

一种多尺度稀疏极化敏感阵列及其 DOA 估计方法

丁进¹, 杨明磊¹, 李曙光²

(1. 西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要:针对单个电磁矢量传感器(SS-EMVS)的孔径受限和传统稀疏阵列无法提供目标极化信息的问题,结合分离式电磁矢量传感器和稀疏阵列,提出了一种由SS-EMVS组成的多尺度稀疏极化敏感阵列。该阵列的阵列单元为1个完整的分离式电磁矢量传感器,沿 y 轴分布,整个阵列按阵元间距分为2个均匀子阵,而且这2个阵元间距都可以大于入射信号的半波长,从而构造一个多尺度稀疏极化敏感阵列以得到目标波达方向(DOA)的高精度估计值。该阵列结合了SS-EMVS可降低阵元互耦和稀疏阵列可扩大阵列孔径的优点,提高了目标DOA估计精度的同时降低了阵元互耦,并且对噪声也具备较好的鲁棒性。而在算法上,首先利用矢量叉积算法得到目标方向余弦的低精度无模糊估计值;其次根据2个子阵的空域旋转不变性得到目标方向余弦的高精度模糊估计值,针对这些方向余弦的估计值提出了一种多尺度解模糊算法,可得到目标方向余弦的高精度无模糊估计值;最后经过运算得到目标的高精度DOA的估计结果。仿真结果证明了所提阵列和算法的有效性。该阵列可应用于某些空间受限的实际应用场合中,如安装在飞行器上的传感器阵列,从而发挥电磁矢量传感器的单天线多分量的特点,也可以与MIMO雷达进行结合,借助极化信息提高雷达系统的检测性能和目标二维DOA的估计精度。

关键词:分离式电磁矢量传感器;波达方向估计;子空间旋转不变(ESPRIT);矢量叉积算法

中图分类号: TN 95

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.05.014

Multi-scale Sparse Polarization Sensitive Array and the DOA Estimation Algorithm

DING Jin¹, YANG Minglei¹, LI Shuguang²

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China;

2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Combined with spatially-spread electromagnetic-vector-sensor (SS-EMVS) and sparse array, a new multi-scale sparse polarization sensitive array configuration composed of SS-EMVS is proposed in this paper. This array is placed along the y -axis, and the unit is a unique SS-EMVS. The whole array is composed of two subarrays with two different inter-element spacings which can be larger than a half-wavelength of the incident source, thus to form a multi-scale sparse polarization sensitive array to obtain the high accuracy estimations of direction of arrival (DOA). The proposed array combines the advantages of SS-EMVS that can reduce the mutual coupling of array elements and the advantages of sparse array that can expand the aperture of array. So that the estimation accuracy of target DOA is improved, the mutual coupling of array elements is reduced, and the robustness to noise is better. As for the algorithm, firstly, we perform the vector-cross-product algorithm to the SS-EMVS to obtain the low-accuracy but unambiguous direction cosine estimations. Secondly, we impose the spatial rotational invariance of the two subarrays to get the high-accuracy but cyclically ambiguous direction cosine estimations. Following this, a multiscale disambiguation algorithm is developed to obtain the high accuracy and unambiguous estimations of direction cosines, thus the elevation angles, azimuth angles of multiple sources. Simulation results verify the

收稿日期: 2018-11-10; 修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61571344); 上海航天科技创新基金(SAST2016093)

作者简介: 丁进(1994—), 男, 硕士, 主要研究方向为雷达阵列设计和雷达信号处理。

通信作者: 杨明磊(1981—), 男, 教授, 主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理。

effectiveness of the proposed array and algorithm. This array can be used in some space-constrained applications, such as the sensor array installed on the aircraft, so as to give play to the characteristic of the electromagnetic vector sensor, which single antenna has multiple components. And it can also be combined with MIMO radar to improve the detection performance of radar system and the estimation accuracy of target 2-dimensional DOA with the addition of polarization information.

Keywords: spatially-spread electromagnetic-vector-sensor; direction-of-arrival (DOA) estimation; ESPRIT; vector-cross product algorithm

0 引 言

近几年,电磁矢量传感器(SS-EMVS)由于可同时提供目标信号的 DOA 信息和极化信息受到了广泛的关注。电磁矢量传感器属于极化敏感天线的一种,通常由 3 个正交的电偶极子和 3 个正交磁环构成^[1],分别接收目标信号的电场分量和磁场分量。为了利用电磁矢量传感器的特点,WONG 等^[1]研究了一种名为矢量叉积的特殊算法,可估计目标的二维 DOA 和极化参数,然而由于电磁矢量传感器中各个电偶极子和磁环的相位中心重合,电磁分量之间的互耦严重影响了该算法的性能。2011 年,WONG 提出了一种双平行线结构的分离式电磁矢量传感器^[2],降低了电磁分量间的互耦,同时确保了矢量叉积算法的有效性。此后,多种形式矢量传感器和对应的算法也相继出现^[3-5]。

在阵列信号处理中,DOA 的估计精度与阵列孔径成正比。为了避免相位模糊,一般情况下阵元间距不可大于目标信号的半波长^[6]。因此,大的阵列孔径往往需要更多的天线阵元。但天线间的互耦和整个阵列的成本也随之增加。为解决这个问题,诸多学者研究了多种稀疏阵列形式和对应的 DOA 估计算法,其中一类稀疏阵列由多个空间分离的子阵构成,利用不同基线长度的子空间旋转不变(ESPRIT)算法来实现 DOA 估计^[7-10],而另一类是为得到尽可能多的自由度(degree-of-freedom, DOF)以解决目标个数多于阵元个数的问题,如最小冗余阵列^[11]、嵌套式阵列^[12]和互质阵列^[13],这类 DOA 估计算法的重点在于利用阵列接收数据的高阶统计量来提高 DOF,因此往往需要比较大的计算量。

