

均匀线阵的子阵划分及子阵级权矢量联合优化

郑小雨 刘洛琨 郭虹 杨金金

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州, 450002)

摘要: 大型阵列采用子阵级处理方法可以用小的代价获得较好的处理性能。本文提出一种均匀线阵 (Uniform linear array, ULA) 子阵级处理方法, 该方法综合考虑子阵划分及子阵级幅度权矢量对阵列输出性能的影响, 运用粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 将子阵划分方式及子阵级幅度权值进行联合优化。通过仿真发现, 该联合优化方法可以充分利用阵列划分方式的自由度, 在已知阵列输出性能的前提下, 准确地提供一组阵列划分方式及子阵级幅度权值。与常规方法相比, 联合优化方法降低了阵列设计的计算量及阵列设计周期, 并且可以得到性能更有针对性的方向图。本文方法也为大型阵列进行子阵划分提供了理论依据。

关键词: 子阵划分; 方向图综合; 联合优化; 均匀线阵; 粒子群算法

中图分类号: TP911.7 **文献标志码:** A

Co-optimization of Subarray Partition and Weight Vector at Subarray Level for Uniform Linear Array

Zheng Xiaoyu, Liu Luokun, Guo Hong, Yang Jinjin

(Institute of Information System Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: Suboptimum performance may be obtained by processing at subarray level with a low cost in large array. Aiming at uniform linear array (ULA), a subarray level processing method is proposed. Considering the impact of subarray division and weight vector at subarray level on array performance, subarray partition and weight vector at subarray level are optimized by particle swarm optimization (PSO) at the same time. Simulation results show that co-optimization method can make full use of the array dividing degrees of freedom. When the array output performance is given, the proposed method can get the way to divide the array and subarray amplitude weights easily. Compared with the conventional method, co-optimization method can reduce the computation amount of array designing and the cycle for designing array. Moreover, pattern with greater pertinence can be achieved. The method also provides a theoretical basis of subarray partition for a large array.

Key words: subarray partition; pattern synthesis; co-optimization; uniform linear array; particle swarm optimization (PSO)

引言

随着环境复杂度的提高,为了满足更高的军事、民用要求,相控阵天线呈现出大规模化的发展趋势。如果直接对这种大型阵列进行阵元级的信号接收处理,相当于对每一路信号进行单独地放大、模数(A/D)转换等操作,然后对大量接收数据进行后期处理^[1]。庞大的计算量势必会降低处理速度,影响系统实时性的要求。除此之外,这种大规模阵列处理方式也大大增加了工程开销以及系统复杂度。因此,子阵划分技术得到越来越多的关注。Nickel^[2]通过对比两种不同的线阵划分方式,提出子阵中心间距无公约数的划分原则。随后,他又从子阵级和差波束天线方向图性能的方面,提出幅度锥削函数量化的子阵划分方法^[3]。Ferrier^[4]比较了均匀与非均匀两种划分方式,得出后者的方向图没有明显栅瓣。为了抑制子阵划分产生栅瓣,文献[5]中运用等噪声功率法来划分非均匀邻接子阵,可以使自适应方向图保形良好且没有明显栅瓣。文献[6]通过对稀布阵子阵级自适应数字波束形成技术特点的讨论,对稀布阵特性进行理论分析,给出了一种稀布天线阵模型,具有良好的波束性能。文献[7]针对特定的优化目标,采用遗传算法,对矩形栅格阵进行子阵划分,得到了性能更优异的阵列方向图。通过充分考虑子阵划分结构对阵列整体性能的影响,文献[8]对子阵进行有效划分,得到了低副瓣的和差波束。除此之外,文献[9-11]也对子阵划分进行了深入的研究。在对阵列进行子阵划分后,阵列输出性能往往会由于子阵间相位中心距离远大于半波长而恶化,最直接的后果是旁瓣电平过高以及出现栅瓣^[12]。这两项性能指标正是阵列在强杂波背景下检测目标能力的体现。因此,为了得到理想的低副瓣、无栅瓣等性能指标,可以采用幅度加权、密度加权和相位加权等方法^[13]对阵列进行优化。通过对比发现,幅度加权仍是最有效的加权方式。文献[14]从幅度加权角度考虑,以均匀划分的线阵为模型,讨论了加权对方向图性能的影响。文献[15]从多波束形成角度总结了子阵划分的寻优准则。以往文献大多仅考虑子阵划分的性能或子阵级幅度加权之后的性能,没有将二者结合在一起考虑。因此,本文提出一种子阵划分及子阵级幅度权矢量联合优化方法,该方法以划分方式及幅度权值为优化变量,以阵列输出方向图为优化目标进行联合优化。在进行优化时,本文采用思路清晰、算法简单的粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)。

