



共享孔径交错稀疏阵列天线互耦误差建模与校正

庄君明¹, 李龙军²

(1. 福建师范大学, 福建 福州 350117;

2. 中国人民解放军 94923 部队, 福建 武夷山 354301)

摘 要: 共享孔径交错稀疏阵列天线是实现多功能阵列天线的有效途径。现有的参数化互耦消除方法都是针对均匀阵列天线展开的, 其研究的互耦矩阵都是规则的方阵, 对共享孔径交错稀疏阵列天线的互耦矩阵模型并不适用。在充分考虑共享孔径交错稀疏阵列天线中子阵内互耦的“稀疏”和“方位依赖”的特殊性后, 通过将常规的互耦矩阵扩展表示为“非方”的“增广互耦矩阵”来对交错稀疏阵列天线子阵内和子阵间的耦合效应进行建模, 并通过“增广互耦矩阵”的参数化估计最终实现了共享孔径交错稀疏阵列天线互耦误差的建模与校正。仿真结果证实了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 共享孔径; 交错稀疏阵; 阵列校正; 增广互耦矩阵

中图分类号: TN820

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018186

Mutual coupling error modeling and correction of shared aperture interleaved sparse array antennas

ZHUANG Junming¹, LI Longjun²

1. Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

2. No.94923 Army of PLA, Wuyishan 354301, China

Abstract: The shared aperture interleaved sparse array antenna is an effective way to implement a multi-function array antenna. The existing parameterized mutual coupling elimination methods are all developed for uniform array antennas. The mutual coupling matrix which is studied is a regular square matrix and is not applicable to the mutual coupling matrix model of the shared aperture interleaved sparse array antenna. After fully considering the speciality of “sparse” and “azimuth dependence” of mutual coupling in sub-arrays of a shared aperture interleaved sparse array antenna, the conventional mutual coupling matrix extension was expressed as “non-square” “enhanced mutual coupling matrix”. Coupling effects between subarrays and subarrays in interleaved arrays of sparse arrays were modeled, and the modeling and correction of mutual coupling errors in shared aperture sparse array antennas were finally achieved through the parameterization of “enhanced mutual coupling matrix”. Simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: shared aperture, interleaved sparse array, array correction, extended mutual coupling matrix



1 引言

共享孔径交错稀疏阵列天线是指天线单元交错稀疏分布于同一个天线孔径上,通过共享一副天线孔径来同时完成原先分别由不同天线完成的多种战术功能。采用这种非均匀的天线单元布阵,可以获得较大的孔径、较窄的波束宽度和较高的分辨能力,有利于系统成本的降低,具有较大的应用前景。阵列天线单元互耦效应的存在严重影响了阵列天线方向图性能,一直以来都是天线优化布阵和方向图方面需要着重解决的难点问题。相对于均匀阵列天线,交错稀疏阵列天线互耦效应的分析和校正更加繁杂,需要对子阵内和子阵间天线单元的互耦效应进行联合估计和校正,目前还未见到国内外的相关报道。

在早期很长一段时间的的研究中,互耦的校正和补偿一般都是先对阵元间的互耦进行电磁测量或通过矩量法对互耦进行电磁计算^[1-2];然后,通过互耦的测量值或计算值对阵列进行校正。参考文献[3]基于双圈均匀圆阵,提出了一种互耦自校正方法;算法利用双圈均匀圆阵特性的互耦矩阵特性,对角度信息和互耦系数进行了解耦合,完成了对互耦系数和方位角度的联合估计。参考文献[4]利用均匀圆阵的特殊圆对称性,提出了一种顽健高效的互耦参数校正方法。参考文献[5]提出一种阵列互耦矩阵与波达方向的级联估计方法,利用互耦矩阵特殊的结构特点,通过变换阵列流形,实现对互耦矩阵与 DOA 的解耦合。然而现有参数化的方法大都只适用于阵元分布较均匀有序的周期结构性阵列,对于交错稀疏分布的共享孔径阵列天线阵,由于每个单元所处的位置不再具有规律性,此类参数化方法难以适用。

可以把交错稀疏阵子阵间互耦看作一种特殊的“平台的散射效应”,由于稀疏布阵,子阵内的单元互耦幅度较弱,但依然存在“俯仰依赖”的特性。针对现有的参数化互耦校正方法只能对

