

考虑互耦修正的机会阵雷达波束方向图综合优化

龚树凤^{*①} 贲德^{①②} 潘明海^① 龙伟军^{①②}

^①(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

^②(南京电子技术研究所 南京 210038)

摘要: 机会阵雷达大量天线单元在空间随机分布,波束方向图综合时考虑阵元间的互耦影响十分必要。该文基于子阵思想,提出交叉划分子阵,利用子阵的互阻抗矩阵构建任意阵的互阻抗矩阵,并结合自适应算法实现了互耦情况下的机会阵雷达的波束综合优化。该方法利用矩量法计算子阵的广义互阻抗矩阵,应用最大输出信噪比准则,在方向图区域施加干扰信号自适应地调整阵因子,综合了非均匀偶极子线阵和面阵,结果与 FEKO 软件仿真结果吻合良好。

关键词: 雷达; 阵列天线; 波束方向图综合; 自适应算法; 互耦; 子阵

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)03-0516-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00108

Beam Pattern Synthesis Optimization for Opportunistic Array Radar with Mutual Coupling

Gong Shu-feng^① Ben De^{①②} Pan Ming-hai^① Long Wei-jun^{①②}

^①(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

^②(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210038, China)

Abstract: It is necessary to take mutual coupling of arrays into account in the research of array pattern synthesis for Opportunistic Array Radar (OAR) with a large number of antenna elements randomly distributed in the space. Active element patterns of a large array are constructed from those of a small array. In this paper, based on the idea of the sub-array, the large array is divided into across some sub-arrays, which can include the same elements. Building the mutual impedance matrix of large arbitrary array with the mutual impedance matrix of the sub-array and combining with adaptive algorithm to realize the beam pattern synthesis optimization for OAR. The method of moment is used to calculate the generalized mutual impedance matrix of sub-arrays in this method. Last, based on maxim output signal-to-noise rate criteria, adding imaginary jammers into angle domain to adaptively change weights of the array factors for synthesizing patterns. An uniform linear array and a plane array are synthesized with the method. Calculated results agree with that with FEKO Software Simulation.

Key words: Radar; Antenna array; Beam pattern synthesis; Adaptive algorithm; Mutual coupling; Sub-array

1 引言

机会阵雷达^[1-3]是国外学者近年来针对新一代海军隐身驱逐舰DD(X)提出的一种新概念雷达。机会阵雷达以平台隐身性为设计核心,以数字阵列雷达为基础,单元与数字收发组件被任意布置于舰船的各个开放空间。机会阵雷达“机会性”地选择工作单元、工作方式及战术功能等,考虑到大量天线单元的任意随机分布,机会阵雷达波束的综合与优

化一直是国内外学者关注的重要课题^[1-6]。尤其当阵元间距较小时,天线单元间的互耦将严重影响阵列的性能。由于更小的波束综合误差意味着更少的设计风险和成本浪费,因此,寻找一种简捷而精确的考虑互耦的机会阵波束综合与优化方法尤为重要。

近些年来,许多学者研究了互耦影响下的阵列天线波束综合。文献[7-9]从不同侧面分析了互耦在阵列处理中的影响及其补偿方法。其中,文献[7]从网络理论出发,提出了一个可用于分析互耦影响的模型,该模型通过一个归一化阻抗矩阵建立了理想接收信号与实际接收信号的内在关系,进而提出一

2013-01-22 收到, 2013-12-03 改回

国家自然科学基金(61071164, 61271327)和江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助课题

