

共形阵列天线互耦校正的辅助阵元法

王布宏¹, 侯青松¹, 郭 英¹, 王永良²

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077; 2. 空军雷达学院兵器运用工程军队重点实验室, 湖北武汉 430019)

摘 要: 针对共形天线载体曲率和单元方向图指向的变化, 建立了三维共形天线导向矢量的数学模型; 推导了阵列互耦与方位依赖幅相误差的等价关系; 通过引入少量远离共形载体的辅助阵元和方向未知的校正信源, 提出了共形阵列天线互耦校正的辅助阵元法。辅助阵元法只需要参数的一维搜索和线性方程组求解, 可以实现校正信源方位和共形天线互耦系数的联合估计。计算机 Monte-Carlo 仿真实验验证了辅助阵元法互耦校正的有效性。

关键词: 共形天线; 阵列校正; 互耦; 辅助阵元法

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 06-1283-06

Mutual Coupling Calibration for Conformal Array Antenna with Instrumental Sensors

WANG Bu-hong¹, HOU Qing-song¹, GUO Ying¹, WANG Yong-liang²

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: In view of the variable curvature radius of the platform and different orientations of elements, array manifold model for arbitrary 3D conformal array is established. The equivalence of the array mutual coupling and angularly dependent gain and phase uncertainties is developed. With the help of some carry-on instrumental sensors and some time-disjoint pilot sources in unknown directions, Instrumental Sensors Method (ISM) is proposed for the mutual coupling calibration of conformal array antenna. ISM is able to achieve a favorable mutual coupling auto-calibration just using a one-dimensional search and solution of linear system of equations, with no high-dimensional nonlinear search and convergence burden involved. Simulation results are provided to demonstrate the effectiveness and behavior of the proposed ISM.

Key words: conformal array antenna; array calibration; mutual coupling; instrumental sensors method

1 引言

共形阵列天线^[1]可以将有源电扫相控阵技术和多功能共形射频孔径技术结合为一体, 形成载体的“灵巧蒙皮”天线。但是, 由于天线单元之间和单元与载体之间的相互作用, 共形阵列天线互耦效应的分析和校正较之传统平面阵更加繁杂。阵列互耦及其它阵列误差的存在, 一直以来都是高分辨 DOA (Direction-Of-Arrival) 估计技术走向实用的一个瓶颈。

长期以来, 互耦的校正和补偿一般都是先对互耦进行电磁测量或通过低频矩量法 (MOM—Method Of Moments)、高频一致性绕射理论^[2] (UITD—Uniform Theory of Diffraction) 等电磁计算方法对互耦效应进行分析计算, 然后, 通过互耦的测量值或计算值来对随后的信号处理算法进行修正。但互耦的电磁测量值和计算值的精度往

往并不能满足实际的工程应用; 而且, 阵元互耦还会随环境和阵元电磁参数的变化而变化, 在实际工作中还要常常对互耦的测量值和计算值进行不断的修正。还有许多校正方法将互耦的校正转化为一个阵列参数的估计问题。参数类的阵列校正方法通常可以分为有源校正类^[3] (active calibration) 和自校正类^[4] (auto-calibration)。有源校正通过在空间设置方位精确已知的辅助信源来对阵列扰动参数进行离线 (off-line) 估计。该方法不需要对信源方位进行估计, 运算量相对自校正类方法要小, 但辅助信源精确方位信息的要求, 增加了准确校正的难度和复杂度。自校正类方法通常将空间信源的方位与阵列的误差参数 (如互耦、幅相和位置误差等) 根据某种优化准则 (如子空间准则、最大似然准则、子空间拟合准则等) 进行联合估计。自校正可以不需要方位已知的辅助信源, 而且可以在天线实际工作时在线 (on-line) 完成。

收稿日期: 2007-12-27; 修回日期: 2009-02-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60601016); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (No. 2006F14)

但由于误差参数与方位参数之间的耦合和某些病态的阵列结构(如均匀线阵),参数估计的唯一辨识性往往无法保证^[5].更为重要的是,参数联合估计对应的高维、多模非线性优化问题带来了庞大的运算量,参数估计的全局收敛性往往也无法保证.此外,为了改善自校正算法的缺点,还有一类自校正算法通过利用特殊的阵列结构(如均匀线阵^[6]、均匀圆阵^[7]等)及其对应互耦矩阵的特殊结构,来降低校正参数估计的维数,减少参数估计的运算量,但是,在共形天线中,由于天线单元与载体之间的相互作用,特殊的互耦矩阵结构通常已经满足了.