1 子阵级信号处理模型及粒子群优化算法

在大型相控阵天线系统中,阵列的阵元数多达几百甚至上千个,由于工程实施困难、数据量庞大,一般采用子阵级处理。图1为子阵级阵列信号处理的模拟框图,假设阵列有 L 个阵元,分为 M 个子阵。阵元级移相器完成阵列的空间扫描,控制阵列旁瓣电平的幅度加权可以在阵元级(图中A处),也可以在子阵级(图中B处)。根据子阵排列方式的不同,可分为均匀邻接子阵、不均匀邻接子阵以及重叠子阵。重叠子阵由于有阵元共用现象,馈电系统复杂,因此工程中使用很少。从一致性、低成本和可操作性等角度考虑,均匀邻接子阵更有利于工程中的实施,但是均匀子阵的相位中心距离呈周期性排列会使阵列方向图出现栅瓣,导致性能恶化。不均匀邻接子阵打乱了子阵间相位中心距离的周期性,可以明显抑制栅瓣现象,但是旁瓣电平过高。因此,为了充分利用子阵划分的优势,将子阵级幅度加权与子阵划分方法综合考虑,以降低阵列的旁瓣和抑制栅瓣具有重要意义。

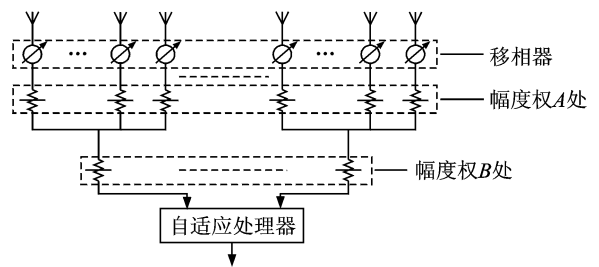


图1 子阵级信号处理框图

Fig. 1 Signal processing at subarray level

1.1 子阵级信号处理模型

参考图1所示的结构框图,总阵元数为 L ,划分为 M 个子阵,每个子阵内阵元数分别为 N_1, N_2, \dots, N_M ,要求每个阵元均充分且无重叠利用,即 $N_1 + N_2 + \dots + N_M = L$ 。相位权用来实现波束扫描,幅度权

用来压低波束旁瓣。降维变换矩阵设为 \mathbf{T} , 其表示式为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1, \dots, 1, 1 & & & \\ & 1, \dots, 1, 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1, \dots, 1, 1 \end{bmatrix}_{M \times L} \quad (1)$$

式中: 第 m 行有 N_m 个 1, 其余位置均为 0, 依次类推。那么子阵级处理就是通过降维变换矩阵 \mathbf{T} , 将数据量庞大的阵元级接收数据转换到子阵级, 进行子阵级处理, 大大降低了计算量。这种降维自适应处理方式的流程如图 2 所示。图 2 中, $X(k)$ 为阵元接收数据, $Y(k)$ 为经过子阵划分之后的子阵级接收数据, $Z(k)$ 为阵列经过处理后的输出。第 m 个子阵中第 n 个阵元的输出为

$$f_{mn}(\theta) = \phi(m, n, \theta) \cdot \varphi_{\text{ele}}(m, n, \theta_0) \cdot a_{\text{ele}}(m, n) \quad (2)$$

式中: a_{ele} 为阵元级幅度权, ϕ 为由阵元在子阵中的相对位置及方向角决定的空间相位差, φ_{ele} 为由每个子阵内阵元间相对位置求得的阵内相位差。经过变换及子阵级加权后, 阵列输出为

$$F(\theta) = (f_{11}, f_{12}, \dots, f_{21}, \dots, f_{mn}) \cdot \mathbf{T} \cdot \varphi_{\text{sub}}(m, \theta_0) \cdot a_{\text{sub}}(m) \quad (3)$$

