

引用格式:费晓,张贞凯,田雨波,等.风驱动优化的共享孔径方向图综合[J].电光与控制,2018,25(6):52-55,82. FEI X, ZHANG Z K, TIAN Y B, et al. Shared aperture pattern synthesis based on wind driven optimization[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):52-55, 82.

风驱动优化的共享孔径方向图综合

费晓¹, 张贞凯^{1,2}, 田雨波¹, 刘新星¹

(1. 江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212000; 2. 中船重工第七二二研究所, 武汉 430000)

摘要: 针对共享孔径阵列天线, 基于一种新型的全局优化算法——风驱动优化, 提出了一种新的共享孔径方向图综合方法。首先, 设计两阵列相邻阵元的间距约束条件, 将两个子阵波束图的最高旁瓣电平作为优化目标。然后, 在约束公式条件下, 先后确定子阵1和子阵2阵列单元的初始坐标, 通过利用风驱动算法优化两子阵单元坐标位置来降低旁瓣电平, 实现不同频率的共享孔径阵列天线设计。最后, 通过与粒子群算法和传统SMI算法对比, 验证了该算法在共享孔径方向图中的可行性和有效性。

关键词: 多功能阵列天线; 共享孔径; 风驱动优化算法; 最高旁瓣电平; 子阵

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.012

Shared Aperture Pattern Synthesis Based on Wind Driven Optimization

FEI Xiao¹, ZHANG Zhen-kai^{1,2}, TIAN Yu-bo¹, LIU Xin-xing¹

(1. School of Electronic and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;
2. No. 722 Research Institute of China Shipbuilding Industry, Wuhan 430000, China)

Abstract: A new optimum method of shared aperture pattern synthesis is proposed based on the new global optimization algorithm, Wind Driven Optimization (WDO), for the shared aperture array antenna. Firstly, the space constraint condition of the array element adjacent to two arrays is designed, and the Peak Side Lobe Level (PSLL) of the two sub-array patterns is used as the objective function. Then, according to the constraint formula, the initial coordinates of sub-array 1 and sub-array 2 array elements are developed successively. These two sub-array elements positions are optimized by using the WDO method to reduce PSLL of the pattern synthesis, in order to fulfill the design of shared aperture antenna array working at different frequencies. Finally, a simulation is made and the result shows that: compared with the particle swarm optimization algorithm and the traditional SMI algorithm, this proposed algorithm has better feasibility and effectiveness in the shared aperture pattern synthesis.

Key words: multi-function array antenna; shared aperture; wind driven optimization; maximum side lobe level; sub-array

0 引言

多功能阵列天线的设计一直是雷达、通信、电子战等领域的研究热点, 共享孔径则是实现阵列天线多功能应用的有效方式之一^[1]。共享孔径天线能够通过空分复用使两个及以上的天线子阵列共同占据一个孔

径, 同时每个子阵列能够实现不同的功能^[2-4]。目前国内学者在共享孔径天线方面已取得一些成果, 文献[5]针对均匀阵列天线激励与方向图的傅里叶关系, 采用密度加权阵原理确定阵元位置, 实现不同工作频率下的子阵天线稀疏交错优化布阵。但基于FFT的波束形成的波束指向是等距的, 不能灵活控制。文献[6]利用差集和互补差集进行交错布阵, 但目前的差集还比较少, 只能对特定阵元进行阵列优化。本文针对不同频率下子阵列阵元的设计分布, 采用了一种新颖的优化算法——风驱动优化^[7](Wind Driven Optimization, WDO)布阵, 在降低旁瓣电平的同时, 实现共享

收稿日期: 2017-07-06

修回日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61401179); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX17_0592)