*通信作者: 龚树凤 suffy_nuaa@163.com

种方向矢量校正的互耦补偿方法，后续很多研究工作都在此模型上展开。文献[10,11]结合自适应天线理论，基于归一化阻抗矩阵模型，利用矩量法计算互阻抗矩阵，对天线方向图进行互耦补偿，得到了较好性能的方向图。但阵元数目较多时，当前PC计算阵元间的广义互阻抗矩阵耗费大量时间和内存，有时甚至陷入瘫痪导致无法进一步计算阵列的互阻抗矩阵。进而有一些学者，将子阵方法广泛应用于大型阵列的分析和综合问题^[12-16]。Collins等人^[12]提出运用矩量法提取一个小型阵列天线中各单元的表面电流，并用其来等效更大规模的阵列中相似阵列环境下的单元的表面电流，进而计算该大型阵列的散射场，在有效减小计算量的情况下获得了较高的精度。不同于以上提取电流的方法，Karimkashi等人^[13]提出利用小型阵列天线的阻抗矩阵来外推构建大型阵列的阻抗矩阵，进而近似考虑互耦效应，计算大型阵列的辐射场，综合结果和实测结果吻合良好。文献[14-16]利用有源单元方向图并结合子阵思想，利用叠加定理计算了大型阵的总辐射场。然而，这些子阵外推的算法大都适用于阵元分布较均匀有序的周期结构性阵列，对于阵列单元任意分布的随机阵，由于每个单元所处的阵列环境不相似，子阵外推方法将难以适用。

考虑到归一化阻抗模型的互耦修正法和子阵外推方法在机会阵方向图综合应用中的局限性，本文基于自适应理论和子阵思想，提出了一种考虑互耦进行机会阵方向图综合的方法：首先将要计算的机会阵阵列交叉划分成多个子阵，利用矩量法分别计算每个子阵的广义互阻抗矩阵，然后构建整个任意阵列的互阻抗矩阵；再结合自适应理论，基于最大输出信噪比准则，通过在方向图覆盖区域施加干扰信号，调整干扰的功率值而自适应地改变阵因子，从而实现对机会阵雷达波束的综合与优化。文中运用该方法设计仿真了12阵元的任意直线阵和平面阵的波束综合，并与FEKO软件仿真的结果吻合良好，表明了该算法的可行性。

2 互耦情况下的阵列模型

图1是一个含有 N 个阵元的线阵，假设第 n 个阵元到第 $n+1$ 个阵元的距离为 d_n 。有一个信号从远处入射，其入射角为 θ ， θ 是信号入射方向与阵列主轴线方向的夹角。为了计入阵元间互耦的影响，可将该天线阵等效成响应于外部源的 $N+1$ 个端口的线性双向网络^[7]。根据该网络可求得阵列的输出电压矢量为

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{X}_0 \quad (1)$$

式中，上标“ -1 ”表示矩阵求逆； \mathbf{X}_0 是入射信号的电压矢量(网络端口的开路电压矢量)， \mathbf{Z} 是经端接在各网络端口的负载阻抗 Z_L 归一化了的阻抗矩阵。

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{11}}{Z_L} & \frac{Z_{12}}{Z_L} & \dots & \frac{Z_{1N}}{Z_L} \\ \frac{Z_{21}}{Z_L} & 1 + \frac{Z_{22}}{Z_L} & \dots & \frac{Z_{2N}}{Z_L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Z_{N1}}{Z_L} & \frac{Z_{N2}}{Z_L} & \dots & 1 + \frac{Z_{NN}}{Z_L} \end{bmatrix}$$

式中 $Z_{nl}(n, l = 1, 2, \dots, N)$ 表示阵元间的互阻抗和自阻抗。假设入射信号的振幅为 A ，频率为 ω_0 ，波长为 λ ，初相为 ψ ，则接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{X}_0(t) = A e^{j(\omega_0 t + \psi)} \mathbf{U} \quad (2)$$

\mathbf{U} 是仅与信号入射方向有关的矢量， $\mathbf{U} = [1, e^{j\psi_2(\theta)}, e^{j\psi_3(\theta)}, \dots, e^{j\psi_N(\theta)}]^T$ ，其中

$$\psi_n(\theta) = 2\pi \left(\sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda} \right) \sin(\theta) \quad (3)$$

表示由阵元的空间分布引起的波程相位差。因此阵列的输出信号为

$$y(t) = \mathbf{W}^T \mathbf{X}(t) = A e^{j(\omega_0 t + \psi)} \mathbf{W}^T \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{U} \quad (4)$$

其中 \mathbf{W} 为调节激励幅度和相位的权矢量， $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 。由此定义阵列的方向图为

$$p(\theta) = |\mathbf{W}^T \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{U}| \quad (5)$$