式中: φ_{sub} 为通过子阵间的相对位置得到的子阵级阵内相位差, a_{sub} 为子阵级幅度权。以上得到阵列输出的思路为先求取每个子阵的输出, 然后将每个子阵看作一个单元天线进行子阵级合成。本文采用另一种分析思路, 即利用阵元级等效权矢量的概念。首先, 将子阵级幅度权矢量等效为阵元级, 并与每个阵元的幅度权值相结合, 则

$$\bar{\mathbf{W}}_{\text{ele}}(l) = \text{diag}(a_{\text{ele}}(l)) \cdot \mathbf{T} \cdot a_{\text{sub}}(l) \quad (4)$$

式中: $\text{diag}(\cdot)$ 为以阵元级幅度权 a_{ele} 为对角元素的对角阵, $\bar{\mathbf{W}}_{\text{ele}}$ 为阵元级等效权矢量。然后, 将阵列在阵元级进行处理, 得到阵列方向图为

$$F(\theta) = \bar{\mathbf{W}}_{\text{ele}}(l) \cdot \varphi_0(l, \theta_0) \cdot \psi(l, \theta) \quad (5)$$

式中: φ_0 为由阵元在整个阵列中的相对位置及波束指向决定的阵内相位差, ψ 为由阵元在阵内的位置和方向角决定的空间相位差。

1.2 粒子群优化算法

粒子群算法是根据仿生学提出的全局优化算法。PSO 中每个优化问题的解被称作一个粒子, 所有粒子都有一个由优化函数(Fitness)决定的适应值和决定粒子飞行方向、距离的速度。在优化过程中, 每个粒子通过迭代方式追随当前的最优粒子, 搜寻最优解。最优粒子分为: 粒子自身的当前最优解, 称为个体极值 p ; 种群的当前最优解, 称为全局极值 g 。PSO 算法的速度变化以及粒子位置更新规则为

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_d^k - x_{id}^k) \quad (6)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (7)$$

式中: v_{id}^k 为粒子维持自身速度运动的趋势; $c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id}^k - x_{id}^k)$ 为“认知”部分, 反映粒子自身历史经验, 代表粒子向个体最优位置逼近的趋势; $c_2 \cdot r_2 \cdot (g_d^k - x_{id}^k)$ 为“社会”部分, 反映粒子间协同合作的群体信息共享过程, 代表粒子向群体最优位置逼近的趋势。 c_1, c_2 分别为个体学习因子和社会学习因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 内的均匀随机数; x_{id}^k 与 v_{id}^k 分别为第 k 次迭代中第 i 个粒子在第 d 维的位置和速度; p_{id}^k 为第 k 次迭代中第 i 个粒子的个体最优位置在第 d 维, g_d^k 为当前迭代次数全局最优粒子的第 d 维数值。由于基本的 PSO 算法存在容易局部收敛等问题, 文献[16]总结并提出了一种基本 PSO 的改进算法, 粒子位置更新策略为

$$v_{id}^{k+1} = \omega \cdot v_{id}^k + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot (1 - \text{rand}) \cdot (g_d^k - x_{id}^k) \quad (8)$$

$$\omega_{\text{iter}} = \omega_{\text{max}} - (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \cdot \text{iter}/\text{iter}_{\text{max}} \quad (9)$$

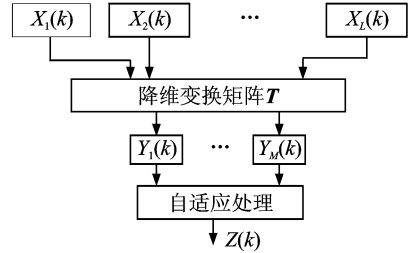


图 2 降维自适应处理流程图
Fig. 2 Adaptive processing on dimension-reducing

式中:rand为[0,1]内均匀分布的随机数。该改进 PSO 将速度更新中的 v_{id}^k 加入一个系数 ω 以提高算法的收敛效果,除此之外,随机数 r 的选取与基本 PSO 也有所改进。本文采用上述线性递减惯性权值粒子群算法(Linearly decreasing weight PSO,LDW-PSO)进行问题的优化。