作者简介: 费晓(1992—), 男, 江苏苏州人, 硕士生, 研究方向为阵列信号处理。

孔径阵列天线多波束指向的灵活控制。风驱动的优化过程模仿空气质点在大气中的受力运动情况。该算法可调参数少、寻优效率高、全局搜索能力强,受到学术界广泛关注,能应用于各学科领域^[8-9]。目前国内对风驱动算法的研究还很少,因此,本文首次将风驱动算法运用到共享孔径方向图优化问题中。

1 风驱动优化(WDO)算法

WDO 算法来源于空气质点受力运动的简化和模拟,在算法模型中将空气质点的受力运动情况应用牛顿第二定律并结合理想气体状态方程,推导出 WDO 算法速度和位置的更新方程。具体方程^[7]为

$$u_{new} = (1 - \alpha)u_{cur} - g x_{cur} + \left[R_T \left| \frac{1}{i} - 1 \right| (x_{opt} - x_{cur}) \right] + \frac{c u_{cur}^{other_dim}}{i} \quad (1)$$

式中: α 为摩擦系数; g 为地球重力加速度; R_T 为气压梯度力影响系数; c 为科氏影响系数; u_{cur} 为当前迭代次数中的速度大小; u_{new} 为下一迭代次数中的速度大小; $u_{cur}^{other_dim}$ 表示空气质点在当前维度中的速度和位置均受到其他任意维度的影响; i 表示所有空气质点的排序; x_{opt} 和 x_{cur} 分别表示空气质点的最优位置和空气质点的当前位置。

$$x_{new} = x_{cur} + (u_{new} \Delta t) \quad (2)$$

式中: x_{new} 为质点的更新位置;为简化计算,令 $\Delta t = 1$ 。WDO 算法具体流程如图 1 所示。

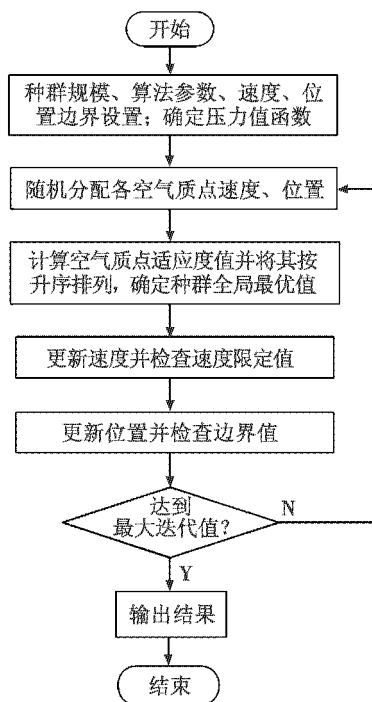


图 1 WDO 算法流程图

Fig. 1 The flow chart of WDO algorithm

2 共享孔径方向图综合设计

2.1 优化模型

共享孔径天线模型如图 2 所示。

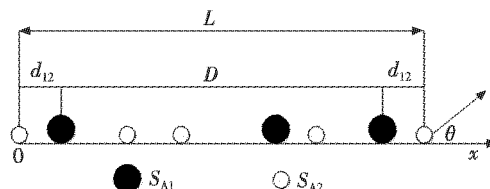


图 2 共享孔径线阵结构

Fig. 2 Structure of a linear shared aperture antenna array

图 2 中,孔径长度为 L ,两子阵单元分别用 S_{A1} 和 S_{A2} 表示,设各个阵元的激励等幅同相,两个子阵的方向图^[10]分别表示为

$$E_1(\theta) = \sum_{n=1}^{N_1} \exp(jk_1 x_n^1 (\cos \theta - \cos \theta_1)) \quad (3)$$

$$E_2(\theta) = \sum_{n=1}^{N_2} \exp(jk_2 x_n^2 (\cos \theta - \cos \theta_2)) \quad (4)$$

式中: N_1 和 N_2 分别为两个子阵的阵元数目; x_n^1 和 x_n^2 分别为两个子阵的第 n 个阵元位置; $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ 和 $k_2 = 2\pi/\lambda_2$ 为工作波数, λ_1 和 λ_2 表示子阵 1 和子阵 2 的工作波长; θ 为俯仰角; θ_1 和 θ_2 为两子阵的波束指向。