近年来,极化敏感阵列作为一种具有相当潜力的新体制雷达,可以在阵列空域信息的基础上添加极化域信息,从而改善阵列在多维参数估计、抗干扰能力、检测的稳定性等方面的性能。得益于这些优势,诸多文献对其阵列方式及参数估计方法,以及多种电磁矢量传感器和稀疏阵列的结合方式开展了一

系列研究^[14-16],已成为阵列信号处理领域的研究热点。如:文献[14]提出了一种嵌套式矢量传感器阵列,使用张量实现了目标 DOA 的估计;文献[15]提出了一种新的稀疏矢量传感器阵列;文献[16]提出了一种嵌套式的偶极子阵列,但这些阵列的阵列单元都是共点式电磁矢量传感器,电磁分量之间的互耦仍然很严重,整个阵列的成本和冗余也比较高。

本文提出一种分离式电磁矢量传感器组成的多尺度稀疏极化敏感阵列,以 SS-EMVS 为阵列单元进行稀疏布阵,在扩展阵列孔径的同时保持了电磁矢量传感器的完整特性,并设置 2 个阵元间距,将整个阵列分为 2 个均匀子阵,从而将电磁矢量传感器可收集目标信号完整电磁信息的特点和稀疏阵列在大孔径和低互耦上的优势进行了充分的结合。在该阵列形式下,对 SS-EMVS 利用矢量叉积算法可以得到目标方向余弦的无模糊粗估计值,对 2 个均匀子阵利用 ESPRIT 算法可以得到方向余弦的多个高精度模糊估计值,最后利用 2 级解模糊的方式得到目标方向余弦的高精度无模糊的估计值,结合三角运算,便可以得到 2 维 DOA 的高精度估计。而且上述过程中没有用到类似嵌套式阵列^[12]中的处理过程,不需要利用接收数据的高阶统计特性,因此本算法的计算量较小。

1 阵列结构及其信号模型

分离式电磁矢量传感器如图 1 所示^[2]。由图可见,传感器由 3 个彼此正交的电偶极子 e_x 、 e_y 与 e_z 和 3 个彼此正交的磁环 h_x 、 h_y 与 h_z 组成。 e_x 位于原点, e_y 和 e_z 都位于 x 轴上, e_x 与 e_y 的距离为 $\Delta_{x,y}$ ($\Delta_{x,y} > \lambda/2$), e_y 与 e_z 的距离为 $\Delta_{y,z}$ ($\Delta_{y,z} > \lambda/2$), h_x 位于 (x_h, y_h, z_h) 处, h_y 和 h_z 以逆平行线的方式放置,且 $\overrightarrow{e_y e_x} = -\overrightarrow{h_y h_x}$ 和 $\overrightarrow{e_z e_x} = -\overrightarrow{h_z h_x}$, 其中 $\overrightarrow{xy}$ 表示从点 x 到点 y 的向量。

该分离式电磁矢量传感器的导向矢量为

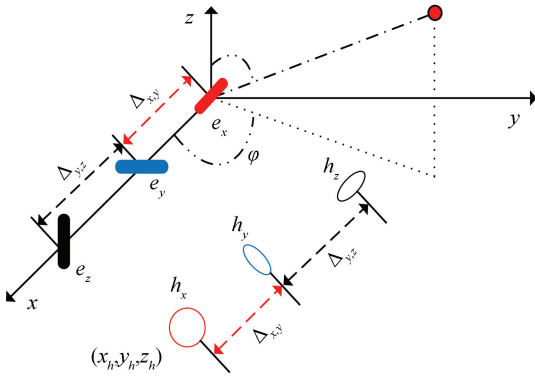


图 1 分离式电磁矢量传感器结构

Fig.1 Spatially-spread electromagnetic vector-sensor configuration

$$a = \begin{bmatrix} \tilde{e} \\ \tilde{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{e}_x \\ \tilde{e}_y \\ \tilde{e}_z \\ \tilde{h}_x \\ \tilde{h}_y \\ \tilde{h}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{x,y}u} \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\Delta_{x,y}+\Delta_{y,z})u} \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_h u + y_h v + z_h w)} \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[(x_h u + y_h v + z_h w) - \Delta_{x,y}u]} \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}[(x_h u + y_h v + z_h w) - (\Delta_{x,y} + \Delta_{y,z})u]} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\stackrel{\text{def}}{=} \xi$

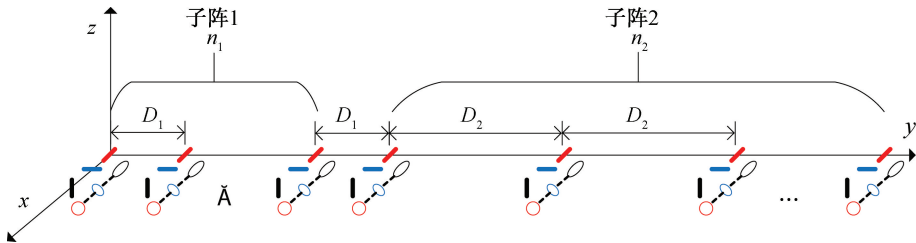


图 2 多尺度稀疏极化敏感阵列

Fig.2 Multiscale sparse polarization sensitive array

该阵列的阵列流型为

$$b = \begin{bmatrix} a \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}D_1v}a \\ \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(n_1-1)D_1v}a \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_1D_1v}a \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(n_1D_1+D_2)v}a \\ \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(n_1D_1+(n_2-1)D_2)v}a \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} a^\theta = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & -\sin\phi \\ \sin\phi\cos\theta & \cos\phi \\ -\sin\theta & 0 \\ -\sin\phi & -\cos\phi\cos\theta \\ \cos\phi & -\sin\phi\cos\theta \\ 0 & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\gamma e^{j\eta} \\ \cos\gamma \end{bmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} \beta \quad (2)$$