具有特殊结构的方阵互耦矩阵进行估计和校正,而无法对稀疏交错分布的共享孔径阵列天线进行互耦估计和校正的问题,本文采取“增广互耦矩阵”对交错稀疏阵列天线子阵内和子阵间天线单元的耦合效应进行建模。首先以增广互耦矩阵前半部分的方阵对应子阵内的单元互耦,使其满足稀疏和俯仰依赖特性;而增广互耦矩阵的后半部分,对应子阵间互耦效应的补偿,其阶数和结构可以结合共享孔径交错阵列天线结构来确定。在以上工作的基础上推导了增广互耦矩阵与方位依赖幅相误差的数学关系。借鉴参考文献[6]中提出的方位依赖幅相误差校正的辅助阵元法,整合多次单源校正实验获得的幅相误差估计,同时利用加速梯度下降法对含幅相误差及互耦系数矩阵的不正定方程进行求解,最终实现了共享孔径稀疏交错阵列天线子阵内和子阵间单元互耦效应的联合校正。

2 交错稀疏阵列天线增广互耦矩阵和导向矢量模型

假设阵列为一个 N 元线阵, θ 为空间信源的方位角。空间信源的导向矢量 $\mathbf{a}(\theta)$ 可由式(1)~式(3)表示为:

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} g_1(\theta) \exp(jk_0 \mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{v}) \\ g_2(\theta) \exp(jk_0 \mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{v}) \\ \vdots \\ g_N(\theta) \exp(jk_0 \mathbf{r}_N \cdot \mathbf{v}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = [\cos \theta \quad \sin \theta]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_i = [x_i \quad y_i] \quad k_0 = 2\pi/\lambda_0 \quad (3)$$

其中, $g_i(\theta)$ 为第 i 个阵元在方位角 θ 处的单元方向图,本文假设单元为全向单元,因此单元方向图为 1, $\mathbf{r}_i$ 为阵元 i 的坐标矢量, $\mathbf{v}$ 为信源的方位矢量,当阵列存在互耦时,导向矢量 $\tilde{\mathbf{a}}(\theta, \phi)$ 可以表示为:

$$\tilde{\mathbf{a}}(\theta) = \mathbf{Z} \mathbf{a}(\theta) \quad (4)$$

其中, Z 为直线阵列天线的导向矢量。当阵列为两子阵交错的共享孔径阵列天线时, 阵列天线之间的互耦就分为子阵内互耦和子阵间单元的互耦。子阵内的互耦存在“方位依赖”和“稀疏特性”, 而子阵的互耦与子阵的具体天线结构和平台有关。以子阵 1 为例, 交错稀疏阵列天线子阵 1 的互耦矩阵可以表示成分块矩阵形式 $\begin{bmatrix} \mathbf{Z1}_{N_1 \times N_1} & \mathbf{Z2}_{N_1 \times N_2} \end{bmatrix}$, $N_1 \times N_1$ 的 $\mathbf{Z1}$ 部分反映子阵 1 内部各阵元间的相互耦合, 等栅格分布的线阵 (相邻栅格间距为半个波长) 的互耦系数与阵元间间距成反比, 互耦子矩阵 $\mathbf{Z1}$ 是互易对称矩阵; $N_1 \times N_2$ 的 $\mathbf{Z2}$ 部分反映子阵 1 与子阵 2 单元之间的耦合效应, 它与子阵 1 与子阵 2 的单元位置有关。显然, 扩展的互耦矩阵不再具有简化的形式, 现有的基于行列相等的互耦矩阵的互耦校正方法失效。为了实现对增广互耦矩阵的估计与校正, 引入与互耦等价的方位依赖的阵元幅相误差矩阵的概念, 此时交错阵列天线的导向矢量 $\tilde{\mathbf{a}}(\theta)$ 可以表示为:

$$\Gamma_i(\theta) = \sum_{m=1}^N \frac{a_m(\theta)}{a_i(\theta)} z_{im} \quad (5)$$

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}l_1 \sin \theta} & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}l_2 \sin \theta} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}l_{N_1} \sin \theta} \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}n_1 \sin \theta} & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}n_2 \sin \theta} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}n_{N_2} \sin \theta} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

其中, Γ_i 表示第 i 个阵元的幅相误差, z_{im} 为互耦矩阵第 i 行第 m 列元素。由式 (5) 可知, 由互耦引入的方位依赖的阵元幅相误差可以表示成交错阵列天线导向矢量元素 $a_i(\theta)$ 与互耦系数 z_{im} 的函数关系。通过多次不同信源方位的单源校正实验得到的数据构成式 (5) 相应的方程组, 在满足自由度约束的条件下, 通过对式 (5) 的求解便可以获得增广互耦矩阵的估计, 从而实现交错阵列天线子阵内和子阵间单元耦合效应的联合校正。