根据自适应天线理论，通过增加干扰信号自动调整权矢量来控制方向图，同时考虑互耦和通道噪声的影响，实际接收到的电压为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_0(t) + \mathbf{X}_f + \mathbf{X}_n \quad (6)$$

采用最大信噪比准则评判，可以得到互耦补偿的最佳权矢量为

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_u^{-1} \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{U}_d \quad (7)$$

式中 \mathbf{R}_u 表示不需要信号(即干扰和噪声)的协方差矩阵， \mathbf{U}_d 表示有用信号入射方向的导向矢量。

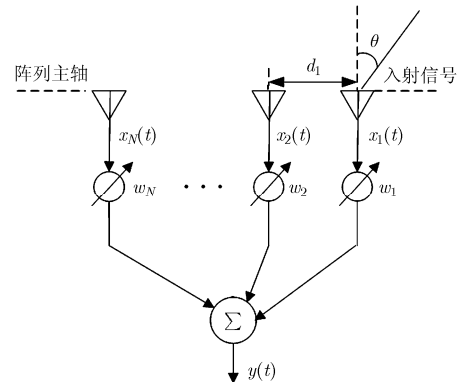


图1 N 元天线阵

3 机会阵雷达波束综合与优化

文献[17]和文献[18]的研究表明,对于阵列中的指定单元,只有其临近的几个单元会对其波束产生影响,而离其较远的单元影响比较小可以忽略。因此,在考虑互耦情况下的机会阵阵列天线波束综合时,可以将其划分为多个交叉的子阵,采用矩量法分别计算子阵的互阻抗矩阵,并用多个子阵的互阻抗矩阵交叉等效构建大型任意阵列的互阻抗矩阵,再将其代入式(7)进行互耦补偿,从而得到机会阵阵列天线的方向图。

表 1 12 元线阵位置表(λ)

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
位置	0	0.320	1.165	1.882	2.604	3.315	4.019	4.730	5.452	6.169	7.014	7.332

如果对任意的平面阵列进行波束综合,则划分子阵时,以 x 轴向, y 轴向的固定距离对其进行划分,此时子阵为一正方形内的面阵,交叉子阵为一长方形内的面阵。类似地,如果对任意的 3 维阵列进行波束综合,划分的每个子阵则被立方体所包含,交叉子阵被长方体所包含。

步骤 2 计算子阵的互阻抗矩阵,并构建机会阵列的互阻抗矩阵。根据所划分的子阵,计算各子阵的互阻抗矩阵,并将其填入总的阻抗矩阵中。首先计算子阵 1 的归一化互阻抗矩阵 Z_1 ,并将其阵元间的互阻抗值填入到总的阻抗矩阵中对应的位置。再计算子阵 2 的归一化互阻抗矩阵 Z_2 ,并将其阵元间的互阻抗值填入到总的阻抗矩阵中对应的位置,交叉阵元间的互阻抗值可用子阵 2 的互阻抗值表示,由此构建成总的阻抗矩阵。矩阵中空白处置值为 0,表示完全忽略互耦的影响。表 2 给出了总的归一化阻抗矩阵中的部分阵元 1~9 的互阻抗表示。

表 2 总的归一化互阻抗矩阵的部分表示

阵元	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1
2	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1
3	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1
4	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1
5	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2
6	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2
7	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2
8	Z_1	Z_1	Z_1	Z_1	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2
9					Z_2	Z_2	Z_2	Z_2	Z_2

基于本文所提的方法,机会阵雷达波束综合的具体步骤如下,以非均匀的 12 元线阵为例,阵元位置如表 1 所示。

步骤 1 交叉划分子阵。12 元非均匀线阵的阵元位置如表 1 所述,考虑到单元间距大于 5λ 时,其间的互耦影响较弱,在此以 5λ 为间距对阵列进行划分, 2.5λ 间距为子阵的交叉距离。因此,可以将 12 元线阵划分为 2 个子阵,子阵 1 的阵元为 1,2,3,4,5,6,7,8,子阵 2 包含的阵元有 5,6,7,8,9,10,11 和 12,交叉阵元为 5,6,7,8。

步骤 3 自适应波束综合与优化。基于阵列信号处理基础,采用自适应阵最优化准则中的最大信干噪比准则,设主瓣方向为 θ_d ,在副瓣区域人为施加干扰信号,使其主、副瓣达到设计要求。波束综合与优化方法描述如下:

(1) 计算主瓣宽度 (θ_L, θ_R) ,并选取副瓣参考电压,即副瓣期望电平。如要求副瓣在 θ 方向上比主瓣的峰值低 $D(\theta)$ dB,则相应 θ 处的期望电压值为 $d(\theta) = P_{\max}/10^{D(\theta)/20}$ 。设置干扰功率的初始值 $f_0(\theta_{f_i})$ 为 1,入射角度 $\theta_{f_i} (i = 1, 2, \dots, Q)$ 为方向图覆盖旁瓣区域内的一系列等间隔角度值;

(2) 根据干扰功率迭代公式,计算第 k 次的干扰值。考虑到算法的稳健性,采用改进后的干扰功率迭代公式为^[9]

$$f_i(k+1) = \begin{cases} 0, & \theta_{f_i} \in (\theta_L, \theta_R) \\ \max \left\{ 0, f_i(k) \left[1 + K \frac{K_O \cdot p(\theta_{f_i}, k) - d(\theta_{f_i}, k)}{d(\theta_{f_i}, k)} \right] \right\}, & \theta_{f_i} \notin (\theta_L, \theta_R) \end{cases} \quad (8)$$

(3) 计算无用信号的协方差矩阵

$$\mathbf{R}_u = \mathbf{R}_f + \mathbf{R}_n = \mathbf{V}_f^* \mathbf{F} \mathbf{V}_f^T + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{F} = \text{diag}[f_1, f_2, \dots, f_Q]$, $\mathbf{V}_f = [\mathbf{v}_{f1}, \mathbf{v}_{f2}, \dots, \mathbf{v}_{fQ}]$, \mathbf{v}_{f_i} 为干扰信号与其入射方向有关的矢量, σ_n^2 为噪声的方差;

(4) 利用最大信干噪比准则,引入归一化互阻抗矩阵,按式(7)计算最优权矢量 \mathbf{W} 并进行相应的方向图综合,如果满足要求,则停止;否则转(2)继续。

4 仿真与验证

4.1 方法验证

下面采用 3 个仿真实例来验证算法的正确性，以及研究划分多大范围的子阵可以获得理想的精度。阵列单元均选为半波偶极子天线，均为各向同性阵元且等幅同相激励，幅度均为 1，相位为 0，频率 300 MHz，阵子半径为 $\lambda/200$ ，采用 Matlab 软件编程，分别仿真了前述的 12 元非均匀线阵、阵元间距为 0.5λ 的 17 元均匀线阵以及阵元任意分布的 61 元面阵的波束综合，并与电磁仿真软件 FEKO 仿真结果进行了比较。

图 2(a)和图 3(a)是以 5λ 为距离划分子阵列，交叉距离为 2.5λ 来计算阵列方向图的结果。在主瓣及附近旁瓣区域，计算结果与 FEKO 仿真结果吻合较好，但随着角度偏离法向，较远的旁瓣区域结果误差较大，幅值和波形都与仿真结果有偏差。为了获取较高的精度，将子阵的划分距离调整为 7λ ，交叉子阵距离选为 3.5λ ，如图 2(b)和图 3(b)所示，在整

个区域内，计算结果与 FEKO 仿真结果吻合良好，精度有所提高。同时，图 2(b)和图 3(b)提供了方向图乘法计算的结果，对于非均匀阵而言，主瓣区域比仿真结果变窄，旁瓣区域幅值整体高出仿真结果且波形吻合较差；对于均匀线阵而言，在第 3 旁瓣区域以外，方向图乘法所得方向图不论是波形还是幅值，都与仿真结果相差较多。因而，在大型阵列的方向图计算中，本文方法相对经典的方向图乘法更具价值，尤其是对任意阵列的方向图综合意义重大。

图 4 为 61 元任意面阵的分布图，以 5λ 距离进行子阵划分，可以划分成 4 个子阵，划分结果如图 5 所示。图 6 为任意面阵的方向图计算结果与 FEKO 仿真结果的对比图。图 6(a)以 5λ 距离划分子阵，子阵的交叉距离为 2.5λ ；图 6(b)以 7λ 距离划分子阵，子阵的交叉距离为 3.5λ ，计算面阵方向图，对比可以发现， 7λ 距离的划分计算结果与 FEKO 仿真结果较吻合。