$\stackrel{\text{def}}{=} \Theta(\theta, \phi)$

式中: (e_x, e_y, e_z) 分别表示 x, y 和 z 轴接收到的电场分量; (h_x, h_y, h_z) 分别表示 x, y 和 z 轴接收到的磁场分量; $\phi \in [0, 2\pi], \theta \in [0, \pi]$ 分别表示入射信号的方位角和俯仰角, 方位角为信号与 x 轴正向夹角, 俯仰角为信号与 z 轴正向夹角, $\gamma \in [0, \pi/2], \eta \in [-\pi, \pi]$ 分别表示入射信号的极化辅角和极化相位差, $u = \sin\theta\cos\theta$ 表示入射信号沿 x 轴的方向余弦, $v = \sin\theta\sin\phi$ 表示入射信号沿 y 轴的方向余弦, $w = \cos\theta$ 表示入射信号沿 z 轴的方向余弦, $\odot$ 表示 Hadamard 积。

本文所提阵列如图 2 所示, 阵列单元为图 1 的分离式电磁矢量传感器, 沿 y 轴分布, 前 n_1 个阵元组成阵元间距为 D_1 ($D_1 > \lambda/2$) 的均匀线阵, 为子阵 1, 剩余的 n_2 个阵元以阵元间距 D_2 ($D_2 = mD_1$) 组成子阵 2, 其中 m 表示大于 1 的整数。

考虑 K 个相互独立的窄带信号入射到该阵列, 则接收数据为

$$x(t) = \sum_{k=1}^K b_k s_k(t) + n(t) = Bs(t) + n(t) \quad (4)$$

式中: b_k 为第 k 个目标信号的导向矢量; $B = [b_1, b_2, \dots, b_K]$ 为阵列流型; $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]$ 为目标信号矢量; $n(t)$ 表示均值为 0、方差为 σ_n^2 的复高斯白噪声。考虑 L 个时间快拍, 可以得到接收数据矩阵为

$$X = [x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_L)] \quad (5)$$

2 DOA 估计算法

2.1 信号子空间矩阵的估计值

在式(5)的接收信号模型下估计目标的 DOA, 利用最大似然估计得到阵列接收数据的协方差矩阵: $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{X}\mathbf{X}^H$ 。其中, 上标 H 表示厄米运算符。对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征值分解, 取最大的 K 个特征值对应的特征矢量构成信号子空间 $\mathbf{E}_s$, $\mathbf{E}_s = \mathbf{B}\mathbf{T}$, 其中 $\mathbf{T}$ 为唯一的非奇异矩阵。

根据本文阵列的结构, 将阵列流型 $\mathbf{B}$ 分为两部分: 子阵 1 对应的 $\mathbf{B}_1$ 和子阵 2 对应的 $\mathbf{B}_2$ 。同理, 将 $\mathbf{E}_s$ 也按相同方式分为 $\mathbf{E}_{s1}$ 和 $\mathbf{E}_{s2}$, 分别与 $\mathbf{B}_1$ 和 $\mathbf{B}_2$ 对应, 即

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{s1} = \mathbf{B}_1 \mathbf{T} \\ \mathbf{E}_{s2} = \mathbf{B}_2 \mathbf{T} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 u 和 v 高精度但存在周期性模糊的估计值

由图 2 可知, 整个阵列以不同的阵元间距分为 2 个子阵, 即子阵 1 和子阵 2。以子阵 1 为例, 前 $n_1 - 1$ 个阵元和后 $n_1 - 1$ 个阵元可构成空域旋转不变性, 表示为

$$\mathbf{b}_{y1,2}(k) = \mathbf{b}_{y1,1}(k) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} D_1 v k}, k = 1, \dots, K \quad (7)$$

式中: $\mathbf{b}_{y1,1}(k)$ 和 $\mathbf{b}_{y1,2}(k)$ 分别表示第 k 个目标在子阵 1 前 $n_1 - 1$ 个阵元和后 $n_1 - 1$ 个阵元处的导向矢量, K 个目标则可构成

$$\mathbf{B}_{y1,2} = \mathbf{B}_{y1,1} \Phi_v, 1 \quad (8)$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{q}}_1(k) = \frac{\sum_{n=1}^{n_1} \mathbf{B}_1 \{ [6(n-1)+1] : [6n], k \} ([\Phi_{v,1}]_{k,k}^*)^{n-1}}{n_1} \\ \hat{\mathbf{q}}_2(k) = \frac{\sum_{n=1}^{n_2} \mathbf{B}_2 \{ [6(n-1)+1] : [6n], k \} ([\Phi_{v,2}]_{k,k}^*)^{n-1} ([\Phi_{v,1}]_{k,k}^*)^{n_1}}{n_2} \end{cases} \quad (11)$$

分别对 $\hat{\mathbf{q}}_1(k)$ 和 $\hat{\mathbf{q}}_2(k)$ 做矢量叉积运算^[2], 为方便分析, 设 $\theta \in [0, \pi/2]$, $\phi \in [0, \pi/2]$ 并忽略下标 k , 得

$$\mathbf{p}_1 = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x_h u + y_h u + z_h u)} \begin{bmatrix} u e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(2\Delta_x, y + \Delta_y, z)u} \\ v e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(\Delta_y, z + \Delta_x, y)u} \\ w e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta_x, y u} \end{bmatrix} = \mathbf{p}_2 \quad (12)$$