2 子阵划分及权矢量联合优化方法

在方向图综合问题中,经常要求阵列方向图为低旁瓣、深零陷,以测试阵列的性能,因此,幅度加权是首要选择的方法。但经过子阵划分后的阵列,由于子阵间相位中心间距远大于半波长,导致方向图性能恶化,出现明显栅瓣、高旁瓣等现象,并且在某些阵列划分方式下,即使进行子阵级幅度加权处理也无法对方向图的恶化有明显的改善。这就需要在前期的阵列划分设计中,充分考虑阵列的输出性能。但是,现有的大部分划分准则并没有充分考虑到这一点,而是在固定子阵结构基础上,仅依靠子阵级幅度加权达到阵列性能要求。这一处理过程为:首先确定子阵的划分方式,然后依此划分方式,以实现性能指标为目标,运用经典的加权方法或优化算法求得子阵级幅度权值,最后对阵列进行子阵级加权。本文称上述方法为常规方法,该方法详细流程如图 3 所示。其存在两个缺点:(1)阵列进行子阵划分的目的是充分利用划分后降低系统成本和计算量的优势,使子阵级处理性能达到最优的水平。子阵划分与子阵级加权处理对整个阵列的性能都起着至关重要的作用,如果将两因素隔离开,很有可能得不到在固定子阵数条件下的最佳阵列性能;(2)子阵划分的过程具有一定的盲目性,在进行权值优化的过程中,若固定子阵划分方式,很可能该种方式无论如何进行子阵级加权处理都无法达到所要得到的性能,需要多次仿真进行阵列划分方式的改进,这样就增大了计算量及阵列设计周期。针对以上问题,本文将从未划分过的阵列进行子阵划分,然后进行子阵级幅度加权,最后得到期望方向图的整个过程考虑,提出一种阵列划分及子阵级权矢量的联合优化方法。与常规方法相比,联合优化方法可以更好地利用阵列划分的自由度,使子阵划分更有目的性且阵列性能更优异。本文提出的联合优化方法包括子阵划分方式优化及子阵级权矢量优化,而该优化问题是一个有等式约束的非线性(多目标)整数规划问题,因此,在求解过程中有一定难度。具体的联合优化思路如图 4 所示。由于优化问题的特殊性,因此,粒子的前半部分,即子阵划分方式进