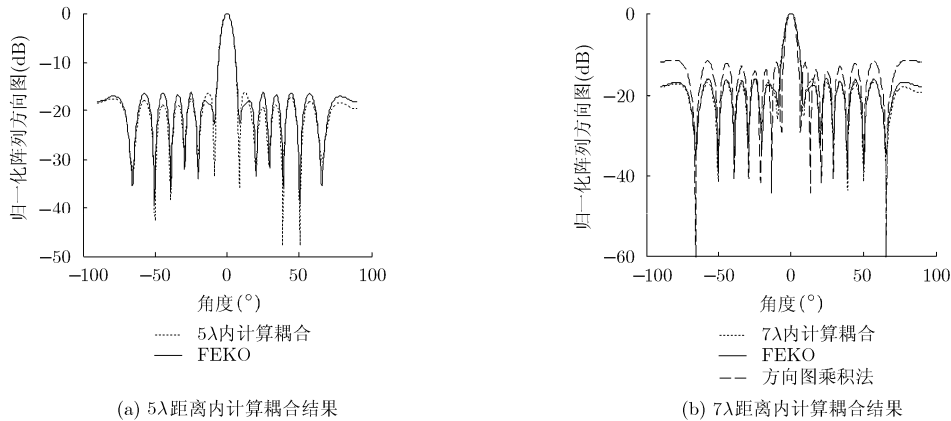


图 2 12 元非均匀阵的方向图对比

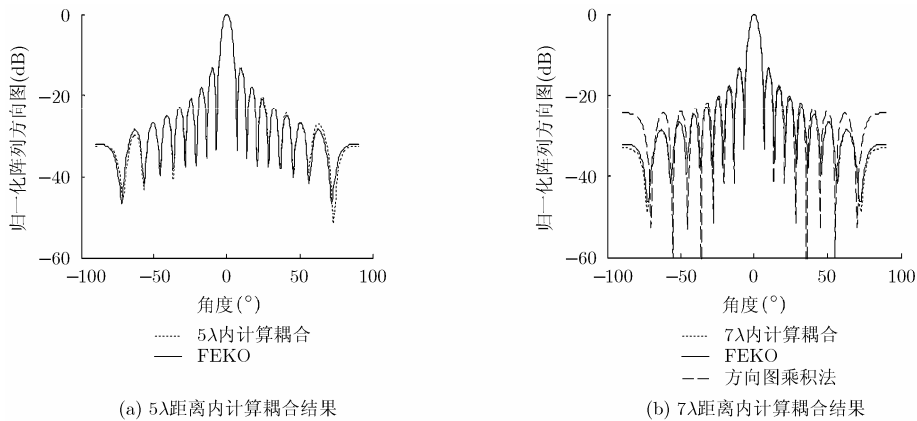


图 3 17 元均匀阵的方向图对比

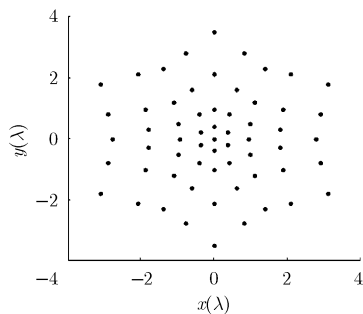


图 4 非均匀分布的面阵

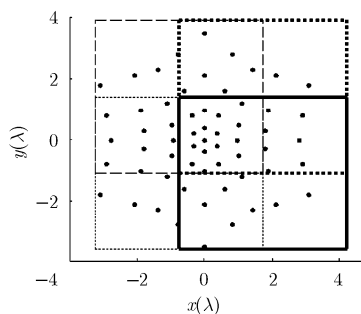
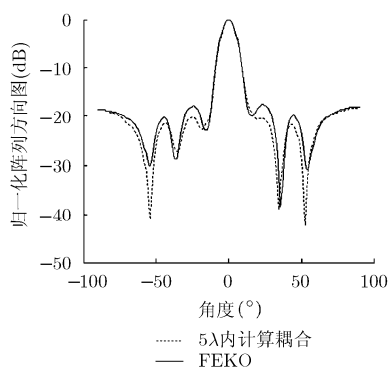
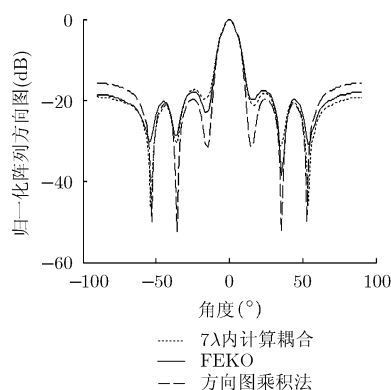


图 5 5λ 距离划分面阵



(a) 5λ 距离内计算耦合结果



(b) 7λ 距离内计算耦合结果

图 6 61 元面阵的方向图对比, $\phi = 90^\circ$ 面

表 3 给出了 61 元面阵对应的本文方法、方向图乘积定理算法以及 FEKO 软件计算所花费的时间和内存消耗方面的对比结果。仿真电脑处理器型号为 Intel®Core™i5-3317U, CPU 主频 1.70 GHz, 内存 4 GB, 64 位操作系统, Matlab 版本 R2009a, FEKO 版本 5.5。

表 3 计算资源消耗对比

方法	计算时间(s)	内存消耗(MB)
本文方法	5.6	32.1
方向图乘积法	1.5	16.9
FEKO 软件计算	15.9	14.3

通过对比发现, 由于矩量法计算互阻抗矩阵的原因, 本文方法比方向图乘积定理方法在计算时间和内存消耗上都有所增加, 与 FEKO 软件相比节省了计算时间但增加了内存消耗。因此, 在计算机内存允许的范围, 考虑互耦影响下的大型阵列波束综合, 本文方法能够减小与真实方向图之间的差异, 降低设计风险, 具有一定的参考价值。虽然增加子阵的划分距离可以减少子阵数量和计算精度,