对式(12)的结果进行平均, 作为参考阵元处 SS-EMVS 导向矢量的最终估计值, 即

其中 $\Phi_{v,1} = \text{diag}[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} D_1 v_1}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} D_1 v_K}]$, 表示 ESPRIT 算法中的旋转不变矩阵, $\text{diag}[\cdot]$ 表示将 $[\cdot]$ 中的向量转换成对角阵。

利用 ESPRIT 算法处理该空域旋转不变性, 因 $D_1 > \lambda/2$, 可用总体最小二乘法解得一组高精度但存在周期性模糊的 v 估计值, 即

$$\hat{v}_k^{\text{fine},1} = -\frac{\angle([\Phi_{v,1}]_{k,k})}{2\pi D_1 / \lambda}, k = 1, \dots, K \quad (9)$$

式中: $\angle(\cdot)$ 表示 $(\cdot)$ 中元素的相位。

对子阵 2 的处理方法与子阵 1 类似, 可利用 ESPRIT 算法解得另一组高精度但存在周期性模糊的 v 估计值 $\hat{v}_k^{\text{fine},2} = -\frac{\angle([\Phi_{v,2}]_{k,k})}{2\pi D_2 / \lambda}, k = 1, \dots, K$ 。

而且, 由于矩阵 $\mathbf{T}$ 在列向量上相同的顺序, 这 2 组 v 的模糊估计值 $\hat{v}_k^{\text{fine},1}$ 和 $\hat{v}_k^{\text{fine},2}$ 是自动配对的^[17]。

2.3 u 和 v 的无模糊但低精度的估计值

根据式(6)得到子阵 1 和子阵 2 的阵列流型 $\mathbf{B}_1$ 和 $\mathbf{B}_2$ 的估计值, 即

$$\begin{cases} \mathbf{B}_1 = \mathbf{E}_{s1} \mathbf{T}^{-1} \\ \mathbf{B}_2 = \mathbf{E}_{s2} \mathbf{T}^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

以 e_x 位于原点的 SS-EMVS 为参考阵元, 对所有电磁矢量传感器的导向矢量进行相位补偿, 以便进行相干相加, 从而合成到参考阵列单元处的 SS-EMVS 的导向矢量上, 补偿量为各个电磁矢量传感器的相移因子, 即

$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2}{2} \quad (13)$$

从式(13)可以得到 (u, v) 一组无模糊但精度较低的估计值, 即

$$\begin{cases} u^{\text{coarse}} = |[\mathbf{p}]_1| \\ v^{\text{coarse}} = |[\mathbf{p}]_2| \end{cases} \quad (14)$$

式中: $[\cdot]_i$ 表示取 $[\cdot]$ 中向量的第 i 个值, $|\cdot|$ 为取绝对值。从文献[18]可知, $\{v_k^{\text{coarse}}\}_{k=1}^K$ 和 $\{\hat{v}_k^{\text{fine},1}\}_{k=1}^K$ 自动配对, 所以 $\{v_k^{\text{coarse}}\}_{k=1}^K, \{\hat{v}_k^{\text{fine},1}\}_{k=1}^K$ 和 $\{\hat{v}_k^{\text{fine},2}\}_{k=1}^K$ 自动配对。

在得到 u 和 v 的粗估计值后,令 $\mathbf{p}^0 = \mathbf{p} \odot e^{-\angle[\mathbf{p}]_1}$, 有

$$\mathbf{p}^0 = \begin{bmatrix} u \\ v e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{x,y}u} \\ w e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\Delta_{x,y}+\Delta_{y,z})u} \end{bmatrix} \quad (15)$$

在式(15)的基础上,可以得到 1 组精度相对较高但周期性模糊的 u 和 v 估计值,即

$$\hat{u}_k^{\text{fine},1} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\Delta_{x,y}} \angle\{[\mathbf{p}^0]_2\} \quad (16)$$

$$\hat{u}_k^{\text{fine},2} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{\Delta_{x,y} + \Delta_{y,z}} \angle\{[\mathbf{p}^0]_3\} \quad (17)$$

而针对不同范围的 (θ, ϕ) , 整个处理过程不变, 只是式(12)和式(15)的加减号会对应改变^[2]。

$\{\mathbf{v}_k^{\text{coarse}}\}_{k=1}^K$ 和 $\{\mathbf{u}_k^{\text{coarse}}\}_{k=1}^K$ 自动配对, $\{\mathbf{u}_k^{\text{coarse}}\}_{k=1}^K$, $\{\hat{u}_k^{\text{fine},1}\}_{k=1}^K$ 和 $\{\hat{u}_k^{\text{fine},2}\}_{k=1}^K$ 也自动配对。

2.4 解模糊及 DOA 估计

综上所述,所有 u 的估计值 $\{\mathbf{u}_k^{\text{coarse}}, \hat{u}_k^{\text{fine},1}, \hat{u}_k^{\text{fine},2}, (k=1, \dots, K)\}$ 和 v 的估计值 $\{\mathbf{v}_k^{\text{coarse}}, \hat{v}_k^{\text{fine},1}, \hat{v}_k^{\text{fine},2}, (k=1, \dots, K)\}$ 都已经自动配对, 可利用逐步解模糊的方法得到 u 和 v 的高精度无模糊估计值^[19-20]。