为了避免相邻阵元间距过小,产生耦合,将阵元间距加以约束。在确定阵列孔径后,分别设置两个不同子阵相邻阵元的最小间距为 d_1 和 d_2 ,两个子阵之间阵元的最小间距为 d_{12} ,目标函数为最高旁瓣电平为最小,表示为

$$\min \{ V_{PSLL} \} \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \min |x_i^1 - x_j^1| \geq d_1, \min |x_m^2 - x_n^2| \geq d_2, \min |x_m^2 - x_j^1| \geq d_{12}, i, j = 1, 2, \dots, N_1, i \neq j; m, n = 1, 2, \dots, N_2, m \neq n.$$

2.2 共享孔径交错阵列设计及优化步骤

为有效使用整个天线孔径,先确定子阵 1 的阵元位置,令 $x_1^1 = d_{12}, x_{N_1}^1 = D + d_{12}$,因此只需确定 $N_1 - 2$ 个阵元位置。如图 2 所示,子阵 1 的孔径长度为 D ,在最小间距为 d_1 的条件下,允许分布阵列单元的区域剩下为 $S_{P1} = D - (N_1 - 1)d_1$ 。在闭区间 $[0, S_{P1}]$ 中随机生成 $N_1 - 2$ 个实数,并进行从小到大排序,得到矩阵 $C^1 = [c_1^1, c_2^1, \dots, c_{N_1-2}^1]^T$ 。子阵 1 中剩余的 $N_1 - 2$ 个阵元位置的算式为

$$\begin{bmatrix} x_2^1 \\ x_3^1 \\ \vdots \\ x_{N_1-1}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^1 + d_1 \\ c_2^1 + 2d_1 \\ \vdots \\ c_{N_1-2}^1 + (N_1 - 2)d_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

然后,确定子阵2的阵元位置。如图3所示,如果子阵1中相邻阵元间距小于 $2d_{12}$,则该相邻阵元之间不能排列子阵2阵元。因此,在子阵1中相邻阵元 x_i^1 和 x_{i+1}^1 之间排列的子阵2长度为

$$l_i = \begin{cases} 0 & x_{i+1}^1 - x_i^1 \leq 2d_{12} \\ x_{i+1}^1 - x_i^1 - 2d_{12} & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $i=1,2,\dots,N_1-1$ 。

子阵2各阵元摆放的空间区域之和的算式为

$$L_T = \sum_{i=1}^{N_1-1} l_i \quad (8)$$

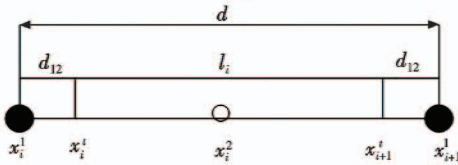


图3 部分结构示意图

Fig.3 Configuration of a segment of the array

为了确定子阵2的阵元位置,定义了新的坐标系 x^t ,如图4所示,坐标值 $x_i^t, i=1,2,\dots,N_1$,算式为

$$\begin{cases} x_1^t = 0 \\ x_{N_1}^t = L_T \\ x_i^t = \sum_{n=1}^{i-1} l_n \end{cases} \quad i=2,3,\dots,N_1-1 \quad (9)$$

子阵2中共有 N_2-2 个阵元排列在长度为 L_T 的阵列孔径中,与子阵1的阵元排列相似,允许分布子阵2的阵元区间剩下为 $S_{p2} = L_T - (N_2-3)d_2$ 。在闭区间 $[0, S_{p2}]$ 中随机生成 N_2-2 个实数,并进行从小到大排序,得到矩阵 $C^2 = [c_1^2, c_2^2, \dots, c_{N_2-2}^2]^T$ 。在新坐标系 x^t 下子阵2中余下的 N_2-2 个阵元位置的算式为