但对于大型阵列而言, 子阵的计算距离也不能过大, 否则导致子阵内的天线数目过多, 引起矩量法的矩阵过大而影响内存和计算时间。一般子阵的计算距离可以选为 $5\lambda \sim 10\lambda$ 之间, 交叉子阵距离可选为 $3\lambda \sim 4\lambda$ 之间, 均可以得到较好的计算结果。

4.2 波束综合与优化

在第 4 节中, 介绍了基于此方法的机会阵列天线的波束综合方法, 适当地改变期望参考电压 $D(\theta)$, 就可以轻松地实现对波束的控制优化。基于此, 本节仍采用前文的 12 元非均匀线阵, 子阵的划分距离为 7λ , 分别以固定主副瓣电平差 30 dB, 固定角度区域内凹口均匀副瓣, 固定主瓣宽度下的均匀副瓣以及多主瓣为优化目标进行了波束综合仿真。迭代功率系数的选择分别为 $K = 0.1$, $K_o = 10$, 迭代次数为 1000。如图 7 所示, 图 7(a) 实现了固定主副瓣电平差的问题, 适应于寻找最窄主瓣, 图中仿真了副瓣低于主瓣 30 dB 的方向图, 此时主瓣宽度为 26° ; 图 7(b) 实现了凹口均匀副瓣的应用, 在区域 $[-30^\circ, -90^\circ]$ 和 $[30^\circ, 90^\circ]$ 内的副瓣电平比其它区域的副瓣电平低于 10 dB, 该类型的方向图可用

于抑制一定方向的干扰，起到陷波作用；图 7(c)实现了固定主瓣宽度下的均匀副瓣问题，适合于寻找方向图的极低副瓣，本文仿真了主瓣宽度为 28° ，副瓣电平比主瓣约低于 35 dB 的方向图；图 7(d)实现了方向图的多主瓣问题，在 $\pm 20^\circ$ 方向上各形成宽度为 20° 的主瓣。从图 7 中可以看出，方向图控制结果与 FEKO 仿真结果吻合良好，但随着角度偏离法向变大，较远的旁瓣区域结果吻合较差，但也可以接受。

