

电子对抗环境下 ADBF 相控阵雷达的阵列结构优化

胡航 秦伟程

(哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院 哈尔滨 150001)

摘要: ADBF 相控阵雷达通常采用子阵结构。子阵结构对系统性能具有显著影响,对相控阵进行最优子阵划分具有重要的理论与应用意义。该文利用多目标进化算法(MOEA)进行子阵结构优化,使系统在主瓣干扰下具有尽可能好的抗干扰及和、差波束旁瓣抑制性能。将和波束自适应方向图的旁瓣电平、系统输出 SINR 及差波束的旁瓣电平作为优化目标,构造了5种目标函数。给出了 MOEA 子阵结构的编码方法。基于 Pareto 秩排序的 MOEA 将 30×32 的平面阵划分为 64 个子阵的仿真结果表明,系统的多种性能得到了提高。

关键词: 平面相控阵; 多目标进化算法; 自适应数字波束形成; 子阵优化; 主瓣干扰

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0366-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00044

The Array Configuration Optimization of Phased Array Radar with ADBF in Electronic Countermeasure Environment

Hu Hang Qin Wei-cheng

(School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The phased array radar with adaptive digital beamforming usually adopts subarray configuration. Subarray configuration has obvious influence on system performance, therefore the optimal subarray division has important significance in both theoretics and applications. Based on Multi-Objective Evolutionary Algorithm(MOEA), the subarray configuration is optimized to obtain anti-jamming performance and sidelobe level of patterns of sum and difference beam in case of mainlobe jamming as good as possible. The sidelobe level of adaptive pattern of sum beam, output SINR and sidelobe level of difference beam are taken as optimized objectives, and five objective functions are constructed. The encoding for subarray configuration used in MOEA are proposed. Simulation results of that an 30×32 planar array is segmented into 64 subarrays by using MOEA based on Pareto rank sorting demonstrate that, a variety of performances of system are improved at the same time.

Key words: Planar phased array; Multi-Objective Evolutionary Algorithm(MOEA); Adaptive Digital BeamForming(ADBF); Subarray optimizing; Mainlobe jamming

1 引言

在相控阵雷达特别是多功能相控阵雷达中,阵元数可达到数千甚至上万;为此通常采用子阵结构^[1]。电子对抗环境下,现代相控阵雷达通常采用 ADBF(自适应数字波束形成)技术进行干扰抑制;ADBF 提供了电子反对抗能力,可有效保证系统的检测与定位等性能。

子阵结构对系统性能具有显著影响,子阵划分是相控阵雷达系统设计中十分重要的问题。通过优化子阵结构,可有效提高系统在电子对抗环境下的检测、方向估计、自适应及旁瓣抑制等性能。但是,在阵列复杂度一定(阵元和子阵数固定)的情况下,寻找最优的子阵划分是一个难度很大的问题。将包含有成千上万阵元的阵列划分为几十个子阵是一个

有很多限制条件的多目标最优化问题,包含了依赖于很多参数和有极其广泛搜索空间的十分复杂的目标函数,而且所期望的各种性能(检测、定位、抗干扰和旁瓣抑制等)可能是相互矛盾的。

进化算法是一种高效的随机搜索方法,在解决大空间、非线性、全局寻优等复杂问题上具有很多优势,特别适合大规模的并行计算,且具有既可扩大搜索空间、又兼顾优化效率的突出优点^[2],而且不需要确定的规则。上述特点使进化算法比较适用于进行子阵优化。

国内外对基于进化算法的子阵优化方法进行了一定研究。文献[3]对子阵结构和阵元加权同时优化,以抑制和波束静态方向图的旁瓣。文献[4]研究了差波束静态方向图的旁瓣抑制问题,给出一种子阵结构和子阵加权联合优化的方法;但仅适用于线阵及对称划分的阵列。文献[5]针对线阵,进行子阵优化以抑制 STAP 的栅瓣。文献[6]提出利用多目标遗传

2009-01-12收到,2009-10-09改回

中国博士后科学基金(20080430905),中国博士后特别资助项目(200902412),航空科学基金(20092077010)和航天支撑基金资助课题
通信作者:胡航 huhang@hit.edu.cn