针对共形天线高分辨 DOA 估计中互耦校正的难题,本文提出了共形天线互耦校正的辅助阵元法.首先针对共形天线载体曲率和单元方向图指向的变化,建立了三维共形天线导向矢量的数学模型;然后推导了阵列互耦与方位依赖幅相误差的等价关系,建立了互耦系数、导向矢量元素以及互耦等价的方位依赖幅相误差之间的函数表达关系.借鉴我们前期工作中提出的方位依赖幅相误差校正的辅助阵元法^[8],在对校正信源方位和由互耦引入的方位依赖幅相误差进行有效估计的基础上,通过多次单源校正实验数据的整合和线性方程组的求解最终获得了互耦系数的有效估计.

2 共形阵列天线导向矢量的数学模型

对一任意几何结构的 N 元阵列,建立如图 1 所示的阵列坐标系,其中, θ 为空间信源的俯仰角, ϕ 为空间信源的方位角.空间信源的导向矢量 $a(\theta, \phi)$ 可由式(1)~(3)表示为:

$$a(\theta, \phi) = [g_1(\theta, \phi) \exp(j k_0 r_1 \cdot v), g_2(\theta, \phi) \exp(j k_0 r_2 \cdot v), \dots, g_N(\theta, \phi) \exp(j k_0 r_N \cdot v)]^T \quad (1)$$

$$v = [\sin(\theta) \cos(\phi), \sin(\theta) \sin(\phi), \cos(\theta)]^T \quad (2)$$

$$r_i = [x_i, y_i, z_i]^T \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3)$$

上式中 $g_i(\theta, \phi)$ 为第 i 个阵元在 (θ, ϕ) 处的单元方向图,“ $\cdot$ ”为矢量点积, r_i 为阵元 i 的坐标矢量, v 为信源空间方位矢量.当阵列存在互耦时,导向矢量 $\tilde{a}(\theta, \phi)$ 可以表示为 $\tilde{a}(\theta, \phi) = Za(\theta, \phi)$ (4)

其中,矩阵 Z 为复对称的互耦矩阵, $z_{ii} = 1$, $z_{im} = z_{mi}$.与传统的平面阵不同,对于共形天线的导向矢量 $a(\theta, \phi)$ 的建模,需要考虑的一个重要问题是由于载体曲率引起的单元方向图 $g_i(\theta, \phi)$ 的差异.

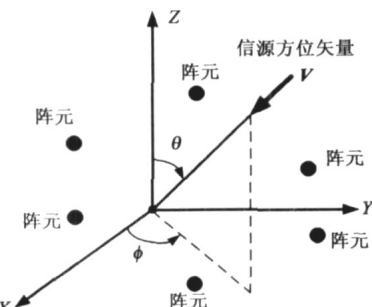


图1 三维阵列坐标系示意图

通常,共形天线阵元方向图的定义和设计均是以局部坐标系为参考的,因此,在共形天线导向矢量 $a(\theta, \phi)$ 的建模中我们首先需要完成由全局坐标系方位到各个阵元局部坐标系方位的旋转变换 $(\theta, \phi) \Rightarrow (\theta_i, \phi_i)$,从而完成单元方向图的全局旋转变换方法(详见文献[9])。

3 阵列互耦与方位依赖幅相误差的等价关系

阵列存在互耦时, $\tilde{a}(\theta, \phi)$ 可以表示为:

$$\tilde{a}(\theta, \phi) = Za(\theta, \phi) = \Gamma(\theta, \phi) a(\theta, \phi) \quad (5)$$

$$\Gamma(\theta, \phi) = \text{diag}([\Gamma_1 \Gamma_2 \dots \Gamma_N]) \quad (6)$$

$$\Gamma_i(\theta, \phi) = \sum_m \frac{a_m(\theta, \phi)}{a_i(\theta, \phi)} z_{mi} \quad (7)$$

