ)$, $(60^\circ, 60^\circ)$ 和 $(85^\circ, 75^\circ)$, 前两个信源相干, 第 3 个信源与前两个信源不相关. 快拍数固定为 500, 改变信噪比, 在 0 dB 到 20 dB 分别进行 100 次的 Monte-Carlo 统计试验, 得到如图 4 所示的二维 DOA 估计性能随信噪比变化的曲线. 从图中可知, 随着信噪比的提高, 本文算法估计误差逐渐减小, 当信噪比高于 9 dB 时, 算法的估计误差控制在 1° 以内. 从本文算法和空域平滑 DOA 矩阵法的比较可知, 在相同信噪比时, 本文算法的估计性能接近空域平滑 DOA 矩阵法, 但空域平滑 DOA 矩阵法实现解相干的代价是增加了计算量, 并且还需要预先知道空间相干信源数才能确定平滑次数, 因此本文算法能在不降低估计性能的前提下, 利用较少数据量实现二维解相干, 且无需预估空间相干信源数. 第 k 个信源的均方根误差定义为

$$E_{\text{rms}}^k = \{E\{(\hat{\alpha}_k - \alpha_k)^2\} + E\{(\hat{\beta}_k - \beta_k)^2\}\}^{1/2}, \quad k = 1, \dots, P \quad (31)$$

仿真 4 与仿真 3 相同的 3 个信源入射到阵列系统. 快拍数分别设置为 50、150、300、500、700、900 和 1 200, 改变信噪比, 在 0 dB 到 20 dB 分别进行 100 次的 Monte-Carlo 统计试验, 得到了如图 5 所示的估计误差随快拍数和信噪比变化的曲线. 从图中快拍数为 50 的曲线可以看出, 本文算法在短快拍和低信噪比下估计误差偏大, 但随着快拍数的增加或者信噪比的提高, 估计性能得到明显改善. 这里估计误差定义为

$$\bar{E}_{\text{rms}} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P E_{\text{rms}}^k \quad (32)$$

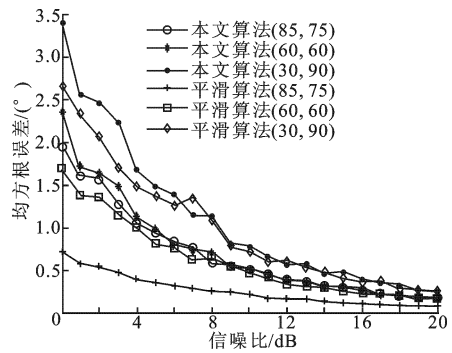


图 4 估计误差随信噪比变化的曲线

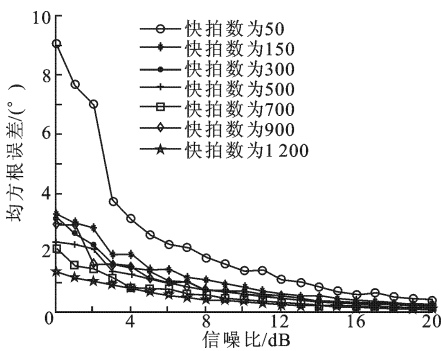


图 5 估计误差随信噪比和快拍数变化的曲线

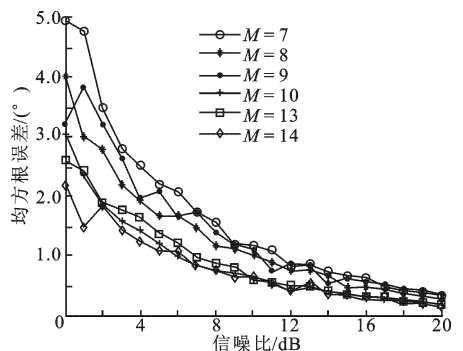


图 6 估计误差随信噪比和阵元数变化的曲线

仿真 5 与仿真 3 相同的 3 个信源入射到阵列系统. 固定快拍数为 500, 子阵列参数 M 分别设置为 7、8、9、10、13 和 14, 改变信噪比, 在 0 dB 到 20 dB 分别进行 100 次的 Monte-Carlo 统计试验, 得到了如图 6 所示的估计误差与阵元数和信噪比变化的曲线. 从图中可以看出, 阵元数为 7、8 和 9 时, 估计误差偏大, 当阵元数到达 10 个以上时, 估计性能得到明显改善, 且可以看出阵元数的增加对估计性能的影响逐渐减小.