算法对 ADBF 相控阵雷达的多种性能进行优化,但未考虑抗干扰性能。

本文研究电子对抗环境下,基于 MOEA (Multi-Objective Evolutionary Algorithm)^[7] 的 ADBF 相控阵雷达的子阵划分方法,且针对应用了单脉冲技术的系统。子阵划分是系统设计问题,需要对多种性能参数同时优化,因而要利用多目标进化算法 (MOEA)。本文采用基于 Pareto 秩排序的 MOEA; 以阵元数为 1 千左右、子阵数为几十为例来说明优化结果,与阵列的实际规模比较接近。

单脉冲估计中,需要同时抑制和、差波束的旁瓣。本文采用阵元级只用一种模拟加权,而在子阵级应用两级数字加权的方案。其中模拟 (Taylor) 加权抑制和波束的旁瓣,第 1 级子阵级加权抑制差波束的旁瓣,第 2 级子阵级加权进行自适应干扰抑制。这种方案的特点是可降低硬件成本及复杂度,并利用了数字处理的灵活性。

利用 MOEA 对多种性能进行优化,相当于在它们之间进行最优的折衷,即对某种性能的改善是以其它性能的下降为代价。MOEA 得到的是一个最优解的集合,其中某一最优解只对某一种参数最优,而对其它参数却不是。因而,利用基于 Pareto 秩排序的 MOEA 对子阵结构优化后,需要在最优子阵集中进行后验选择。为此可基于使某一特定参数最优,或引入约束限制条件(如几何结构),或考虑实现代价及复杂度等,以最终确定阵列结构。

2 基于多目标进化算法的子阵优化的目标函数

本文在阵元级只采用 Taylor 加权; 而子阵级采用两级数字加权,其中第 1 级用于抑制差波束旁瓣,第 2 级用于自适应干扰抑制。

雷达系统中,抑制方向图的旁瓣是十分重要的问题; 另一方面,电子对抗环境下,系统会接收到各种干扰,其中主瓣干扰的危害尤其大。因而提高主瓣干扰下的抗干扰性能具有重要意义^[6]。为此将提高系统的旁瓣抑制性能及主瓣干扰下的自适应性能作为子阵优化的主要目标: 即将和波束自适应方向图的旁瓣电平、差波束方向图的旁瓣电平和系统输出 SINR 作为 MOEA 的目标函数。

考虑平面阵,设其位于 xoy 平面上; 用 (θ, φ) 表示仰角和方位角,令 $u = \sin \theta \cos \varphi$, $v = \sin \theta \sin \varphi$ 分别表示 (θ, φ) 方向的单位向量在 x 和 y 上的投影。用 $F_{\Sigma_adap}(u, v)$ 表示和波束自适应方向图, $F_{\Delta}(u, v)$ 表示差波束静态方向图。

建立 5 种目标函数,分别用 $F_{Obj}^{(1)}, F_{Obj}^{(2)}, F_{Obj}^{(3)}, F_{Obj}^{(4)}$ 和 $F_{Obj}^{(5)}$ 表示。

(1) $F_{Obj}^{(1)}$: 主瓣干扰下,和波束自适应方向图在

俯仰面的旁瓣电平。 $F_{Obj}^{(1)}$ 为主瓣干扰下,方向图 $F_{\Sigma_adap}(u, v)$ 在 $u = 0$ 切面的旁瓣电平 (SideLobe Level, SLL), 即

$$F_{Obj}^{(1)} = SLL|_{F_{\Sigma_adap}(u,v)|_{u=0}} \quad (1)$$

(2) $F_{Obj}^{(2)}$: 主瓣干扰下,和波束自适应方向图在方位面的旁瓣电平。 $F_{Obj}^{(2)}$ 为主瓣干扰下,方向图 $F_{\Sigma_adap}(u, v)$ 在 $v = 0$ 切面的旁瓣电平, 即

$$F_{Obj}^{(2)} = SLL|_{F_{\Sigma_adap}(u,v)|_{v=0}} \quad (2)$$

(3) $F_{Obj}^{(3)}$: 主瓣干扰下的输出 SINR。 $F_{Obj}^{(3)}$ 为主瓣干扰下,和波束自适应方向图的输出信干噪比 (SINR), 即

$$F_{Obj}^{(3)} = SINR \quad (3)$$

SINR 用来衡量系统的自适应性能,由式(4)决定:

$$SINR = \left\{ \left(\mathbf{w}_{sub_Sigma}^{(adap)} \right)^H \mathbf{a}_{sub_Sigma}(\theta_0, \varphi_0) \cdot P_s \mathbf{a}_{sub_Sigma}^H(\theta_0, \varphi_0) \mathbf{w}_{sub_Sigma}^{(adap)} \right\} / \left\{ \left(\mathbf{w}_{sub_Sigma}^{(adap)} \right)^H (\mathbf{R}_{sub})^H \mathbf{w}_{sub_Sigma}^{(adap)} \right\} \quad (4)$$