以 v 为例, 以 $\mathbf{v}_k^{\text{coarse}}$ 作为解 $\hat{v}_k^{\text{fine},1}$ 模糊数的参考值, 第 1 个无模糊的 v 估计值可由式(18)解模糊方程得到, 即

$$\mathbf{v}_k^{\text{next}} = \hat{v}_k^{\text{fine},1} + \hat{l}_1 \frac{\lambda}{D_1} \quad (18)$$

$$\hat{l}_1 = \operatorname{argmin}_{l_1} \left| \mathbf{v}_k^{\text{coarse}} - \hat{v}_k^{\text{fine},1} - l_1 \frac{\lambda}{D_1} \right| \quad (19)$$

式中: l_1 的取值范围为

$$\lceil (-1 - \hat{v}_k^{\text{fine},1}) \frac{D_1}{\lambda} \rceil \leq l_1 \leq \lfloor (1 - \hat{v}_k^{\text{fine},1}) \frac{D_1}{\lambda} \rfloor \quad (20)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 和 $\lfloor \cdot \rfloor$ 分别表示向上取整和向下取整。

利用已解模糊的 $\mathbf{v}_k^{\text{next}}$ 对模糊估计值 $\hat{v}_k^{\text{fine},2}$ 进行解模糊, 得到最后的高精度无模糊的 v 估计值, 即

$$\mathbf{v}_k^{\text{final}} = \hat{v}_k^{\text{fine},2} + \hat{l}_2 \frac{\lambda}{D_2} \quad (21)$$

$$\hat{l}_2 = \operatorname{argmin}_{l_2} \left| \mathbf{v}_k^{\text{next}} - \hat{v}_k^{\text{fine},2} - l_2 \frac{\lambda}{D_2} \right| \quad (22)$$

l_2 的取值范围为

$$\lceil (-1 - \hat{v}_k^{\text{fine},2}) \frac{D_2}{\lambda} \rceil \leq l_2 \leq \lfloor (1 - \hat{v}_k^{\text{fine},2}) \frac{D_2}{\lambda} \rfloor \quad (23)$$

而 u 的处理过程与 v 类似, 可得到 u 的高精度无模糊估计值 $\mathbf{u}_k^{\text{final}}$ 。

根据已得到的 u 和 v 的高精度无模糊估计值 $\{\mathbf{u}_k^{\text{final}}, \mathbf{v}_k^{\text{final}}, (k=1, \dots, K)\}$, 进行以下的三角操作可得目标的 DOA 估计值, 即

$$\begin{cases} \hat{\theta}_k = \arcsin(\sqrt{(\mathbf{u}_k^{\text{final}})^2 + (\mathbf{v}_k^{\text{final}})^2}) \\ \hat{\phi}_k = \arctan\left(\frac{\mathbf{v}_k^{\text{final}}}{\mathbf{u}_k^{\text{final}}}\right) \end{cases} \quad (24)$$

本文所提稀疏极化敏感阵列的 DOA 估计算法流程如图 3 所示。

3 仿真结果与分析

通过计算机仿真来验证本文所提阵列和算法的有效性和性能。为不失一般性, 设 $\theta \in [0, \pi/2]$, $\phi \in [0, \pi/2)$, 参考阵元处分离式电磁矢量传感器的 h_x 磁环的坐标为 $(x_h, y_h, z_h) = (7.5\lambda, 5\lambda, 10\lambda)$ 。定义参数估计的均方根误差为 $\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\hat{\alpha}_m - \alpha)^2}$, 其中 $\hat{\alpha}_m$ 为第 m 次实验中参数 α 的估计值, M 表示蒙特卡洛实验的次数。

3.1 目标二维 DOA 估计与配对结果

设阵列单元数为 12, 前 6 个 SS-EMVS 组成子阵 1, 阵元间距 $D_1 = 7\lambda$, 剩余 6 个以阵元间距 $D_2 = 7D_1 = 49\lambda$ 构成子阵 2。每个 SS-EMVS 都满足 $\Delta_{x,y} = \Delta_{y,z} = 5\lambda$ 。假设同一距离单元内存在 $K = 2$ 个相互独立的目标, 俯仰角为 $\theta = (42^\circ, 65^\circ)$, 方位角为 $\phi = (20^\circ, 52^\circ)$, 极化辅角为 $\gamma = (45^\circ, 35^\circ)$, 极化相位差为 $\eta = (40^\circ, 30^\circ)$ 。快拍数 $L = 200$, 信噪比为 15 dB。入射信号为随机信号模型, 噪声为方差为 0 的复高斯白噪声。图 4 为 200 次蒙特卡洛实验的二维 DOA 估计结果, 可以看出本文算法能够正确估计出目标的俯仰角和方位角且自动配对正确。

3.2 目标参数估计性能与信噪比的分析

图 4 给出了目标二维 DOA 估计结果, 图 5 给出了本文算法中不同的 u 和 v 估计值的均方根误差与信噪比的关系。由图可见: u^{final} 和 v^{final} 的估计精度比 u^{coarse} 和 v^{coarse} 要高很多, 更接近参数估计的克拉美罗界(CRB)。另外, 在解模糊过程中存在 1 个信噪比门限, 当信噪比低于该门限时, 估计性能迅速恶化, 而当信噪比高于该门限时, 估计精度也迅速提