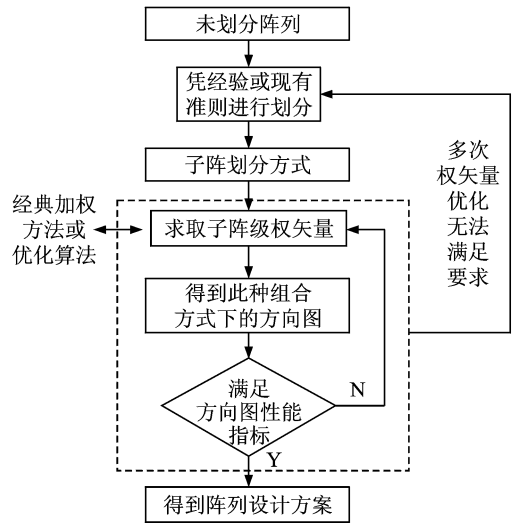


图 3 常规方法流程图

Fig. 3 Flowchart of conventional method

具体的联合优化思路如图 4 所示。由于优化问题的特殊性,因此,粒子的前半部分,即子阵划分方式进

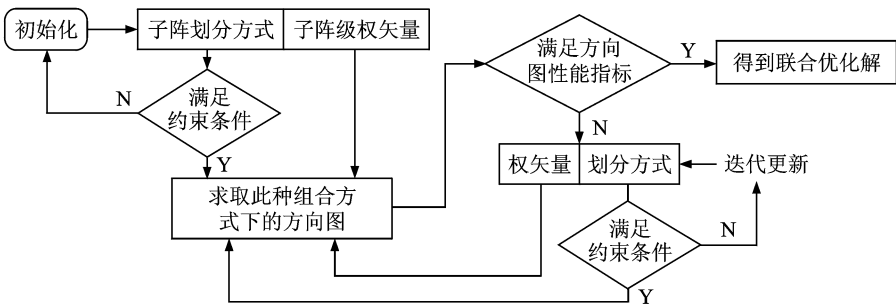


图 4 联合优化流程图

Fig. 4 Flowchart of co-optimization method

行初始化以及迭代更新时,将要对所用的 PSO 算法进行适当改变,以保证满足约束条件且具有搜索最优解的能力。子阵划分方式初始化采用随机赋值的方式,但由于每个子阵内的阵元数应控制在一定范围内,因此,可以令子阵数初始化为 $\text{randint}(a, b)$, 其中 $\text{randint}(a, b)$ 为区间 $[a, b]$ 内的随机整数, a 为每个子阵内阵元数下限, b 为每个子阵内阵元数上限。经初始化后,若子阵内阵元数和不等子阵列总阵元数,则重新进行初始化;子阵阵元数变化速度的初始化同样采用随机赋值方式,速度变化范围为 $[-c, c]$ 。在进行更新迭代时,由于子阵阵元数为整数的限制,因此,将粒子前半部分的更新规则改为

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \cdot [\text{randint}(-c, c)] \cdot (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot (1 - [\text{randint}(-c, c)]) \cdot (g_{id}^k - x_{id}^k) \quad (10)$$

式中:设学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ 。而后半部分子阵级权矢量的粒子更新策略,为了加快优化问题的收敛速度、提高收敛效果,采用 LDW-PSO 方法,粒子更新规则采用式(8)方法。在粒子寻优过程中,同样也需控制速度的变化范围,当 v_{id} 超出或者低于某个范围,对其在“指定范围”内重新随机赋值;然后,运用式(7)对粒子进行更新;当更新后的粒子不满足 $[a, b]$ 条件时,也需通过 $\text{randint}(\cdot)$ 对其在“指定范围”内重新赋值,该过程重新赋值的范围需根据问题的特殊性进行设置以保证算法的优化效果,具体例子如仿真分析所述。最后,检测子阵内阵元数和是否等于总阵元数,若不满足约束条件,则重新求取 v_{id} 及 x_{id} 。

3 仿真分析

为了简便且又不失一般性,本文针对一个由 128 个阵元组成的均匀线阵,阵元间距为半波长,阵元为全向天线,将其划分为 8 个子阵,并进行子阵级幅度加权。仿真中,忽略阵元间互耦等因素影响。根据图 4 所示联合优化方法流程图,可将优化参数设置如下:固定划分子阵数为 8,每个子阵内最小阵元数为 12,最大阵元数为 20;子阵内无幅度加权。粒子结构为 $[N_1, N_2, \dots, N_8, a_1, a_2, \dots, a_8]$, 粒子的前半部分 N 为每个子阵的阵元数,约束 N 为整数且 $N_1 + N_2 + \dots + N_8 = 128$ 。每次迭代时,检测各个子阵的阵元数以及改变阵元数的粒子速度,防止不满足约束条件和陷入局部解的现象发生。当粒子大于 20 或小于 12 时,令粒子 N 分别为 $\text{randint}(15, 20)$ 和 $\text{randint}(12, 17)$;当粒子速度大于 4 或小于 -4 时,令粒子速度分别为 $\text{randint}(2, 4)$ 和 $\text{randint}(-2, -4)$ 。其中 $\text{randint}(a, b)$ 表示区间 $[a, b]$ 内的随机整数。粒子的后半部分 a 为每个子阵的幅度权,初始化为 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数。根据不同的性能要求,通过适应度函数的设置,对目标进行优化。每次独立实验中,粒子个数为 25,迭代次数为 500。

实验 1 运用常规方法与联合优化方法分别对阵列进行子阵划分及子阵级权矢量优化,使阵列副瓣电平低于 -40 dB。

为了便于对比,在常规方法的仿真中,先对 128 元阵列进行均匀划分和 $[20 \ 18 \ 14 \ 12 \ 12 \ 14 \ 18 \ 20]$ 的划分方式(第 1 个子阵由前 20 个阵元组成,第 2 个子阵由第 21~38 号阵元组成,依次类推),然后分别对两种方式进行子阵级 -40 dB 的 Taylor 权和运用 PSO 算法优化幅度权。仿真结果如图 5 所示。联合优化方法得到的子阵划分方式及子阵级归一化权矢量如表 1 所示。

表 1 划分与加权方案

Tab. 1 Scheme of dividing and weighting

子阵编号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
阵元编号	1~12	13~32	33~46	47~66	67~86	87~104	105~116	117~128
幅度权值	0.586 6	0.864 4	0.813 9	0.841 4	0.933 8	0.906 4	1.000 0	0.455 2