其中对角阵 $\Gamma(\theta, \phi)$ 为互耦引入的、与互耦等价的方位依赖的阵元幅相误差矩阵,它的第 j 个对角元素对应第 j 个阵元的幅相误差, $a_i(\theta, \phi)$ 为导向矢量 $a(\theta, \phi)$ 的第 i 个元素, z_{mi} 是互耦矩阵 Z 第 m 行,第 i 列的元素.由式(7)可见,互耦引入的方位依赖的阵元幅相误差可以表示成阵列导向矢量元素 $a_i(\theta, \phi)$ 和阵列互耦系数 z_{mi} 的函数关系.由此,如果我们可以获得校正信源方位和由互耦引入的方位依赖的阵元幅相误差 $\Gamma(\theta, \phi)$ 的估计,根据第 2 节共形天线阵列流形 $a(\theta, \phi)$ 的数学模型,通过不同空间信源方位对应的式(7)构建相应的方程组,在满足自由度约束条件下,通过求解该方程组便可以获得互耦系数的估计,从而实现阵列互耦的校正.

4 共形天线互耦校正的辅助阵元法

通过引入少量精确校正的辅助阵元,我们前期工作中提出的方位依赖幅相误差校正的辅助阵元法^[8]可以在多源情况下对信源方位及其对应的阵元幅相误差进行无模糊联合估计.本小节,我们首先借鉴文献[8]中辅助阵元法的思想,通过引入远离共形阵列的辅助阵元(互耦效应可以忽略),来对校正信源的方位和由互耦引入的方位依赖的阵元幅相误差进行估计.

假设 N 元阵列由 K 个存在互耦的共形阵列单元和 $P = N - K$ 个远离共形阵列且各自相距较远的辅助阵元构成.由于距离较远, P 个辅助阵元之间和辅助阵元与共形阵列单元之间的互耦效应可以忽略不计.由此,互耦矩阵可以表示如下:

$$Z = \begin{bmatrix} I_P & 0_{P \times K} \\ 0_{K \times P} & \bar{Z}_{K \times K} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{Z}_{KK} = \begin{bmatrix} 1 & z_{P+1, P+2} & \dots & z_{P+1, N} \\ z_{P+1, P+2} & 1 & \dots & z_{P+2, N} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ z_{P+1, N} & z_{P+2, N} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将上式代入式(7)得到:

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 = \dots = \Gamma_p = 1 \quad (10)$$

则:

$$\hat{a}(\theta, \phi) = \Gamma(\theta, \phi) a(\theta, \phi) = T[a(\theta, \phi)] \Gamma(\theta, \phi) \quad (11)$$

$$T[a(\theta, \phi)] = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_p & \dots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & a_{p+1} & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & a_{p+2} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_N \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Gamma(\theta, \phi) = [1 \quad \Gamma_{p+1} \quad \Gamma_{p+2} \quad \dots \quad \Gamma_N]^T \quad (13)$$

式(11)建立的导向矢量扰动模型与文献[8]相同,由文献[8]中的自校正算法得:

$$[\hat{\theta}, \hat{\phi}] = \arg \max_{\theta, \phi} \frac{1}{\lambda_{\min}[\hat{C}(\theta, \phi)]} \quad (14)$$

$$\hat{r}(\theta, \phi) = e_{\min}[\hat{C}(\theta, \phi)] \quad \text{and} \quad e_{\min}(1) = 1 \quad (15)$$

$$\hat{C}(\theta, \phi) = T^H[a(\theta, \phi)] \hat{E}_N \hat{E}_N^H T[a(\theta, \phi)] \quad (16)$$

在由式(14,15)获得校正源方位和由互耦引入的方位依赖幅相误差的估计后,我们通过不同空间信源方位对应的式(7)构建相应的以互耦系数为参数的方程组,在满足自由度约束条件下,通过求解该方程组便可以求得互耦系数的估计,从而实现阵列互耦的校正。

5 算法实现的讨论

为了降低校正系统的复杂度,我们采用单源校正法,然后将 M 次单源校正的实验结果进行整合,通过求解方程组的方法来获得互耦系数的估计。整合方法由下式给出:

$$\bar{A} Z = B \quad (17)$$

$$\bar{A} = [\bar{A}_1^T \quad \bar{A}_2^T \quad \dots \quad \bar{A}_M^T]^T \quad (18)$$

$$\bar{A}_m = \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p}^N Q^{(p,q)}, m = 1, 2, \dots, M \quad (19)$$

$$Q^{(p,q)}_{i,j} = \begin{cases} a_q / a_p, & i = p, j = L \\ a_p / a_q, & i = q, j = L \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (20)$$

$$L = \frac{(2N - p - P)(p - P - 1)}{2} + (q - p) \quad (21)$$

$$\bar{Z} = [Z_{p+1, p+2} \dots Z_{p+1, N} \quad Z_{p+2, p+3} \dots Z_{p+2, N} \dots Z_{N-1, N}]^T \quad (22)$$

$$B = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_M]^T \quad (23)$$

$$b_i = [\Gamma_{i, p+1-1} \quad \Gamma_{i, p+2-1} \quad \dots \quad \Gamma_{iN-1}] \quad (24)$$