式中 P_s 为期望信号功率, $\mathbf{w}_{sub_Sigma}^{(adap)}$ 为第 2 级子阵级权向量, $\mathbf{a}_{sub_Sigma}(\theta_0, \varphi_0)$ 为波束指向方向的导向向量, \mathbf{R}_{sub} 为子阵级输出的干扰加噪声协方差矩阵^[8]。

(4) $F_{Obj}^{(4)}$: 差波束方向图在俯仰面的旁瓣电平。 $F_{Obj}^{(4)}$ 为差波束方向图 $F_{\Delta}(u, v)$ 在 $u = 0$ 切面的旁瓣电平, 即

$$F_{Obj}^{(4)} = SLL|_{F_{\Delta}(u,v)|_{u=0}} \quad (5)$$

(5) $F_{Obj}^{(5)}$: 差波束方向图在方位面的旁瓣电平。 $F_{Obj}^{(5)}$ 为 $F_{\Delta}(u, v)$ 在 $v = 0$ 切面的旁瓣电平, 即

$$F_{Obj}^{(5)} = SLL|_{F_{\Delta}(u,v)|_{v=0}} \quad (6)$$

3 基于 Pareto 秩排序的子阵优化方法

3.1 子阵结构的编码方法

为利用 MOEA, 首先要将平面阵的几何结构用染色体的二进制码来表示, 即将空间结构映射为可由进化算法计算的染色体编码形式。

为此采用基于中心阵元的编码方法。即利用一个随机的二进制串编码的染色体表示 L 个子阵的初始位置, 并将这些初始位置所对应的阵元称为子阵的中心阵元, 将该染色体称为中心染色体。对中心阵元周围的阵元, 用另一种染色体表示, 并称其为周围染色体; 在周围染色体中, 若某阵元存在于该子阵中用 1, 否则用 0 表示^[3]。

上述两类染色体的二进制编码携带了不同信息, 因而彼此独立, 可分别进行选择、交叉及变异操作。独立的交叉和变异不仅可保护各染色体中的

基因,更重要的是便于后续的解码过程。

基于中心阵元的编解码如图1所示。为调整子阵的大小,可通过增加周围染色体长度的方法来增大中心阵元的辐射范围;如用8位二进制码表示与中心阵元紧邻的8个周围阵元,再用16位二进制码表示与上述8个周围阵元相邻的更外围的16个周围阵元,依此类推。

3.2 基于 Pareto 秩排序的 MOEA

利用MOEA对多个目标同时优化所得到的最优解称为Pareto最优解,但它不是唯一的,而是一个集合,被称为Pareto最优集。对于每一个Pareto最优解,不可能在进一步优化一个或几个目标的同时不使其它目标劣化,因而也称为非劣最优解。

所有Pareto最优解对应的目标函数值形成的最优区域称为Pareto前沿。图2以两个目标函数为例给出了Pareto前沿示意图^[2]。图中,目标函数为 f_1 和 f_2 ,实心点表示Pareto最优解,虚线表示Pareto前沿,空心点表示遗传过程中产生的非劣最优解。如图2所示,MOEA的优化就是不断逼近Pareto前沿的过程。

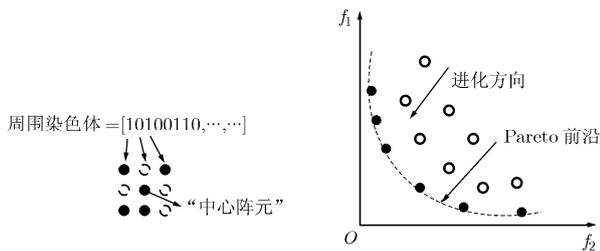


图1 子阵结构的编码示意图

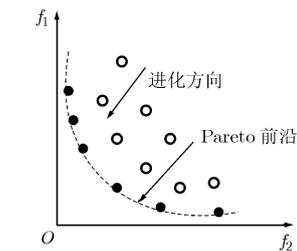


图2 两个目标函数的 Pareto 前沿

基于 Pareto 秩排序的 MOEA 的实现过程是,将多个目标函数直接映射到适应度函数中,组成一个向量代表一个个体;基于 Pareto 秩的大小,对种群中所有个体排序;基于 Pareto 秩排序进行适应值赋值。通过基于 Pareto 秩的适应度函数,求出每代中的非劣最优个体。如此不断遗传下去,以逼近 Pareto 前沿。