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_{N_2-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^2 \\ c_2^2 + d_2 \\ \vdots \\ c_{N_2-2}^2 + (N_2-2)d_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

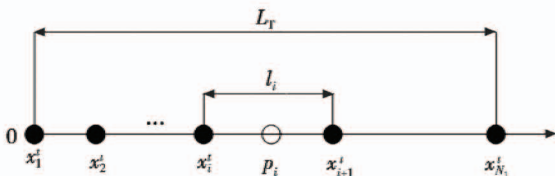


图4 新坐标结构

Fig.4 Structure of the new coordinate system

如图2所示,为了充分利用整个孔径,令子阵2中的阵元 $x_1^2=0, x_{N_2}^2=L$ 。每个阵元在图2条件下的实际坐标的算式为

$$\begin{aligned} x_m^2 &= d_{12} + x_i^1 + (p_{m-1} - x_i^1) \quad x_i^1 \leq p_{m-1} \leq x_{i+1}^1, \\ i &= 1, 2, \dots, N_1-1, \quad m = 2, 3, \dots, N_2-1. \end{aligned} \quad (11)$$

最后,利用风驱动优化算法优化共享孔径的阵元位置,其优化步骤如下所述。

1) 给出风驱动算法各个参数的数值,随机生成一个 $N \times P$ 维的初始种群 r 。种群的每一列用 r_i 表示, $i=1,2,\dots,N$,其中 $N=N_1+N_2-4$ 且 $r_i \in [0,1]$,每一列的前 N_1-2 个元素优化子阵1的阵元位置,后 N_2-2 个元素优化子阵2的阵元位置。设置迭代值 n_{\max} ,令 $n=1$ 。

2) 由式(6)和式(11)计算出两个子阵的阵元位置。

3) 根据式(3)和式(4)计算出两个子阵的波束方向图,保留产生最优适应度的种群。

4) 根据风驱动算法更新种群参数 r_i 。

5) 令 $n=n+1$,当迭代次数达到最大值 n_{\max} 时,停止迭代并输出最优结果,否则返回步骤2)。

3 实验仿真与分析

设相邻阵元最小间距分别为 $d_1 = \lambda_1/2, d_2 = \lambda_2/2, d_{12} = (\lambda_1 + \lambda_2)/4$ 。参照文献[7],并经过多次仿真寻优后,WDO算法的具体参数设置如下:空气摩擦系数 $\alpha=0.1$;重力加速度 $g=0.1$;常数 $R_T=2.6$;常数 $c=0.4$ 。为了验证WDO算法的有效性,其优化结果与粒子群算法(PSO)做比较,在粒子群算法中, c_1 和 c_2 为学习因子,基于文献[11],取 $c_1=c_2=2$,而惯性权重 ω 能让粒子保持惯性运动,取 $0.5 \sim 0.8$ 效果最好,本文中, $\omega=0.5$ 。

3.1 仿真1

设子阵1和子阵2阵列单元的中心工作波长分别为 $\lambda_1=4\text{ cm}, \lambda_2=2\text{ cm}$,两子阵列的阵元数目分别为 $N_1=20, N_2=25$,两子阵的期望方向分别为 $35^\circ, 60^\circ$,阵列孔径总长度 $L=125$,种群规模为50,迭代次数为100。将基于风驱动优化的共享孔径方向图综合算法(Wind Driven Optimization Shared Aperture, WDOSA)进行仿真验证,并与粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization Shared Aperture, PSOSA)的性能进行对比,如图5所示。