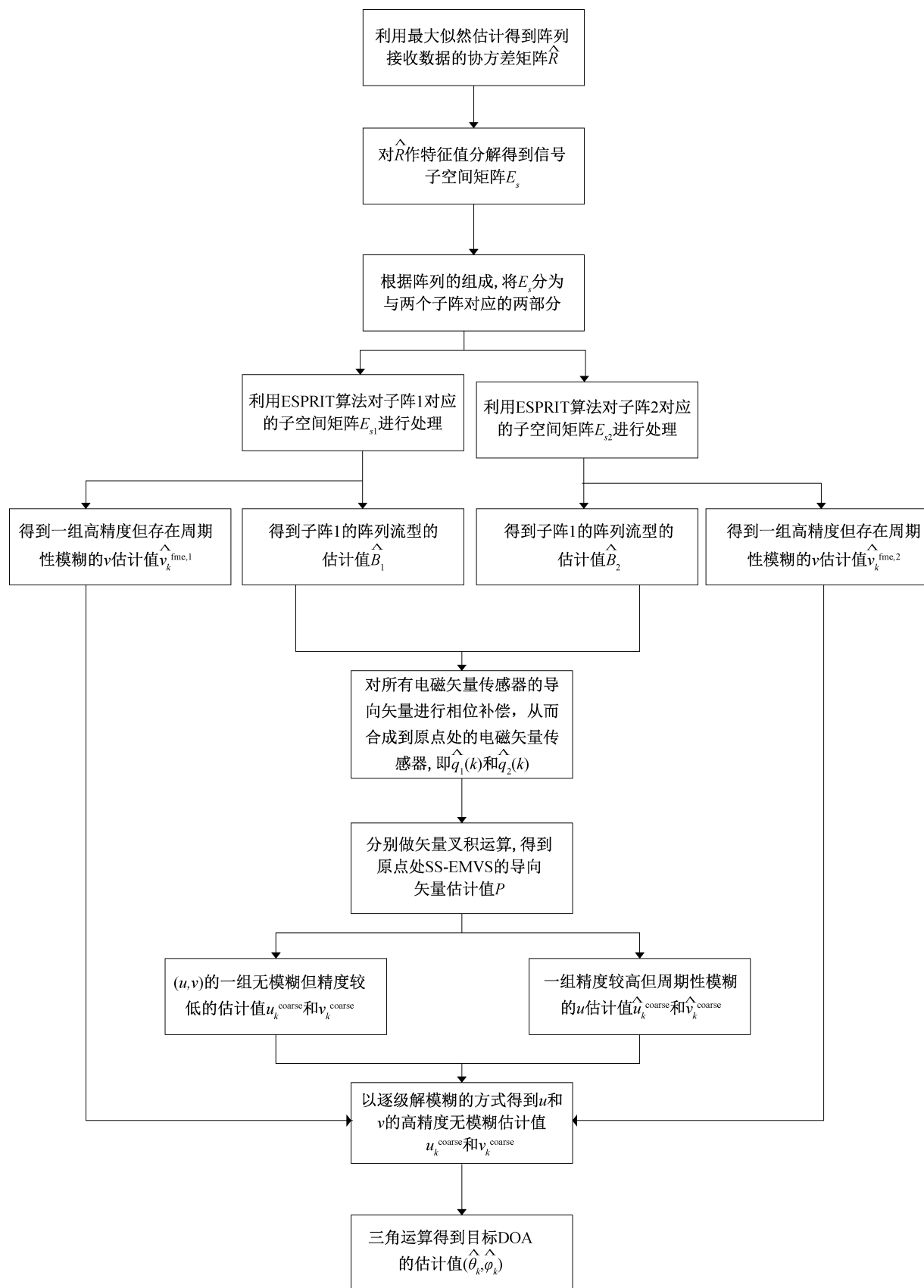


图 3 DOA 估计算法流程

Fig.3 Flow of DOA estimation algorithm

高^[18,21]。从图 5 可以看出 u, v 的信噪比门限分别是 -7 dB 和 -3 dB, 而且估计精度随着信噪比的提高而提高。

另外, 以 2 个均匀线阵作为比较, 设阵列单元个数都为 12, 阵元间距分别为 D_1 和 D_2 。图 6 给出了这 3 种阵列的 u 和 v 估计值与信噪比的关系。从图中可以看出, 对于 u , 因为这 3 种阵列在 x 轴方向上的孔径完全一致, 估计精度基本相同。而对于 v , 本阵列的阵列孔径处于这 2 个均匀线阵之间, 估计精度也位于中间位置, 但阵元间距为 D_2 的均匀线阵的信噪比门限比本阵列高得多(13 dB)。

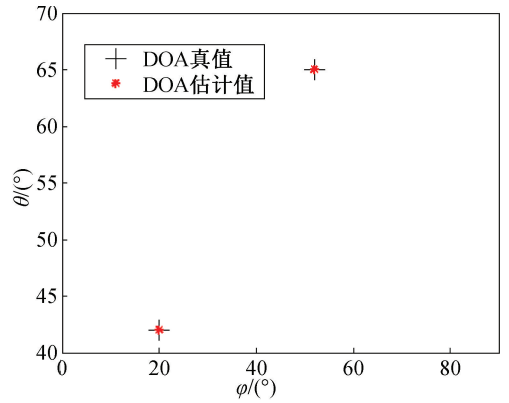
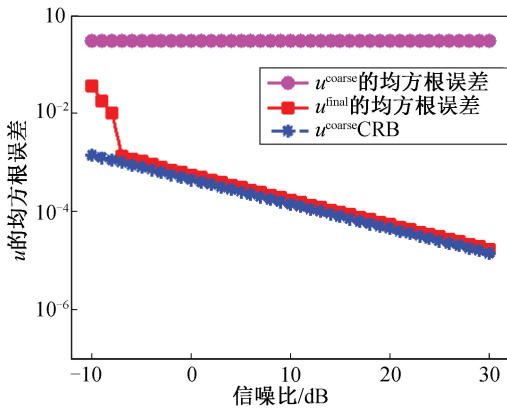
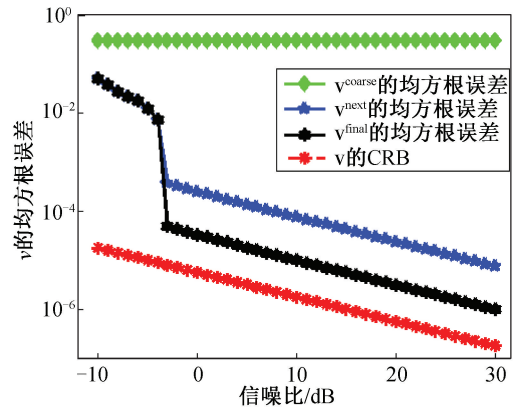