3.3 子阵划分流程

基于 Pareto 秩排序的 MOEA 划分子阵的主要步骤为

- (1)随机生成中心染色体及周围染色体;
- (2)对生成的两类染色体进行解码,还原子阵结构;
- (3)利用约束条件对解码结果进行检测,并修正染色体中的非法基因;以保证同一子阵中所有阵元相邻、各子阵为非重叠子阵、阵列为满布阵等。

(4)对种群内的个体进行排序;

(5)利用线性插值方法计算个体适应度,序号为1者为最优个体。

(6)计算具有相同秩的个体的平均适应度值,以使其具有相同的选中概率;这样,在同一压力参数下,保持整个种群的适应度值为常数。

(7)分别对中心染色体及周围染色体进行选择、交叉及变异,以产生新一代种群中优化的染色体;

(8)判断是否满足设计要求或迭代次数;是则终止,否则返回(2)。

4 仿真结果

4.1 仿真条件

以矩形阵为例给出仿真结果。设有 $30 \times 32 = 960$ 个全向阵元,按 $\lambda/2$ 间距的栅格放置在 xoy 平面上。设 $(\theta_0, \varphi_0) = (0^\circ, 0^\circ)$, x 和 y 方向均采用 -40 dB Taylor 加权,设子阵数为64。主瓣干扰入射方向为 $(1^\circ, 1^\circ)$,且干噪比为30 dB。

原始子阵结构随机选取。进化参数中,选择概率为0.7,变异概率为0.01,种群大小为40,进化代数数为200。

4.2 仿真结果

下面分别给出各目标函数的优化结果。

(1)主瓣干扰下,和波束自适应方向图在俯仰面的旁瓣电平 图3(a)给出了子阵结构优化后,和波束自适应方向图在 $u = 0$ 处的切面图;为便于比较,同时给出了优化前原始子阵结构对应的方向图。可见子阵优化后,自适应方向图在俯仰面的旁瓣电平得到了较好的改善。图中,原始和优化后的旁瓣分别为 -11.81 dB和 -18.18 dB,因而旁瓣改善了6.37 dB。需要指出,这里旁瓣是指第3高度的波瓣,因为此时主瓣凹口两侧形成了两个高增益瓣,而其中较低的瓣是由主瓣割裂引起的^[6]。

图3(b)给出了和波束自适应方向图在俯仰面旁瓣电平最优的子阵结构;可见同一子阵中所有阵元均相邻,各子阵为非重叠子阵,且阵列为满布阵。

(2)主瓣干扰下,和波束自适应方向图在方位面的旁瓣电平 图4(a)给出了子阵优化后,和波束自适应方向图在 $v = 0$ 的切面图;同时给出了原始子阵结构的方向图。可见子阵优化后,自适应方向图的方位面旁瓣电平得到了改善。图中,原始和优化后方向图的旁瓣分别为 -9.42 dB和 -11.54 dB,即旁瓣改善了2.12 dB。图4(b)给出了和波束自适应方向图在方位面旁瓣电平最优的子阵结构。

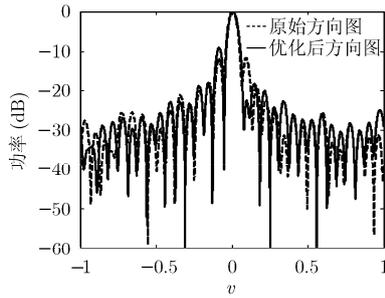
(3)输出 SINR 图5(a)给出了子阵优化后,输出 SINR 随俯仰角的变化关系(方位角为 1.0°);图中

同时给出了原始子阵结构的输出 SINR。可见输出 SINR 得到了一定改善。图中,原始和优化后的 SINR 分别为 58.53 和 58.92 dB, 因而 SINR 改善了 0.39 dB。图 5(b)给出了 SINR 最优的子阵结构。