其中 $\bar{A}_i$ 为第 i 次单源实验对应的由阵列导向矢量元素构成的系数矩阵,其构成方式由(19)~(21)给出。 b_i 第 i 次单源实验获得的方位依赖的幅相误差估计。通过求解

(17) 对应的方程组,互耦系数的最小二乘解表达如下:

$$Z = (\bar{A}^H \bar{A})^{-1} \bar{A}^H B \quad (25)$$

需要强调的是,本文的校正方法同样适用于多源同时校正的情形。但随着空间信源数的增加,辅助阵元法所需的辅助阵元的个数要相应增加,这样增加了校正的复杂度和系统代价。从上述的讨论可知,本文的互耦校正方法可以实现校正信源方位和共形天线互耦矩阵的联合估计,而且运算量小,只需要参数的一维搜索和方程组求解,不存在通常阵列校正方法中参数联合优化估计时的多维搜索和局部收敛问题。

5.1 关于信源数的讨论

由于未知互耦系数的个数为 $C_K = K(K-1)/2$,而对于每个校正信源方位我们可以获得的幅相误差估计个数为 K ,即每次单源实验中,我们获得的方程组的个数为 K ,所以为了满足自由度的要求,求得方程矩阵方程组(17)的最小二乘解,单源校正实验的次数 M 或者多源校正实验时的空间信源数 M 应满足:

$$MK \geq K(K-1)/2 \quad M \geq (K-1)/2 \quad (26)$$

5.2 关于辅助阵元数的讨论

在待校正阵元数目 K 一定的前提下,辅助阵元法的实现需要满足秩损原理,则要求矩阵 $T[a(\theta, \phi)]$ 的秩小于等于阵列协方差矩阵噪声子空间的维数:

$$K+1 = \text{Rank}(T[a(\theta, \phi)]) \leq \text{Rank}(E_N E_N^H) = N - M = P + K - M \quad (27)$$

由此,辅助阵元的个数 P 应大于等于空间校正信源的个数 M :

$$P \geq M + 1 \quad (28)$$

所以为了减小系统代价和辅助阵元的个数,最好使用单源校正方法,此时需要的辅助阵元的个数只需大于等于 2。

5.3 关于辅助阵元位置的讨论

辅助阵元位置的选取可能会引起互耦条件下阵列流形的模糊,导致校正源位置 (θ, ϕ) 估计的模糊,从而产生错误的互耦校正结果。大量的仿真实验表明,通常情况下,随机选取辅助阵元的位置,而不要使辅助阵元与待校正阵元构成几何对称的阵列结构,便可以有效避免定位估计的模糊。具体的流形模糊理论分析和讨论将在随后的论文中详细报道。在具体的校正实验前,阵列的结构是否存在模糊可以事先通过仿真验证。同时,我们建议使用单源校正法,这样仅需要考虑阵列流形的秩-1 模糊,避免了复杂的阵列流形高阶秩模糊的讨论。

6 仿真试验

仿真实验采用 $N = 8$ 元柱面共形天线,不失一般性,单元方向图假设为 $(\cos \theta)^p$, ($p = 2$)。阵列坐标结构

如图 2 所示. 其中, $\theta_0 = 30^\circ$, 阵元间距为 $0.5\lambda_0$. 仿真实验中, 假设辅助阵元为全向天线, 且为了尽可能减小系统代价, 我们采用单源实验, 辅助阵元的个数 $P = 3$. 不失一般性, 我们固定校正信源的俯仰角(假设为 90°), 仅考虑校正信源的方位角.

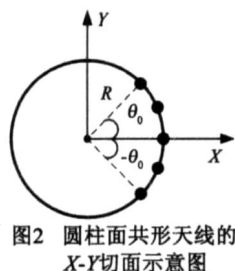


图2 圆柱面共形天线的 X-Y 切面示意图

实验 1 辅助阵元的设置与模糊角度估计.