4 结束语

以往的相干信源二维 DOA 估计一方面需要复杂的二维谱峰搜索,另一方面也需要对估计出的角度参数进行配对,并且解相干的实现都是以增加算法的计算量为代价的.本文从阵列接收数据之间的互相关信息角度出发,利用互相关矢量构造 Toeplitz 矩阵,实现了相干信源二维 DOA 估计时的去相干,并结合波达方向矩阵法思想,提出了一种新的波达方向矩阵法——基于数据矩阵重构的波达方向矩阵法.本文算法无需谱峰搜索和参数配对,对信源的二维 DOA 进行估计时不用考虑信源之间的相关性.相较于传统的利用接收数据协方差矩阵进行参数估计算法,本文算法只利用部分相关信息,减少了计算量.数值仿真对算法的估计性能和适用性进行了进一步分析.结果表明,本文算法稳定性和估计精度都较高,适用于对算法实时性和精度要求较高的应用背景.

参考文献:

- [1] 王鼎, 吴瑛. 多子阵互耦影响下的鲁棒自校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(6): 1204-1211.
Wang Ding, Wu Ying. Robust Self-calibration Algorithm for Multiple Subarrays in Presence of Mutual Coupling[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(6): 1204-1211.
- [2] 胡增辉, 朱炬波, 何峰, 等. 互耦条件下均匀线阵 DOA 盲估计[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 382-387.
Hu Zenghu, Zhu Jubo, He Feng, et al. Blind DOA Estimation in the Presence of Mutual Coupling Using Uniform Linear Array[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(2): 382-387.
- [3] 刘俊, 刘峥, 谢荣, 等. 互耦条件下米波雷达角度估计的自校正算法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1046-1051.
Liu Jun, Liu Zheng, Xie Rong, et al. Auto-calibration Angle Estimation Algorithm for VHF Radar in the Presence of Mutual Coupling[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(6): 1046-1051.
- [4] 郭艺夺, 张永顺, 张林让, 等. 双基地 MIMO 雷达收发阵列互耦条件下目标定位方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(6): 94-101.
Guo Yiduo, Zhang Yongshun, Zhang Linrang, et al. Target Localization Method for Bistatic MIMO Radar in the Presence of Mutual Coupling of Receiver and Transmitter Arrays[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(6): 94-101.
- [5] Dmochowski J, Benesty J, Affes S. Direction of Arrival Estimation Using Eigenanalysis of the Parameterized Spatial Correlation Matrix[C]//Proc of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Honolulu: IEEE, 2007: 1-4.
- [6] 刘志刚, 汪晋宽, 王福利. 虚拟空间平滑算法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1762-1765.
Liu Zhigang, Wang Jinkuan, Wang Fuli. Virtual Spatial Smoothing Algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1762-1765.
- [7] 徐友根, 刘志文. 修正的虚拟空间平滑算法[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2646-2650.
Xu Yougen, Liu Zhiwen. Modified Virtual Spatial Smoothing Algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2646-2650.
- [8] 缪善林, 陆安南, 李文华. 相关非圆信号的波达方向估计[J]. 通信对抗, 2009, (2): 26-29.
Miao Shanlin, Lu Annan, Li Wenhua. DOA Estimation of Coherent Noncircular Signals [J]. Communication Countermeasures, 2009, (2): 26-29.
- [9] 谢鑫, 李国林, 刘华文. 采用单次快拍数据实现相干信号 DOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 604-608.
Xie Xin, Li Guolin, Liu Huawen. DOA Estimation of Coherent Signals Using one Snapshot [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 604-608.
- [10] 胡晓琴, 陈辉, 陈建文, 等. 一种利用最大特征矢量的 Toeplitz 去相干方法[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1710-1714.
Hu Xiaoqin, Chen Hui, Chen Wenjian, et al. A Toeplitz Decorrelation Method Using the Maximum Eigenvector[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1710-1714.
- [11] 殷勤业, 邹理和, Robert W. 一种高分辨率二维信号参量估计方法——波达方向矩阵法[J]. 通信学报, 1991, 12(4): 1-7, 44.