3 增广互耦矩阵模型求解算法

参考文献[6]提出的方位依赖幅相误差校正的辅助阵元法, 可以在多个不同信源情况下对信源及其对应的阵元幅相误差进行联合无模糊估计。本文将借鉴该方法, 通过引入少量精确校正的辅助阵元对交错稀疏阵列天线的方位依赖的幅相误差进行估计。假设距离较远的辅助阵元的个数为 m , 由于相距较远, 因此辅助阵元之间以及辅助阵元与交错阵列天线单元之间的互耦效应十分微弱, 可以忽略不计。此时引入辅助阵元后交错阵列天线的互耦矩阵可以表示为:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_m & \mathbf{0}_{m \times N} \\ \mathbf{0}_{N_1 \times m} & \mathbf{Z}_{N_1 \times N} \end{pmatrix} \quad (7)$$

结合式 (5) 可知, 对于辅助阵元, 其方位依赖幅相误差的值为 1。令:

$$\mathbf{T}[\tilde{\mathbf{a}}_s(\theta)] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_m & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & a_{m+1} & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & a_{m+2} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{m+N_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

此时交错阵列天线的导向矢量可以写为:

$$\tilde{\mathbf{a}}(\theta) = \tilde{\mathbf{F}}(\theta) \tilde{\mathbf{a}}_s(\theta) = \mathbf{T}[\tilde{\mathbf{a}}_s(\theta)] \tilde{\mathbf{F}}(\theta) \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{F}}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma_{m+1} & \Gamma_{m+2} & \dots & \Gamma_{m+N_1} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

式 (9) 建立的导向矢量扰动模型与参考文献[6]一致, 由参考文献[6]中的自校正算法可得:

$$[\hat{\theta}] = \arg \max_{\theta} \frac{1}{\lambda_{\min} \left[\hat{\mathbf{Z}}(\theta) \right]} \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{F}}(\hat{\theta}) = \mathbf{e}_{\min} \left[\hat{\mathbf{Z}}(\hat{\theta}) \right] \quad \& \quad \mathbf{e}_{\min}(1) = 1 \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}(\theta) = \mathbf{T}^H [\tilde{\mathbf{a}}_s(\theta)] \hat{\mathbf{E}}_{N_1} \hat{\mathbf{E}}_{N_1}^H \mathbf{T} [\tilde{\mathbf{a}}_s(\theta)] \quad (13)$$

由式 (11) 和式 (12) 可以得出校正源的方



位角以及由互耦引入的方位依赖幅相误差的估计值,再结合式(5)就可以获得增广互耦系数矩阵的估计值,从而实现交错阵列天线子阵内和子阵间单元互耦的联合校正。本文采取单源校正、多次校正实验数据整合的方式来简化校正系统。通过求解线性方程组的方法来获得增广互耦矩阵系数。式(5)的求解可以简化为对式(14)的求解:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{A}$ 表示方位信息矩阵, $\mathbf{x}$ 为待求的增广互耦矩阵估计值, $\mathbf{b}$ 表示通过式(12)得到的幅相误差的估计值。式(14)有解的充分必要条件是 $\mathbf{A}$ 的秩等于增广矩阵 $[\mathbf{A}, \mathbf{b}]$ 的秩,这对单源校正信源的选择提出了很高的要求,因此往往会因为单源校正信源的选择不当导致方程组成为病态方程组,得到的互耦矩阵系数估计与真值相差较大,无法达到互耦校正的目的。因此在无法精确选取校正信源使式(12)成为一个适定方程的前提下,就需要寻找一种方法求解不适定方程。此时式(5)变成一个线性回归的问题。即式(5)可以定义为以下线性回归问题:

$$\arg \min_{\mathbf{x}} \left\{ \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2^2 + p^2 \|\mathbf{x}\|_2^2 \right\} \quad (15)$$