实验 2 运用常规方法与联合优化方法对 128 阵元均匀线阵进行子阵划分及子阵级权矢量优化,使阵列满足副瓣低于 -30 dB,在 -60° 形成 -80 dB 深零陷的性能指标。

通过图 5(a) 很容易发现, -60° 为均匀划分方式栅瓣产生的方向,因此,由理论可知无法在此方向产生深零陷抑制干扰。而运用实验 1 的不均匀划分仿真阵型 $[20 \ 18 \ 14 \ 12 \ 12 \ 14 \ 18 \ 20]$, 经过多次子阵级权矢量优化也无法达到本次实验性能指标。在进行多次仿真改进后,得到划分方式为 $[22 \ 10 \ 10 \ 22 \ 22 \ 10 \ 10 \ 22]$ 的阵型,经过 PSO 优化可以得到基本满足本次实验深零陷要求的子阵级幅度权。图 6(a, b) 分

别为常规方法与联合优化方法的仿真结果。联合优化方法得到的子阵划分方式及子阵级归一化权矢量如表 2 所示。两次实验结果对比如表 3 所示。

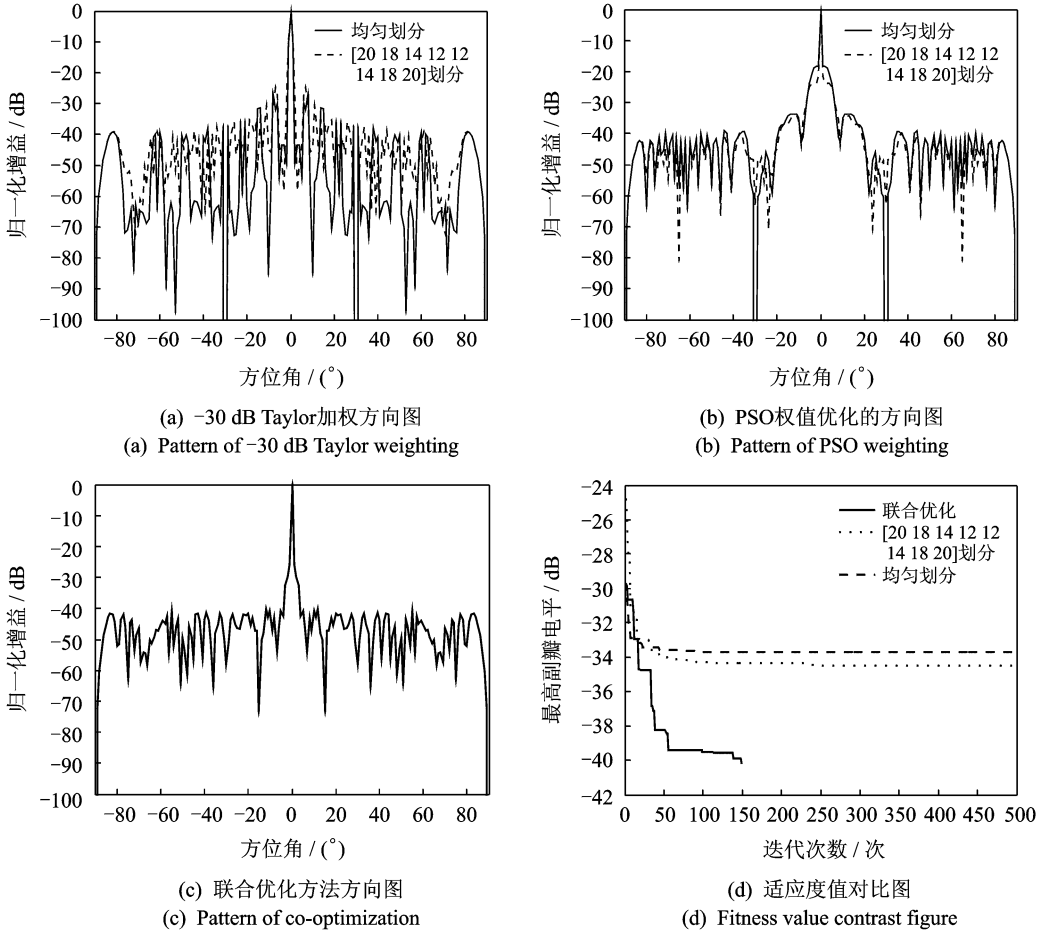


图 5 仿真结果对比图

Fig. 5 Simulation results contrast figure

表 2 划分与加权方案

Tab. 2 Scheme of dividing and weighting

子阵编号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
阵元编号	1~15	16~30	31~47	48~60	61~72	73~90	91~110	111~128
幅度权值	0.342 9	1.000 0	0.874 9	0.997 2	0.841 9	0.871 2	0.831 1	0.665 5