- Yin Qinye, Zou Lihe, Robert W. A High Resolution Approach to 2-D Signal Parameter Estimation—DOA Matrix Method[J]. Journal of China Institute of Communications, 1991, 12(4): 1-7, 44.
- [12] 叶中付, 沈凤麟. 一种快速的二维高分辨波达方向估计方法——混合波达方向矩阵法[J]. 电子科学学刊, 1996, 18(6): 567-572.
- Ye Zhongfu, Shen Fenglin. A Fast Method of Two-Dimensional High-Resolution DOA Estimation—Mixed DOA Matrix Method[J]. Journal of Electronics, 1996, 18(6): 567-572.
- [13] 金梁, 殷勤业. 时空 DOA 矩阵方法的分析与推广[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 300-303.
- Jin Liang, Yin Qinye. Analysis and Generalization of Space-time DOA Matrix Method[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 300-303.
- [14] 郭艺夺, 张用顺, 张林让, 等. 双基地 MIMO 雷达收发阵列互耦条件下目标定位方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(6): 82-88.
- Guo Yiduo, Zhang Yongshun, Zhang Linrang, et al. Target Localization Method for the Bistatic MIMO Radar in the Presence of Mutual Coupling of Receiver and Transmitter Arrays[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(6): 82-88.
- [15] Harabi F, Changuel H, Gharsallah A. Estimation of 2-D Direction of Arrival with an Extended Correlation Matrix[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 5(4): 255-260.
- [16] Filik T, Tuncer T E. Design and Evaluation of V-shaped Arrays for 2-D DOA Estimation[J]. IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008, 4(2): 2477-2480.
- [17] 刁鸣, 缪善林, 张一飞. 基于特殊阵列的相干信源二维测向新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 338-340.
- Diao Ming, Miao Shanlin, Zhang Yifei. New Method of 2-D Direction-of-Arrival Estimation in Coherent Source Environment with Special Array[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(3): 338-340.

(编辑: 高西全)

(上接第 71 页)

- [2] Gillers J, Meyer Y. Properties of BV-G Structures+Textures Decomposition Models Application to Road Detection in Satellite Images [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2010, 19(11): 2793-2800.
- [3] Meyer Y. Oscillating Patterns in Image Processing and Nonlinear Evolution Equations [R]. Boston: American Mathematical Society, 2001.
- [4] Vese L, Osher S. Modeling Textures with Total Variation Minimization and Oscillating Patterns in Image Processing [J]. Journal of Scientific Computing, 2003, 19(1/3): 553-572.
- [5] Osher S, SoléA, Vese A. Image Decomposition and Restoration Using Total Variation Minimization and the H^{-1} Norm [J]. Multiscale Model and Simulation, 2003, 1(3): 349-370.
- [6] Bai J, Feng Xiangchu. Image Denoising and Decomposition Using Non-Convex Functional [J]. Chinese Journal of electronics, 2012, 12(1): 102-106.
- [7] Bai J, Feng Xiangchu. A Novel Nonlinear Parabolic-Hyperbolic Equation for Image Decomposition [C]//2011 IEEE 3rd International Conference on Signal Processing Systems. Beijing: IEEE, 2011: 41-45.
- [8] Aujol J, Chambolle A. Dual Norms and Image Decomposition Models [J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 63(1): 85-104.
- [9] Budeas A, Le T, Morel J, et al. Fast Cartoon+Texture Image Filters [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2010, 19(8): 1978-1986.
- [10] Scherzer O, Grasmair M, Grossauer H, et al. Variational Methods in Imaging [M]. New York: Springer-Verlag, 2009.
- [11] 王旭东, 冯象初, 白键. 基于结构张量场拟合的图像恢复方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(6): 68-74.
- Wang Xudong, Feng Xiangchu, Bai J. Novel Image Restoration Method with Structure Tensor Fitting [J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(6): 68-74.
- [12] 姚晓莉, 冯象初, 李亚峰. 去除乘性噪声的主成分分析算法 [J]. 光子学报, 2011, 40(7): 1031-1035.
- Yao Xiaoli, Feng Xiangchu, Li Yafeng. Principal Component Analysis Method for Multiplicative Noise Removal [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(7): 1031-1035.

(编辑: 高西全)