其中, p 为正则化参数,它是控制互耦矩阵估计值与真值之间的误差以及互耦矩阵估计值中非零个数的参数,可以用 L-曲线法加以确定,在本文的计算中使用了由 Hansen^[12-13]提供的 MATLAB 工具包。为了求解式(15),本文采用加速梯度下降的方法,该方法可以简单描述为:

$$f(\mathbf{x}) = l(\mathbf{x}) + r(\mathbf{x}) \quad (16)$$

$$l(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \|\mathbf{Ax}_i - \mathbf{b}\|_2^2 \quad (17)$$

$$r(\mathbf{x}) = p \|\mathbf{x}\|_2^2 \quad (18)$$

其中, $l(\mathbf{x})$ 为损失函数, $r(\mathbf{x})$ 为正则化项, $\|\bullet\|_F$ 为范数。通过损失函数与正则化函数,将线性回归的约束优化问题变成一个反映原目标函数约束条件的合成函数的无约束极小化的问题。

4 仿真实验分析

以 20 元线阵为例,假设来波信号频率为 3.06 GHz,波长 λ 为 9.8 cm,阵列在 Y 轴方向排列,利用基于改进型迭代 FFT 算法的交错稀疏优化方法,对其进行交错稀疏优化布阵,得到的交错稀疏阵列天线子阵 1 的阵元位置坐标为 $Y_1 = [2.43 \ 12.23 \ 31.83 \ 41.63 \ 46.53 \ 66.13 \ 71.03 \ 75.93 \ 85.73 \ 90.63]$,子阵 2 的阵元位置坐标为 $Y_2 = [7.33 \ 17.13 \ 22.03 \ 26.93 \ 36.73 \ 51.43 \ 56.33 \ 61.23 \ 80.83 \ 95.53]$,两子阵天线单元位置的 X 坐标为 0,其方向图如图 1 所示。从图 1 中可知,交错分布的两个子阵天线方向图具有相似的主瓣宽度和峰值旁瓣电平。此时,交错稀疏阵列天线扩展后的互耦矩阵变为 10×20 的非方矩阵。假设均匀布阵的线阵互耦矩阵的自由度为 3,即阵元间距大于 3 倍的波长即 29.4 cm 时,阵元间的互耦才可以被忽略。令辅助阵元的个数 $n=3$ 且满足相互之间的距离大于 29.4 cm 约束时,将辅助阵元不对称放置,其位置坐标分别设置为 (0,-4.7)、(-2,-27.72) 和 (1.5,-42.64)。引入辅助阵元后的阵列结构如图 2 所示。

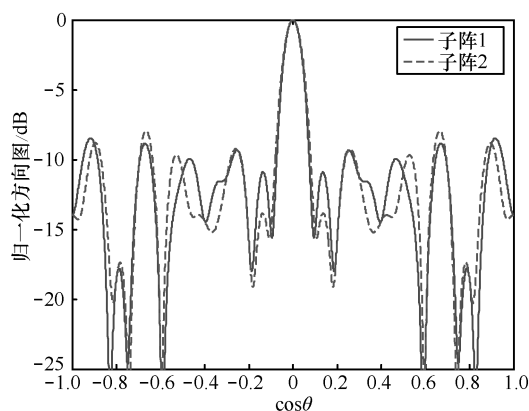


图 1 20 元交错稀疏阵列子阵天线方向图

因为子阵 1 与子阵 2 互耦矩阵的估计与校正的方法相同,不失一般性,以子阵 1 作为本文的研究对象,对本文提出算法的有效性和准确性进行研究。设置每次单源校正实验的信源方位为