当辅助阵元的位置与共形阵列成几何对称时, 单源校正实验中的方位估计会出现模糊估计. 假设 3 个辅助阵元的设置均位于 x 轴, 与原共形阵列构成了几何对称关系, 如图 3 所示. 任选校正源方位为 3° , 辅助阵元法方位估计的空间谱如图 4 所示. 由于我们已知单源校正, 我们将在 3° 和 -3° 之间产生模糊. 构成方位模糊估计的根本原因是单源情况下, 阵列的秩-1 模糊:

$$\Gamma_1 a(\theta_1, \phi_1) = k \cdot \Gamma_2 a(\theta_2, \phi_2) \quad (32)$$

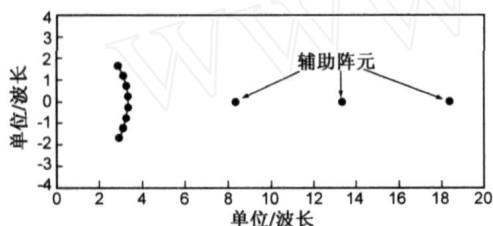


图3 几何对称阵列结构示意图

当我们选择了错误的方位估计时, 每次的单源实验并不保证都能获得真实的幅相误差估计, 最终会导致辅助阵元法错误的互耦估计. 而且, 图 4 的空间谱中, 在其它方位还出现了极值 $[-37^\circ, 37^\circ]$, 在低信噪比的条件下, 噪声的影响也会给校正信源的方位估计带来错误. 大量的仿真实验表明, 在实际的应用中, 当我们任意选择辅助阵元的位置, 避免几何对称的阵列结构便可有效避免方位的模糊估计. 如任选校正源方位为 3° , 选择如图 5 所示的阵列结构设置, 辅助阵元法方位估计的空间谱如图 6 所示. 从空间谱图可以看出, 我们在校正信源处获得了唯一的空间谱峰, 保证了多次单源实验后获得

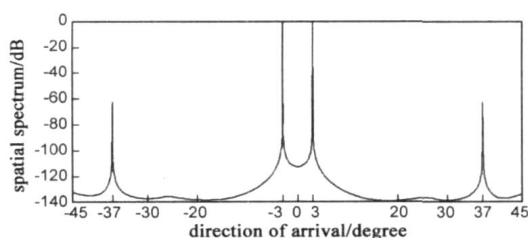


图4 几何对称阵列结构对应空间谱估计示意图

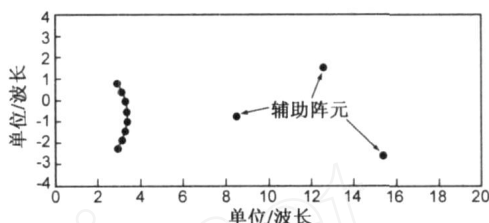


图5 非几何对称阵列结构示意图

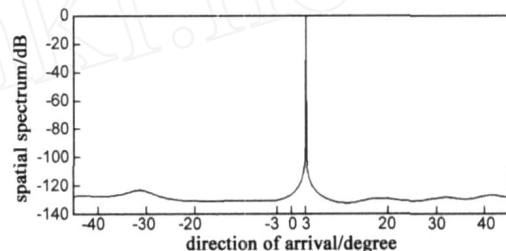


图6 非几何对称阵列结构对应空间谱估计示意图

正确的阵列互耦估计.

实验 2 辅助阵元法的互耦校正性能.

辅助阵元与原共形阵的相对位置任意设置如图 5 所示. 我们采用 $M = 6$ 次单源实验来获得互耦系数的估计. 不同信噪比条件下, 1000 次快拍数据估计阵列协方差矩阵, 500 次 Monte-Carlo 统计实验结果如下表 1 所示. 当信噪比固定为 30dB 时, 不同快拍数条件下, 500 次 Monte-Carlo 统计实验结果如下表 2 所示. 从上述的计算机 Monte-Carlo 统计实验结果可以看出, 在较高的信噪比 (20dB ~ 30dB) 和较多快拍数 (5000 快拍以上) 的校正实验条件下, 我们可以获得了满意的互耦校正结果. 事实上, 对于离线的阵列校正来讲, 我们可以通过提高校正信源的功率来获得较高的信噪比, 通过增加快拍数据的积累时间来增加快拍数.