图 4 目标二维 DOA 估计结果

Fig.4 Two-dimensional DOA estimation results of targets



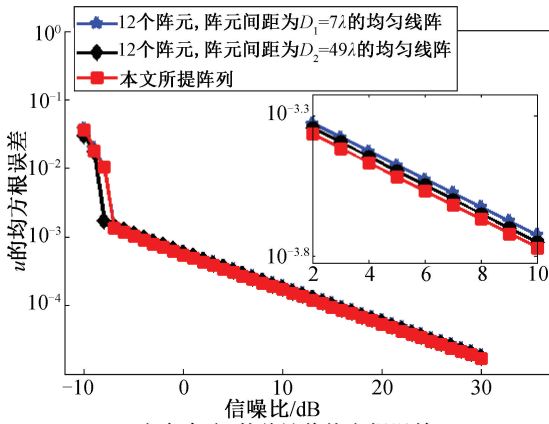
(a) 方向余弦 u 的估计值均方根误差



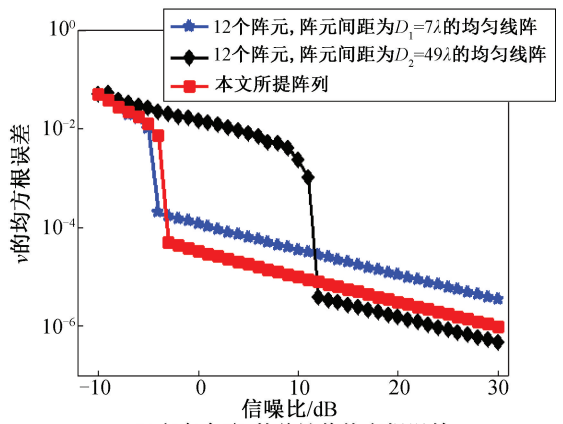
(b) 方向余弦 v 的估计值均方根误差

图 5 方向余弦 u 和 v 的估计值均方根误差与信噪比的关系

Fig.5 RMSE of direction cosines u and v estimations versus SNR



(a) 方向余弦 u 的估计值均方根误差



(b) 方向余弦 v 的估计值均方根误差

图 6 不同阵列下方向余弦 u 和 v 的估计值均方根误差与信噪比的关系

Fig.6 RMSE of direction cosines u and v estimations of different arrays versus SNR

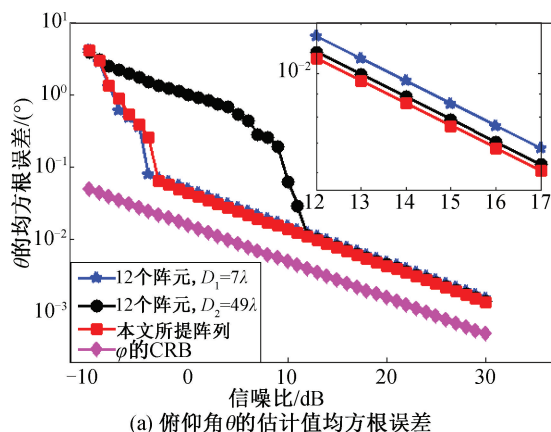
3.3 目标二维 DOA 估计性能与信噪比的分析

由于目标的二维 DOA 信息由 u, v 共同决定,

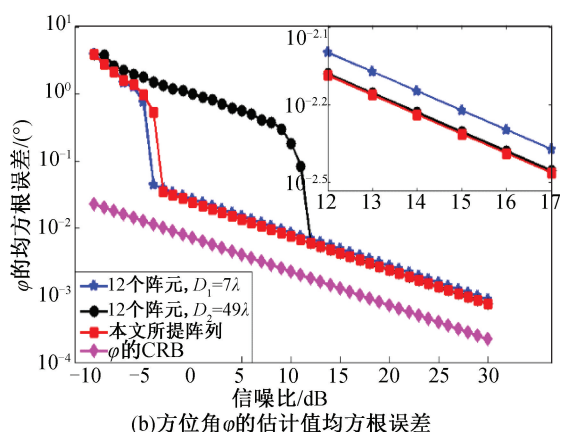
图 7 给出了俯仰角和方位角估计值的均方根误差随信噪比变化的曲线。由图可以看出: 本阵列的信噪

比门限为 -3 dB,是 u 和 v 的门限中较大的一个。由于本阵列与对比阵列对 u 的估计精度基本相同,而DOA的估计精度又与 u 和 v 都有关,因此本阵列

对DOA估计性能的提升并不明显,但仍可看出估计精度有所提高,且信噪比门限较低。



(a) 俯仰角 θ 的估计值均方根误差



(b) 方位角 ϕ 的估计值均方根误差

图7 不同阵列下俯仰角 θ 和方位角 ϕ 的估计值均方根误差与信噪比的关系

Fig.7 RMSE of elevation θ and azimuth ϕ estimations of different arrays versus SNR