表 3 实验结果对比

Tab. 3 Simulation results contrast

实验	期望性能/dB	常规方法/dB		联合优化方法/dB
1	副瓣: -40	-26.57(Taylor 加权)	-24.67(Taylor 加权)	-40.19
		-33.70(PSO 优化)	-34.59(PSO 优化)	
2	副瓣: -30		-23.54	-31.17
	零陷: -80		-79.06	-83.00

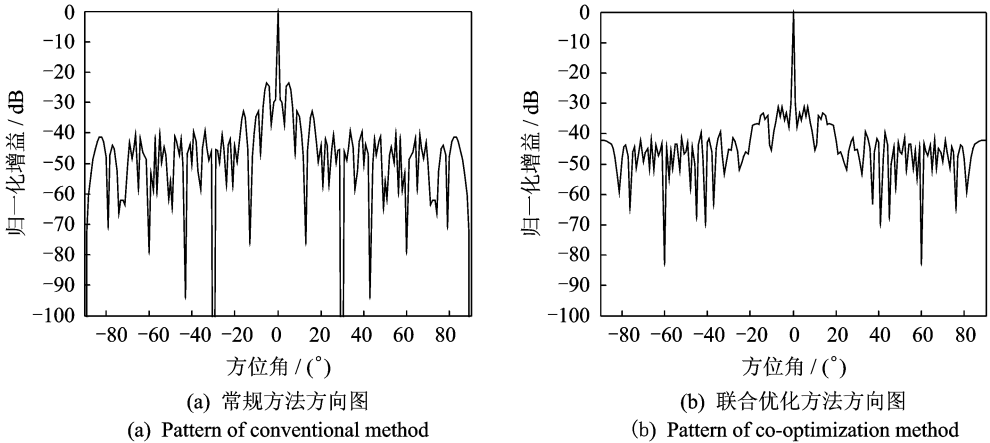


图6 仿真结果对比图

Fig. 6 Simulation results contrast figure

为了充分验证本方法的可靠性及有效性,以上仿真结果均为进行10次独立优化实验选择的一组解。在实验1中,对均匀划分及 $[20\ 18\ 14\ 12\ 12\ 14\ 18\ 20]$ 划分进行Taylor加权,第1副瓣电平分别为 -26.57 dB 和 -24.67 dB ,通过PSO优化算法对其子阵级幅度权值求取后,两种划分方式的第1副瓣电平分别为 -33.7 dB 和 -34.59 dB 。可以发现,运用以上两种划分方法,无法实现 -40 dB 低旁瓣的阵列性能。运用联合优化方法得到方向图的副瓣为 -40.19 dB ,可以得到满足阵列性能要求的划分方式及幅度加权值。通过观察图5(d)发现,本文提出的方法在优化过程中,由于充分利用了子阵划分的自由度,因此,仅需150次迭代完成了 -40 dB 旁瓣电平的性能要求,缩短了阵列设计周期。在实验2中,运用本文提出的联合优化方法可以很容易通过PSO得到一组满足阵列性能要求的划分方式及子阵级加权方法,而运用常规方法,需要经过长时间的仿真改进后,才可能得到一组基本满足性能要求的阵列划分模型及子阵级加权值。由于需要进行多次仿真改进,因此,运用常规方法得到阵列划分方案的过程计算量大,阵列设计周期长。通过实验2结果的对比也可以发现,通过常规方法得到的划分方式产生的深零陷并不是特别有针对性,而联合优化方法由于其阵列划分自由度较高,可以得到更有针对性的阵列方向图。综上,运用本文提出联合优化方法可以高效地确定满足期望性能指标的阵列划分方式及子阵级幅度权值。因此,针对大规模阵列划分问题,联合优化方法大大降低了计算量和阵列设计周期。