表 1 不同信噪比条件下辅助阵元法互耦系数估计统计结果

互耦系数	真值	10dB	20dB	30dB
$z_{4,5}$	$0.3104 + 0.7733i$	$0.3109 + 0.7731i$	$0.3104 + 0.7735i$	$0.3105 + 0.7733i$
$z_{4,6}$	$0.3974 + 0.6187i$	$0.3986 + 0.6230i$	$0.3973 + 0.6166i$	$0.3970 + 0.6200i$
$z_{4,7}$	$0.0729 + 0.7158i$	$0.0665 + 0.7033i$	$0.0723 + 0.7243i$	$0.0745 + 0.7116i$
$z_{4,8}$	$0.6580 + 0.2889i$	$0.6645 + 0.3133i$	$0.6690 + 0.2765i$	$0.6522 + 0.2941i$
$z_{4,9}$	$0.5012 + 0.3727i$	$0.5151 + 0.3450i$	$0.4847 + 0.3675i$	$0.5091 + 0.3746i$
$z_{4,10}$	$0.4576 + 0.0503i$	$0.4359 + 0.0458i$	$0.4543 + 0.0590i$	$0.4583 + 0.0455i$
$z_{4,11}$	$0.4102 + 0.1495i$	$0.4072 + 0.1554i$	$0.4115 + 0.1512i$	$0.4091 + 0.1489i$
$z_{5,6}$	$0.3253 + 0.7672i$	$0.3190 + 0.7653i$	$0.3279 + 0.7695i$	$0.3244 + 0.7655i$
$z_{5,7}$	$0.3518 + 0.7539i$	$0.3881 + 0.7621i$	$0.3361 + 0.7348i$	$0.3573 + 0.7644i$

表 1 续

互耦系数	真值	10dB	20dB	30dB
$z_{5,8}$	0.4880 + 0.6565i	0.4111 + 0.6113i	0.4906 + 0.7167i	0.4889 + 0.6288i
$z_{5,9}$	0.6589 + 0.0201i	0.6858 + 0.1359i	0.7227 - 0.0145i	0.6302 + 0.0373i
$z_{5,10}$	0.1003 + 0.4913i	0.1757 + 0.4516i	0.0791 + 0.4518i	0.1136 + 0.5081i
$z_{5,11}$	0.3919 + 0.2897i	0.3850 + 0.2651i	0.3803 + 0.2904i	0.3973 + 0.2875i
$z_{6,7}$	0.3286 + 0.7658i	0.3037 + 0.7708i	0.3439 + 0.7758i	0.3222 + 0.7607i
$z_{6,8}$	0.2351 + 0.7630i	0.3468 + 0.7874i	0.2069 + 0.6893i	0.2461 + 0.7968i
$z_{6,9}$	0.6527 + 0.4367i	0.5709 + 0.2713i	0.5711 + 0.5286i	0.6879 + 0.3944i
$z_{6,10}$	0.3407 + 0.1636i	0.2313 + 0.2519i	0.4100 + 0.2203i	0.3068 + 0.1425i
$z_{6,11}$	0.2616 + 0.1726i	0.2815 + 0.2111i	0.2841 + 0.1595i	0.2530 + 0.1806i
$z_{7,8}$	0.5074 + 0.6611i	0.4615 + 0.6431i	0.5151 + 0.6946i	0.5046 + 0.6460i
$z_{7,9}$	0.4175 + 0.4799i	0.4470 + 0.6122i	0.4903 + 0.4147i	0.3870 + 0.5088i
$z_{7,10}$	0.4197 + 0.4289i	0.5374 + 0.3830i	0.3532 + 0.3651i	0.4498 + 0.4534i
$z_{7,11}$	0.1390 + 0.5323i	0.1342 + 0.4900i	0.1112 + 0.5469i	0.1497 + 0.5248i
$z_{8,9}$	0.5945 + 0.5840i	0.6113 + 0.5517i	0.5668 + 0.5885i	0.6057 + 0.5817i
$z_{8,10}$	0.7517 + 0.1560i	0.6961 + 0.1309i	0.7637 + 0.2022i	0.7463 + 0.1377i
$z_{8,11}$	0.0552 + 0.6460i	0.0372 + 0.6648i	0.0759 + 0.6470i	0.0470 + 0.6458i
$z_{9,10}$	0.8332 + 0.0139i	0.8318 + 0.0251i	0.8393 + 0.0076i	0.8307 + 0.0163i
$z_{9,11}$	0.5755 + 0.2592i	0.5834 + 0.2634i	0.5719 + 0.2532i	0.5767 + 0.2614i
$z_{10,11}$	0.7192 + 0.4209i	0.7199 + 0.4198i	0.7186 + 0.4215i	0.7194 + 0.4207i