4 结论

本文提出了一种多尺度稀疏极化敏感阵列,并针对该阵列提出了对应的DOA估计算法。相比传统的共点式电磁矢量传感器,分离式结构可以显著降低阵元间互耦,降低硬件实现的复杂性。与均匀线阵的形式相比,该阵列在参数估计性能、互耦和对噪声的鲁棒性上具备更好的权衡效果。理论上,该阵列可扩展到更多子阵,以便在性能和成本上进行更合适的选择。后续研究中,拟针对线阵只能进行某一维上的孔径扩展的不足,研究该稀疏极化敏感阵列的L型阵,实现孔径的二维扩展;同时,对作为阵元的电磁矢量传感器进行结构简化,从而降低阵列成本。

参考文献

- [1] WONG K T, ZOLTOWSKI M D. Uni-vector-sensor ESPRIT for multisource azimuth, elevation, and polarization estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45 (10): 1467-1474.
- [2] WONG K T, YUAN X. "Vector cross-product direction-finding" with an electromagnetic vector-sensor of six orthogonally oriented but spatially noncollocating dipoles/loops[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 160-171.
- [3] LI Y, ZHANG J Q. An enumerative nonlinear programming approach to direction finding with a general

spatially spread electromagnetic vector sensor array [J]. Signal Processing, 2013, 93(4): 856-865.

- [4] YUAN X. Spatially spread dipole/loop quads/quints; for direction finding and polarization estimation [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 1081-1084.
- [5] JI M, GONG X, LIN Q. A multi-set approach for direction finding based on spatially displaced electromagnetic vector-sensors [C]//Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015 12th International Conference on. IEEE, 2015: 1824-1828.
- [6] VAN TREES H L. Optimum array processing, part IV of detection, estimation, and modulation theory. 2002[J]. EISBN: 0-471-09390-4, 362-382.
- [7] WONG K T, ZOLTOWSKI M D. Sparse array aperture extension with dual-size spatial invariances for ESPRIT-based direction finding [C]//IEEE 39th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1996, 2: 691-694.
- [8] 马严. 分布式阵列雷达角度估计及解模糊算法研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2016.
- [9] VASYLYSHYN V I. Unitary ESPRIT-based DOA estimation using sparse linear dual size spatial invariance array [C]//Radar Conference, EURAD 2005. IEEE, 2005: 157-160.
- [10] SWINDLEHURST A L, OTTERSTEN B, ROY R, et al. Multiple invariance ESPRIT [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(4): 867-881.

(下转第114页)

参考文献

- [1] META A, HOOGEBOOM P, LIGTHART L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [2] WANG R, LOFFELD O, NIES H, et al. Focus FM-CW SAR data using the wavenumber domain algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 2109-2118.
- [3] LANARI R, TESAURO M, SANSOSTI E, et al. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 39(9): 1993-2004.
- [4] PRATS P, SCHEIBER R, MITTERMAYER J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 770-780.
- [5] 马兵强. 滑动聚束 FMCW-SAR 的子孔径波数域成像算法[J]. 雷达学报, 2013, 2(3): 319-325.
- [6] MITTERMAYER J, MOREIRA A, LOFFELD O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [7] 耿淑敏. FM-CW SAR 信号处理关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
- [8] DEWIT J J M, META A, HOOGEBOOM P. Modified range-Doppler processing for FM-CW synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 83-87.
- [9] 杨威, 李春升, 陈杰, 等. 星载 SAR 滑动聚束模式三步扩展算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(3): 297-302.
- [10] SUN G, XING M, WANG Y, et al. Sliding spotlight and TOPS SAR data processing without subaperture[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1036-1040.
- [11] 邓云凯, 贾小雪, 冯锦, 等. 基于方位频率去斜的滑动聚束 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2655-2660.
- (本文编辑:应振华)
-
- (上接第 106 页)
- [11] MOFFET A. Minimum-redundancy linear arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(2): 172-175.
- [12] PAL P, VAIDYANATHAN P P. Nested arrays: a novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(8): 4167-4181.
- [13] VAIDYANATHAN P P, PAL P. Sparse sensing with co-prime samplers and arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(2): 573-586.
- [14] HAN K, NEHORAI A. Nested vector-sensor array processing via tensor modeling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(10): 2542-2553.
- [15] RAO S, CHEPURI S P, LEUS G. DOA estimation using sparse vector sensor arrays[C]//Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), 2015 IEEE 6th International Workshop on. IEEE, 2015: 333-336.
- [16] HE J, ZHANG Z, SHU T, et al. Direction finding of multiple partially polarized signals with a nested cross-dipole array[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017:1-2.
- [17] LI J, SHEN M, JIANG D. DOA estimation based on combined ESPRIT for co-prime array[C]//Antennas and Propagation (APCAP), 2016 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on. IEEE, 2016: 117-118.
- [18] 郑桂妹, 陈伯孝, 杨明磊. 改进分离式电磁矢量阵列的两维波达方向估计[J]. 电波科学学报, 2014(2): 213-220.
- [19] VASYLYSHYN V I. Closed-form DOA estimation with multiscale unitary ESPRIT algorithm[C]//Radar Conference, 2004. EURAD. First European. IEEE, 2004: 317-320.
- [20] 马严, 陈伯孝, 杨明磊, 等. 基于 ESPRIT 的多基线分布式阵列 DOA 估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(8): 1453-1459.
- [21] YANG X Y, CHEN B X, CHEN Y H. An eigenstructure-based 2D DOA estimation method using dual-size spatial invariance array[J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(1): 163-171.
- (本文编辑:应振华)