表 4 给出了固定主副瓣电平差和凹口副瓣的综合之后的激励变化，由表中可以看出，激励幅度和相位都发生了变化，且中间位置的阵元激励幅度较大两端阵元激励幅度较小，与波束主瓣的位置吻合。

表 4 优化后激励幅度与相位的变化

阵元	幅度 1	相位 1($^\circ$)	幅度 2	相位 2($^\circ$)
1	0.0313	-33.592	0.0255	168.098
2	0.2201	-0.267	0.0415	-22.408
3	0.4347	0.058	0.1795	-5.456
4	0.7835	0.656	0.3445	-4.527
5	1.0475	0.319	0.4929	-2.254
6	1.1996	-0.297	0.6052	-0.722
7	1.2003	0.286	0.6053	0.720
8	1.0490	-0.318	0.4932	2.251
9	0.7836	-0.644	0.3448	4.538
10	0.4350	-0.021	0.1798	5.450
11	0.2155	0.306	0.0418	22.267
12	0.0264	40.095	0.0256	-168.137

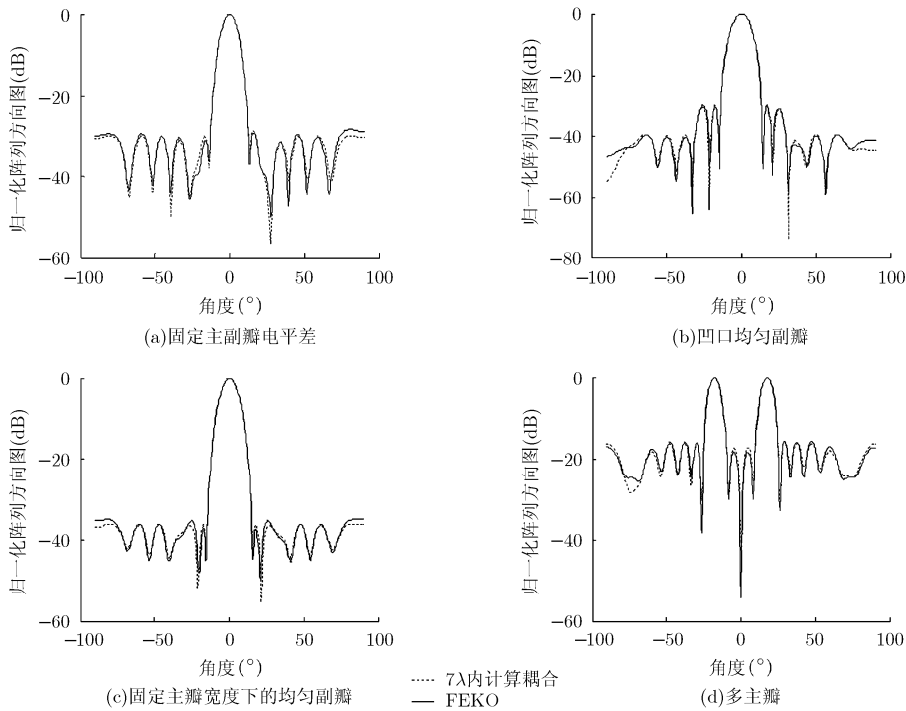


图 7 非均匀线阵方向图控制

5 结束语

基于子阵思想，提出了交叉划分子阵，使用矩量法计算各子阵的互阻抗矩阵，从而构建机会阵的互阻抗矩阵，并结合自适应理论，应用最大输出信噪比准则，通过在方向图区域施加干扰信号自适应地调整阵因子，对机会阵中阵元位置固定情况下的雷达波束方向图进行了综合与优化，结果与 FEKO 仿真结果吻合良好。如果以阵元间距为优化变量，在优化过程中需要多次计算互阻抗矩阵，计算量非

常大，本文方法受到局限，可以考虑结合智能优化算法对阵元位置进行优化。该方法在有效减少计算量的情形下，较精确地考虑了阵列单元间互耦的影响，降低了设计风险，对工程实践中任意阵列天线波束的综合与优化有一定的参考价值。

参考文献

[1] Jon A B. Genetic algorithms as a tool for opportunistic phased array radar design[D]. [Master dissertation], Naval Postgraduate School, 2002.