表 2 不同快拍数条件下辅助阵元法互耦系数估计统计结果

互耦系数	真值	500 快拍	5000 快拍	10000 快拍
$z_{4,5}$	0.3104 + 0.7733i	0.3109 + 0.7727i	0.3106 + 0.7733i	0.3104 + 0.7734i
$z_{4,6}$	0.3974 + 0.6187i	0.3927 + 0.6272i	0.3962 + 0.6200i	0.3982 + 0.6189i
$z_{4,7}$	0.0729 + 0.7158i	0.0926 + 0.6870i	0.0767 + 0.7122i	0.0698 + 0.7150i
$z_{4,8}$	0.6580 + 0.2889i	0.6000 + 0.3143i	0.6495 + 0.2904i	0.6620 + 0.2927i
$z_{4,9}$	0.5012 + 0.3727i	0.5552 + 0.4106i	0.5066 + 0.3790i	0.5020 + 0.3674i
$z_{4,10}$	0.4576 + 0.0503i	0.4763 + 0.0170i	0.4605 + 0.0470i	0.4548 + 0.0505i
$z_{4,11}$	0.4102 + 0.1495i	0.4036 + 0.1425i	0.4097 + 0.1488i	0.4102 + 0.1502i
$z_{5,6}$	0.3253 + 0.7672i	0.3211 + 0.7532i	0.3250 + 0.7648i	0.3242 + 0.7680i
$z_{5,7}$	0.3518 + 0.7539i	0.3712 + 0.8456i	0.3513 + 0.7681i	0.3587 + 0.7494i
$z_{5,8}$	0.4880 + 0.6565i	0.5675 + 0.4508i	0.5062 + 0.6313i	0.4691 + 0.6569i
$z_{5,9}$	0.6589 + 0.0201i	0.3976 + 0.0631i	0.6241 + 0.0166i	0.6711 + 0.0380i
$z_{5,10}$	0.1003 + 0.4913i	0.1436 + 0.6523i	0.1000 + 0.5119i	0.1096 + 0.4825i
$z_{5,11}$	0.3919 + 0.2897i	0.4363 + 0.2914i	0.3967 + 0.2914i	0.3903 + 0.2870i
$z_{6,7}$	0.3286 + 0.7658i	0.2942 + 0.7106i	0.3259 + 0.7563i	0.3252 + 0.7704i
$z_{6,8}$	0.2351 + 0.7630i	0.2237 + 1.0400i	0.2231 + 0.8014i	0.2575 + 0.7550i
$z_{6,9}$	0.6527 + 0.4367i	1.0295 + 0.2391i	0.7107 + 0.4244i	0.6252 + 0.4143i
$z_{6,10}$	0.3407 + 0.1636i	0.1742 - 0.0935i	0.3297 + 0.1237i	0.3276 + 0.1843i
$z_{6,11}$	0.2616 + 0.1726i	0.1758 + 0.1959i	0.2498 + 0.1716i	0.2661 + 0.1776i
$z_{7,8}$	0.5074 + 0.6611i	0.5286 + 0.5464i	0.5147 + 0.6454i	0.4975 + 0.6629i
$z_{7,9}$	0.4175 + 0.4799i	0.1156 + 0.5848i	0.3701 + 0.4823i	0.4351 + 0.5005i
$z_{7,10}$	0.4197 + 0.4289i	0.5383 + 0.6971i	0.4246 + 0.4723i	0.4369 + 0.4114i
$z_{7,11}$	0.1390 + 0.5323i	0.2360 + 0.5228i	0.1531 + 0.5354i	0.1353 + 0.5251i
$z_{8,9}$	0.5945 + 0.5840i	0.6773 + 0.6079i	0.6061 + 0.5916i	0.5940 + 0.5765i
$z_{8,10}$	0.7517 + 0.1560i	0.7813 + 0.0170i	0.7624 + 0.1357i	0.7392 + 0.1576i
$z_{8,11}$	0.0552 + 0.6460i	0.0034 + 0.6150i	0.0482 + 0.6390i	0.0540 + 0.6513i
$z_{9,10}$	0.8332 + 0.0139i	0.8091 + 0.0208i	0.8290 + 0.0143i	0.8345 + 0.0159i
$z_{9,11}$	0.5755 + 0.2592i	0.5744 + 0.2779i	0.5746 + 0.2625i	0.5772 + 0.2587i
$z_{10,11}$	0.7192 + 0.4209i	0.7210 + 0.4209i	0.7197 + 0.4211i	0.7192 + 0.4207i