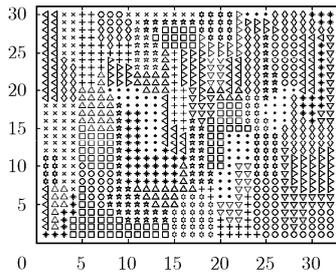
(4)差波束方向图在俯仰面的旁瓣电平 图 6(a)给出了子阵优化后,差波束静态方向图在 $u = 0$ 的切面图; 同时给出了原始子阵结构的方向图。可见子阵优化后,差波束方向图在俯仰面的旁瓣电平得到

显著改善。图中,两个方向图的旁瓣分别为-16.90 dB 和-28.82 dB, 因而旁瓣改善了 11.92 dB。图 6(b)给出了差波束俯仰面旁瓣电平最优的子阵结构。

(5)差波束方向图在方位面的旁瓣电平 图 7(a)给出了子阵优化后,差波束方向图在 $v = 0$ 的切面图; 同时给出了原始子阵结构的方向图。可见差波束方向图在方位面的旁瓣电平得到了显著改善。图中,两个方向图的旁瓣分别为-16.31 dB 和-29.08 dB,

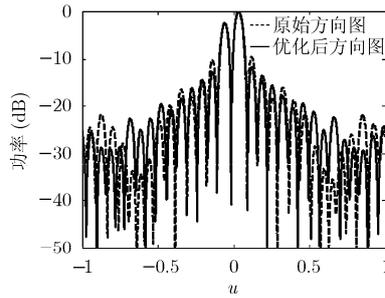


(a) 和波束自适应方向图的俯仰面切面图

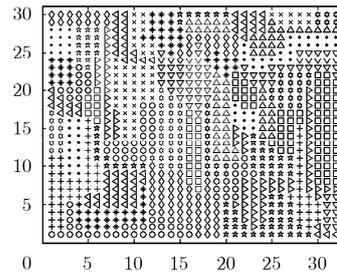


(b) 对应的最优子阵结构

图 3 第 1 个目标函数的优化结果

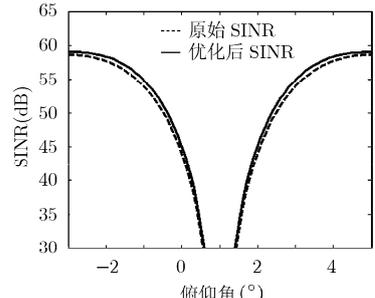


(a) 和波束自适应方向图的方位面切面图

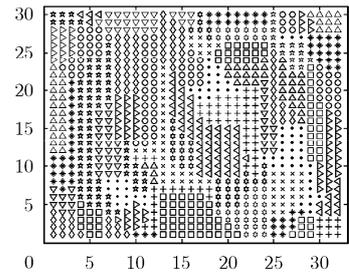


(b) 对应的最优子阵结构

图 4 第 2 个目标函数的优化结果

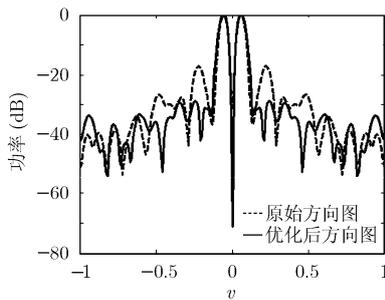


(a) 输出 SINR

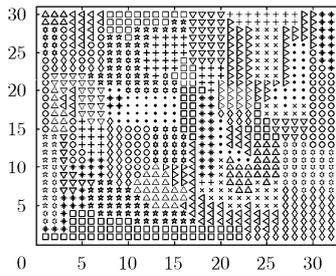


(b) 对应的最优子阵结构

图 5 第 3 个目标函数的优化结果

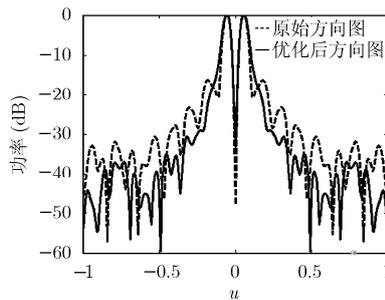


(a) 差波束方向图的俯仰面切面图

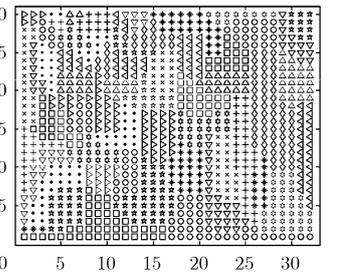


(b) 对应的最优子阵结构

图 6 第 4 个目标函数的优化结果

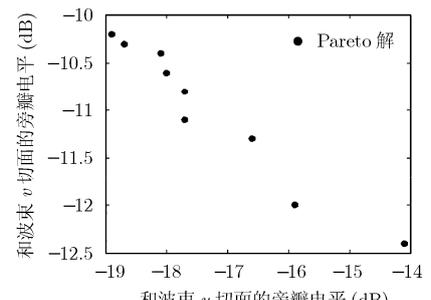


(a) 差波束方向图的方位面切面图

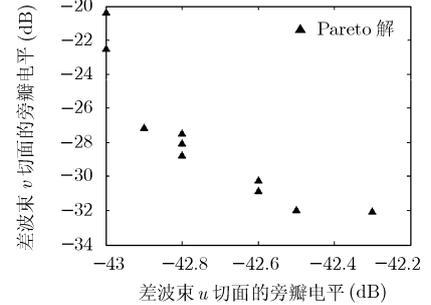


(b) 对应的最优子阵结构

图 7 第 5 个目标函数的优化结果



(a) 和波束方向图的旁瓣电平



(b) 差波束方向图的旁瓣电平

图 8 Pareto 前沿

因而旁瓣改善了 12.77 dB。图 7(b)给出了差波束方位面旁瓣电平最优的子阵结构。

(6)Pareto 前沿 为验证目标优化性能,图 8 给出了优化后的 Pareto 最优解。目标为 5 个,因而 Pareto 前沿为一个超曲面。为直观起见,给出了和波束方向图两个切面旁瓣电平对应的 Pareto 最优解,及差波束方向图两个切面旁瓣电平对应的 Pareto 最优解,分别如图 8(a)和 8(b)所示。

由图可见,Pareto 最优解组成的趋势线并不十分规则,这是由于基于中心阵元的子阵编解码方法产生了很多不合理的子阵结构,经过约束条件判断后这些非法解从解的集合中被剔除,因而产生相对离散的 Pareto 最优解;尽管如此,从图中仍可看到其收敛趋势。

5 结论

(1)MOEA 可用于对 ADBF 相控阵雷达进行子阵优化。利用基于 Pareto 秩排序的 MOEA,可使主瓣干扰下的和波束自适应方向图旁瓣、差波束方向图的旁瓣及系统自适应性能同时得到提高。

(2)MOEA 优化后得到的是一个最优解集合,为此需要在多种最优子阵结构之间进行后验选择,以最终确定所需要的阵列结构。(3)作为初步结果,本文考虑了主瓣干扰下的自适应及旁瓣性能。从系统设计要求出发,还应对检测及方向估计等性能进行优化,这是需要进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] Nickel U. Subarray configurations for digital beamforming with low sidelobes and adaptive interference suppression. Proc. IEEE International Radar Conference, Alexandria, USA, 1995: 714-719.