- [2] Lance C E. Genetic algorithm design and testing of a random element 3-D 2.4 GHz phased array transmit antenna constructed of commercial RF microchips[D]. [Master dissertation], Naval Postgraduate School, 2003.
- [3] Ibrahim K. Distributed beam forming in a swarm UAV network [D]. [Master dissertation], Naval Postgraduate School, 2008.
- [4] Long Wei-jun, Ben De, and Pan Ming-hai. Opportunistic digital array radar and its technical characteristic analysis[C]. IET International Radar Conference, Guilin, 2009: 724-727.
- [5] Long Wei-jun, Ben De, and Pan Ming-hai. Pattern synthesis for OAR using LSFE-GA method[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2011, 21(5): 584-588.
- [6] Long Wei-jun, Ben De, and Pan Ming-hai. Pattern synthesis optimization of 3-D ODAR based on improved GA using LSFE method[J]. *Haerbin Institute of Technology Journal*, 2011, 18(1): 96-100.
- [7] Gupta I J and Ksienski A A. Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, 31(9): 785-791.
- [8] Steyskal H and Herd J S. Mutual coupling compensation in small array antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(12): 1971-1975.
- [9] 高雪, 胡鸿飞, 傅德民. 基于单次快拍的自适应天线阵互耦效应分析与校正[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 922-924.
Gao Xue, Hu Hong-fei, and Fu De-min. Analysis and compensation of the effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays with single snapshot data[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(6): 922-924.
- [10] 杨超, 李利. 计入阵元间互耦影响的阵列方向性图综合[J]. 通信学报, 1996, 17(1): 31-37.
Yang Chao and Li Li. Pattern synthesis with mutual coupling present[J]. *Journal of China Institute of Communication*, 1996, 17(1): 31-37.
- [11] Liao B and Chan S C. Adaptive beamforming for uniform linear arrays with unknown mutual coupling[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 464-467.
- [12] Collins P J and Skinner J P. A hybrid moment method solution for TE_z scattering from large planar slot arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(2): 145-156.
- [13] Karimkashi S and Kishk A A. Focused microstrip array antenna using a Dolph-Chebyshev near-field design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(12): 3813-3820.
- [14] 张帅, 龚书喜, 关莹, 等. 大型平面阵列天线辐射方向图的小阵外推计算和综合方法[J]. 计算物理, 2011, 28(4): 554-560.
Zhang Shuai, Gong Shu-xi, Guan Ying, et al. Extrapolative method in pattern calculation and synthesis of large plane arrays[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2011, 28(4): 554-560.
- [15] 张帅, 龚书喜, 姜文. 一种考虑互耦计算大型阵列天线辐射和散射场的新方法[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2142-2147.
Zhang Shuai, Gong Shu-xi, and Jiang Wen. A novel method for calculating the radiation and scattering patterns of large finite arrays including mutual coupling effects[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9): 2142-2147.
- [16] 张帅, 龚书喜, 关莹, 等. 大型阵列天线阻抗矩阵和散射矩阵的求解及应用[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 106-113.
Zhang Shuai, Gong Shu-xi, Guan Ying, et al. Calculation and application of the mutual impedance and the scattering matrices of large finite arrays[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2012, 39(3): 106-113.
- [17] Pozar D M. The active element pattern[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(8): 1176-1178.
- [18] Toh B Y, Fusco V F, and Buchanan N B. Retrodirective array tracking prediction using active element characterization[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(12): 727-728.
- [19] 刘聪锋, 廖桂生. 改进的快速稳健任意阵列天线方向图综合方法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1): 104-110.
Liu Cong-feng and Liao Gui-sheng. Improved fast robust pattern synthesis method for arbitrary arrays[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(1): 104-110.
- 龚树凤: 女, 1985年生, 博士生, 研究方向为新体制雷达和雷达阵列信号处理.
- 贲德: 男, 1938年生, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为新体制雷达.
- 潘明海: 男, 1962年生, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为雷达技术、雷达信号处理等.
- 龙伟军: 男, 1978年生, 高级工程师, 研究方向为新体制雷达和雷达阵列信号处理.