4 结束语

本文综合考虑子阵划分及子阵级幅度权矢量对阵列输出性能的影响,提出子阵划分及子阵级权矢量联合优化方法。通过仿真对比发现,联合优化方法可以充分利用阵列划分方式的自由度,在已知阵列输出性能的条件下,准确地提供一组阵列划分方式及子阵级幅度权值。与常规方法相比,联合优化方法降低了阵列设计总计算量及阵列设计周期并且可以得到性能更具针对性的方向图。本文也为大型相控阵列如何进行子阵划分提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1994:72-82.
Zhang Guangyi. Phased array radar system[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1994:72-82.
- [2] Ulrith R O N. Subarray configurations for interference suppression with phased array radar[C]// IEEE Intel Radar Conf. Paris: IEEE, 1989:82-86.
- [3] Ulrith R O N. Subarray configurations for digital beamforming with low sidelobes and adaptive interference suppression[C]

//IEEE Intel Radar Conf. Alexandria: IEEE, 1995:714-719.

- [4] Ferrier J M. Antenna subarray architectures and anti-jamming constraints[C]//Proc of Intel Conf on Radar. Paris: [s. n.], 1994:466-469.
- [5] 徐志勇,保铮,廖桂生. 一种非均匀邻接子阵结构及其部分自适应处理性能分析[J]. 电子学报,1997,25(9):20-24.
Xu Zhiyong, Bao Zheng, Liao Guisheng. A nonuniform contiguous subarray configuration and its performance of partially adaptive processing[J]. Acta Electronica Sinica, 1997,25(9):20-24.
- [6] 邱力军,周智敏. 稀布相控阵雷达子阵划分方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 1997(7):31-37.
Qiu Lijun, Zhou Zhimin. Studies of antenna subarray division in sparse phased array radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 1997(7):31-37.
- [7] 徐佳. 二维相控阵子阵划分和数字波束形成技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
Xu Jia. Research on subarray configuration and digital beam forming methods for planar phased array radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [8] 习文. 相控阵雷达阵列天线子阵划分优化算法研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
Xi Wen. Research on optimization algorithm of sub-array division in phased array radar antenna [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [9] 谢文冲,王永良. 一种子阵划分方法及子阵级 STAP 性能分析[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(3):273-277.
Xie Wenchong, Wang Yongliang. Effective subarray partition method and performance analysis of STAP at subarray[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2007,22(3):273-277.
- [10] Xiong Z Y, Xu Z H, Zhang L, et al. Research on the optimal subarray partition based on clustering algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2615-2621.
- [11] 和洁,冯大政,李晓明. 基于遗传算法和禁忌搜索的 MIMO 雷达天线布阵优化[J]. 数据采集与处理, 2011,26(4):413-419.
He Jie, Feng Dazheng, Li Xiaoming. Optimization of antenna array geometry in MIMO radar based on genetic algorithm and tabu search[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011,26(4):413-419.
- [12] Timothy J B, Yahya R S. Subarray design diagnostics for the suppression of undesirable grating lobes[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2012, 60(3):1373-1380.
- [13] Lopez P, Rodriguez J A, Ares F, et al. Subarray weighting for the difference patterns of monopulse antennas: Joint optimization of subarray configurations and weights[C]//Microwave Conference. [S.l.]: IEEE, 2001: 1-4.
- [14] Haupt R. Reducing grating lobes due to subarray amplitude tapering[J]. IEEE Trans, 1995, 33(8): 846-850.
- [15] 熊子源,徐振海,张亮,等. 阵列雷达最优子阵划分研究[J]. 雷达科学与技术,2011,9(4): 370-377.
Xiong Ziyuan, Xu Zhenhai, Zhang Liang, et al. A summary of optimum subarray partitioning problem in array radar[J]. Radar Science and Technology, 2011,9(4): 370-377.
- [16] Li W T, Shi X W, Hei Y Q. An improved particle swarm optimization algorithm for pattern synthesis of phased arrays[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008,82(2): 319-332.

作者简介:



郑小雨(1990-),男,硕士研究生,研究方向:大型阵列综合及宽带阵列信号处理等,E-mail:rainbow_zxy041@163.com。

刘洛琨(1963-),男,教授,研究方向:超宽带通信、无线移动自组织网络和相控阵雷达。

郭虹(1975-),女,讲师,研究方向:无线移动自组网、网络与通信等。

杨金金(1990-),女,硕士研究生,研究方向:阵列综合及阵列信号处理。