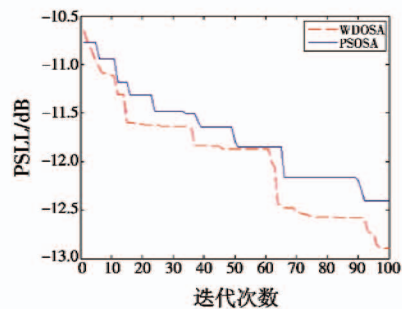


图5 最高旁瓣电平迭代曲线

Fig.5 PSLL versus iteration times

PSOSA算法和WDOSA算法的方向图仿真分别如

图6和图7所示。

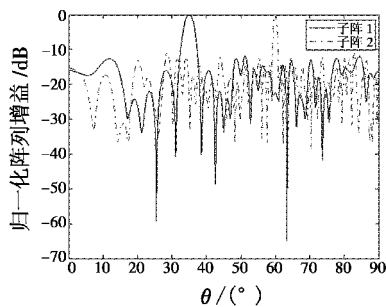


图6 PSOSA算法波束图

Fig. 6 Beam pattern of PSOSA algorithm

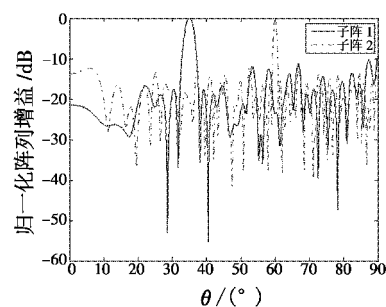


图7 WDOSA算法波束图

Fig. 7 Beam pattern of WDOSA algorithm

通过仿真可以看出,由PSOSA算法优化得到子阵1和子阵2波束的峰值旁瓣电平最小值为 -12.4 dB,而WDOSA算法能够将子阵1和子阵2波束的峰值最小旁瓣电平降低到 -12.9 dB。在统一优化环境下分别用PSO和WDO进行单独优化,PSOSA算法优化时间为 83.3 s,而WDOSA算法的优化时间为 78.6 s。仿真结果表明,WDOSA具有较好方向图效果的同时,还具有较快的收敛速度。在WDO算法中,引力使得空气质点不易跑出优化边界。在寻优过程中,地球的向心力会使空气质点的稳定性进一步增强。此外,科氏力带来的随机效应使得空气质点运动鲁棒性进一步增加,收敛速度进一步加快。

3.2 仿真2

子阵1和子阵2仿真条件与仿真1相同,与LCMV (Linearly Constrained Minimum Variance)算法^[12]做对比,设该算法中阵元数目为45,间距为半波长,两个相互独立的期望信号分别为 35° , 60° ,输入信噪比为 15 dB,干噪比为 10 dB,快拍数为365,对比结果如图8所示。

两种算法都能在期望方向形成方向图,子阵1和子阵2波束由WDOSA算法生成,LCMV算法在相干信号环境影响下生成的波束旁瓣电平升高、波束畸变。WDOSA算法在孔径大小和阵元间距约束条件下,能够让优化布阵具有更大的自由度,获得更优的峰值旁瓣性能。经LCMV算法得到的最高旁瓣电平值为 -12 dB,

通过WDOSA算法优化得到两个波束的最高旁瓣电平值为 -12.9 dB,旁瓣电平进一步降低。从主瓣宽度看出,在相同阵元数目条件下,子阵2的主瓣宽度小于LCMV算法在 60° 方向形成的主瓣宽度。仿真表明,本文方法能够实现两个不同工作频率下子阵单元的稀疏交错分布,比其他常规方法具有更好的波束性能。

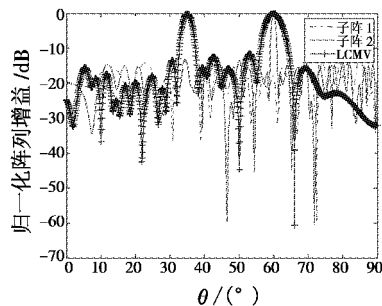


图8 WDOSA与LCMV算法

Fig. 8 Algorithm of WDOSA and LCMV

4 结论

本文将风驱动优化算法首次运用到共享孔径中,在满足最小阵元间距约束条件下,以降低两个子阵列方向图的最高旁瓣电平为目标对阵元位置进行优化。仿真结果验证了WDOSA算法的有效性和可行性。