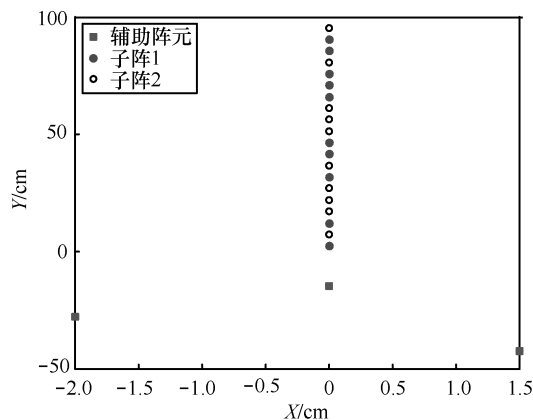


图2 引入辅助阵元后阵列天线结构

$[-80^\circ -70^\circ -60^\circ -50^\circ -43^\circ -30^\circ -23^\circ -15^\circ -8^\circ 0^\circ 5^\circ 10^\circ 18^\circ 26^\circ 35^\circ 42^\circ 53^\circ 65^\circ 75^\circ 80^\circ]$, 当快拍数为 1 000、信噪比为 20 dB 时, 引入辅助阵元后阵列天线估计单源校正来波方向的功率谱如图 3 所示。从图 3 中可知, 采取本文采取的方式设置辅助阵元的个数及位置能很好地改善阵列天线的模糊分辨能力。随机选取互耦系数矢量 $\mathbf{z}=[1 \ 0.768 \ 1+0.835 \ 3*i \ 0.486 \ 6+0.865 \ 3*i]$ 。利用 L-曲线法可以获得正则化参数 p 的最优值即转角值为 0.014 7, 如图 4 所示, 利用本文提出的方法即可得到交错稀疏阵列天线子阵内单元的互耦估计值 $\hat{\mathbf{z}}_1$ 及子阵间单元的互耦估计值 $\hat{\mathbf{z}}_2$ 。由于不考虑互耦时子阵 1 的激励值为 1, 图 5 反映了互耦对子阵 1 激励值的影响, 从图 5 中可知, 采用本文提出的方法对互耦校正后的激励值与真值基本保持一致。

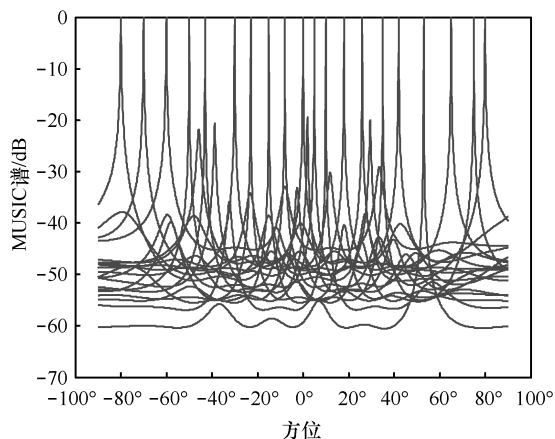


图3 引入辅助阵元后交错稀疏阵列天线的 DOA 估计

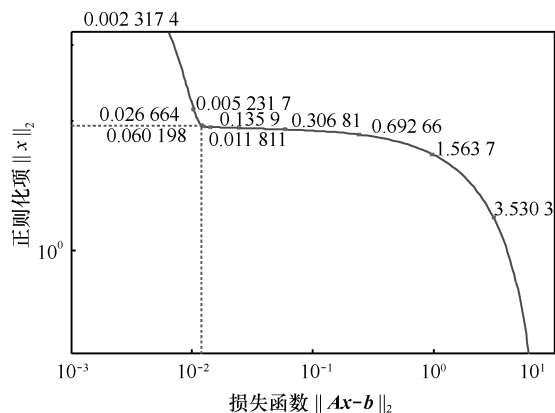
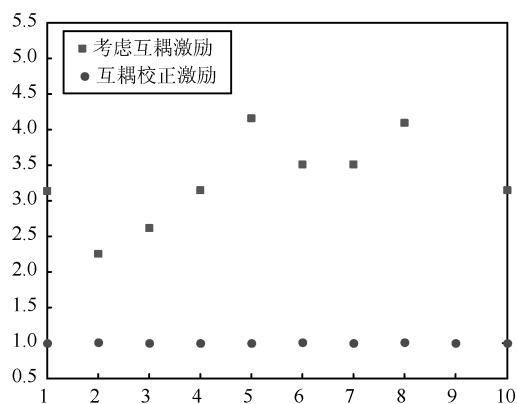
图4 正则化参数 p 的值

图5 互耦校正前后子阵 1 天线单元激励的扰动值

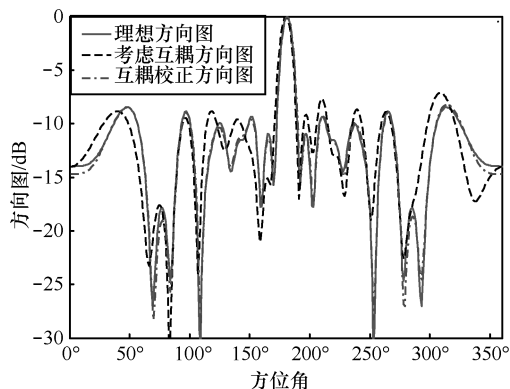


图6 互耦校正前后子阵 1 天线方向图

为了研究互耦对阵列天线方向图的影响以及验证互耦校正的有效性, 只考虑互耦对子阵 1 天线方向图影响, 令子阵 1 天线单元的激励值为 1。互耦校正前后子阵 1 天线方向图如图 6 所示。从图 6 中可以发现, 当考虑互耦时, 子阵 1 的天线方向图出现较大的波动, 方向图主瓣宽度由原先