7 结束语

论文针对共形天线载体曲率和单元方向图指向的变化,建立了三维共形天线导向矢量的数学模型;推导了阵列互耦与方位依赖幅相误差的等价关系;通过引入少量远离共形载体的辅助阵元和方向未知的校正信源,提出了共形天线互耦校正的辅助阵元法。辅助阵元法只需要参数的一维搜索和线性方程组求解,可以实现校正信源方位和共形天线互耦系数的联合估计,克服了现有大多数有源校正和自校正方法的缺点。而且计算机 Monte-Carlo 仿真实验表明,在较高的信噪比(20dB~30dB)和较多快拍数(5000 快拍以上)的校正实验条件下,我们可以获得较高的互耦校正精度。

参考文献:

- [1] L Josefsson, P Persson. Conformal Array Antenna Theory and Design[M]. Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2006.
- [2] P Persson. Modeling conformal array antennas of various shapes using UTD[J]. ACES Journal, Special Issue on Computation and Modeling Techniques for Phased Array Antennas, 2006, 21(3): 305 - 317.
- [3] Manikas A, Fistas N. Modeling and estimation of mutual coupling between array elements[A]. Proceedings of the ICASSP-94[C]. Adelaide, Australia: IEEE, 1994. 553 - 556.
- [4] Friedlander B, Weiss A J. Direction finding in the presence of mutual coupling[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1991, 39(3): 273 - 284.
- [5] Hung E. A critical study of a self-calibration direction-finding method for arrays[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1994, 42(2): 471 - 474.
- [6] 王布宏, 王永良, 陈辉. 均匀线阵互耦条件下的鲁棒 DOA 估计及互耦自校正[J]. 中国科学 E 辑, 2004, 34(2): 229 - 240.
Wang Buhong, Wang Yongliang, Chen Hui. Robust DOA esti-

mation and array calibration in the presence of mutual coupling for uniform linear array[J]. Science in China Ser E, 2004, 34(2): 229 - 240. (in Chinese)

- [7] Guo Ying, Wang Buhong. Robust direction finding for uniform circular array with mutual coupling[A]. Proceedings of 2005 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting[C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2005. 362 - 365.
- [8] 王布宏, 王永良, 陈辉, 郭英. 方位依赖阵元幅相误差校正的辅助阵元法[J]. 中国科学, E 辑, 2004, 34(8): 906 - 918.
Wang Buhong, Wang Yongliang, Chen Hui, et al. Array calibration of angularly dependent gain and phase uncertainties with carry-on instrumental sensors[J]. Science in China Ser E Information Sciences, 2004, 34(8): 906 - 918. (in Chinese)
- [9] 王布宏, 郭英, 王永良, 齐子森. 共形天线阵列流形的建模方法[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 481 - 484.
Wang Buhong, Wang Yongliang, Guo Ying. Array manifold modeling for conformal array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, Mar, 2009, 37(3): 481 - 484. (in Chinese)

作者简介:

王布宏 男, 1975 年生于山西太原, 副教授, 博士(后), 已发表论文 40 多篇, 其中进入 SCI、EI 等三大索引的论文 30 多篇。主要研究领域为: 阵列信号处理、阵列校正等。

E-mail: wbhcx@yahoo.com.cn

侯青松 男, 1981 年生于四川营山, 空军工程大学电讯工程学院博士研究生。主要研究领域为: 阵列信号处理。

E-mail: cnhqx@vip.163.com

郭英 女, 1961 年生于山西临汾, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为: 通信信号处理、自适应信号处理等。

E-mail: Guoying_dsp@sina.com

王永良 男, 1965 年生于浙江嘉兴, 教授, 博士生导师。已发表论文 200 多篇, 其中进入 SCI、EI 等三大索引的论文 90 多篇。主要研究领域为: 雷达技术、阵列信号处理、自适应信号处理等。

E-mail: wylqcf@public.wh.hb.cn