- [2] 王小平,曹立明. 进化算法——理论应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 116-117.
- [3] Ansell D W and Hughes E J. Use of multi-objective genetic algorithms to optimise the excitation and subarray division of multifunction radar antennas. Proc. IEE colloquium on multifunction radar and sonar sensor management techniques, England, 2001: 8/1-8/4.
- [4] López P, Rodríguez J A, and Ares F, *et al.* Subarray weighting for the difference patterns of monopulse antennas: joint optimization of subarray configurations and weights. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(11): 1606-1608.
- [5] 谢文冲,王永良. 一种子阵划分方法及子阵级STAP性能分析. 数据采集与处理, 2007, 22(3): 273-277.
Xie Wen-chong and Wang Yong-liang. Effective subarray partition method and performance analysis of STAP at subarray[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2007, 22(3): 273-277.
- [6] Golino G. Improved genetic algorithm for the design of the optimal antenna division in sub-arrays: A multi-objective genetic algorithm. Proc. IEEE International Radar Conference, Washington, USA, May 2005: 629-634.
- [7] Fonseca C M and Fleming P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generation. Proc. 5th International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, USA, 1993: 416-423.
- [8] 胡航,邓新红. 二维子阵级ADBF及方向图控制方法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 881-884.
Hu Hang and Deng Xin-hong. Study on the two-dimensional ADBF at subarray level and pattern control method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(4): 881-884.

胡 航: 男, 1968 年生, 博士后, 硕士生导师, 研究领域为阵列信号处理技术在相控阵雷达系统中的应用。

秦伟程: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为阵列信号处理。