的 22° 变为 24° ，峰值旁瓣电平由原先的 -8.46 dB 变为 -7.13 dB，方向图性能变差，说明互耦对阵列天线方向图产生了较大的影响，利用本文方法估计得到互耦矩阵，通过互耦矩阵估计值求逆的自校正方法得到的天线方向图与不考虑互耦时的方向图高度拟合，主瓣宽度与峰值旁瓣电平都与之相同。仿真实验结果表明了利用本文提出的方法对交错阵列天线互耦矩阵进行估计和校正是有效和可行的。

5 结束语

由于方位依赖的子阵内部单元与子阵间单元耦合效应的联合作用，交错稀疏阵列天线单元间的互耦依然会对阵列天线导向矢量及方向图产生较大的影响。采用扩展的非方阵互耦矩阵对稀疏交错阵列天线单元间的耦合效应进行建模，推导了增广互耦矩阵与方位依赖幅相误差的关系；通过互耦校正的辅助阵元及多次单源校正的方法，可以精确估计方位依赖幅相误差矩阵。利用 L-曲线法计算正则化参数值，再利用加速梯度下降算法对不适定方程进行求解，获得了精确的互耦矩阵估计值，通过得到的互耦矩阵进行互耦的自校正，能够很好地消除子阵内和子阵间单元耦合效应对子阵天线方向图的影响，实现了共享孔径稀疏交错阵列天线子阵内部和子阵间单元耦合效应的联合估计与校正。交错稀疏阵列天线是实现多功能阵列天线的有效途径，但子阵内和子阵间天线单元的联合耦合效应是制约其实用化的主要因素。本文所提的方法能有效抑制交错稀疏阵列天线的互耦效应，为下一步交错稀疏阵列天线方向图性能的优化研究提供了理论依据，为将来共享孔径交错稀疏阵列天线的推广应用奠定了坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] YE H C, LEOU M, UCCI D R. Bearing estimations with mutual coupling present[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(10): 1332-1335.
- [2] PERSSON P. Modeling conformal array antennas of various shapes using UTD[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2006, 21(3): 305-317.
- [3] 张佳佳, 陈辉, 李帅, 等. 双圈均匀圆阵互耦自校正方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 1539-1545.
ZHANG J J, CHEN H, LI S, et al. Self calibration for dual uniform circular array[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2017, 39(11): 1530-1545.
- [4] 刘松, 廖勇, 谢远举. 一种高效稳健的均匀圆阵互耦校正方法[J]. 电子学报, 2017, 45(12): 2170-2176.
LIU S, LIAO Y, XIE Y J. A high efficient and robust method for mutual coupling correction of uniform circular array [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(12): 2170-2176.
- [5] 司伟建, 吴迪, 陈涛, 等. 一种阵列互耦矩阵与波达方向的级联估计方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7): 1599-1604.
SI W J, WU D, CHEN T, et al. Cascade estimation method of mutual coupling matrix and direction of arrival[J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2014, 36(7): 1599-1604.
- [6] 王布宏, 王永良, 陈辉, 等. 方位依赖阵元幅相误差校正的辅助阵元法[J]. 中国科学: 技术科学, 2004, 34(8): 906-918.
WANG B H, WANG Y L, CHEN H, et al. Array calibration of angularly dependent gain and phase uncertainties with carry on instrumental sensors[J]. Science in China Series E, 2004, 34(8): 906-918.
- [7] HANSEN P C. Regularization tools: a MATLAB package for analysis and solution of discrete ill-posed problems[J]. Numerical Algorithms, 1994(6): 1-35.
- [8] HANSEN P C. Regularization tools version 4.0 for MATLAB 7.3[J]. Numerical Algorithms, 2007, 46(2): 189-194.
- [9] 高峰, 和凯, 宋智源, 等. 5G 大规模紧耦合阵列天线研究[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 36-41.
GAO F, HE K, SONG Z Y, et al. Research on large scale antenna arrays for 5G mobile communication technology [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 36-41.
- [10] 方箭, 朱颖, 郑娜, 等. 从 WRC-19 议题看 5G 与未来移动通信发展趋势[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 65-72.
FANG J, ZHU Y, ZHENG N, et al. A look at 5G and future mobile communication development trend from the point of WRC-19 agenda items [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 65-72.

[作者简介]



庄君明 (1984-), 男, 福建师范大学实验师, 主要研究方向为信息与通信工程、计算机应用。

李龙军 (1988-), 男, 中国人民解放军 94923 部队工程师, 主要研究方向为信息与通信工程。