在实际应用中,可通过调整各个子阵移相器的角度,灵活控制方向图指向,实现共享孔径阵列天线不同角度的空间扫描。

参考文献

- [1] QUAN S J, QIAN W P, GUQ J H, et al. Radar-communication integration; an overview[C]//International Conference on Advanced Infocomm Technology, IEEE, 2014:98-103.
- [2] 张峰干,井亚鹤,肖磊,等.多子阵平板天线峰值旁瓣优化[J].电光与控制,2014,21(1):86-90.
- [3] 石长安,刘一民,王希勤,等.基于帕累托最优的雷达-通信共享孔径研究[J].电子与信息学报,2016,38(9):2351-2357.
- [4] 胡继宽,王布宏,李龙军.共享孔径交错阵列综合优化方法[J].电光与控制,2013,20(8):33-36.
- [5] 李龙军,王布宏.共享孔径多功能宽带阵列天线研究[J].西安电子科技大学学报,2016,43(4):147-153.
- [6] KHAN A A, BROWN A K. Null steering in irregularly spaced sparse antenna arrays using aperture distributed subarrays and hybrid optimiser[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2014, 8(2):86-92.
- [7] BAYRAKTAR Z, KOMURCU M, WERNER D H. Wind

(下转第82页)

由图 7 可知, GPS 可见卫星中在 95% 置信度下, 除 PRN10 的 URAE 较其他卫星明显偏大外, 其余卫星均满足 GPS SPS PS(2008)0.002 m/s² 的指标。由图 8 可知, BDS 可见卫星在 95% 置信度下, 除 C13 卫星外, 其余所有卫星均满足 BDS-OS-PS-1.0 中 0.002 m/s² 的指标。

3 结论

本文基于研究的分段式 SIS URE 评估模型, 利用 2015 年 IGS 提供的实测数据评估了 GPS 和 BDS 的 SIS URE 性能; 并基于 Allan 方差法, 评估了 GPS 和 BDS 的 URRE 和 URAE 性能。结果表明: 除 BDS C02 卫星的 URE 以及 GPS PRN10 卫星的 URAE 略大以外, 其余 GPS 和 BDS 卫星的 SIS URE, URRE 和 URAE 均符合各自系统的指标要求, 验证了所研究的精度评估方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] YU L, ZHAO G P, ALICE A, et al. How reliable is satellite navigation for aviation? Checking availability properties with probabilistic verification [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 144:95-116.
- [2] 王尔申, 张晴, 雷虹, 等. GPS 空间信号可用性评估算法 [J]. 电光与控制, 2017, 24(2):39-42, 46.
- [3] U. S. Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard [R]. 4th ed. Washington: DS, 2008.
- [4] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0 版). [M]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2013.
- [5] WALTER T, BLANCH J, ENGE P. Evaluation of signal in space error bounds to support aviation integrity [J]. Navigation, Journal of the Institute of Navigation, 2010, 11(26):11-21.
- [6] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 北斗卫星导航系统空间信号误差统计分析 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, 39(3):271-274.
- [7] SUN S, WANG Z P. Signal-in-space accuracy research of GPS/BDS in China region [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016:235-245.
- [8] 秦显平, 杨元喜, 焦文海, 等. 利用 SLR 和伪距资料确定导航卫星钟差 [J]. 测绘学报, 2004, 33(3):205-209.
- [9] 路晓峰, 贾小林, 杨志强. 利用 SLR 和 GPS 双频相位平滑伪距资料测定导航卫星钟差 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(3):237-240.
- [10] COHENOUR C, GRASS F R. GPS orbit and clock error distributions [J]. Navigation, 2011, 58(1):17-28.
- [11] HENG L, GAO X X, WALTER T, et al. Statistical characterization of GPS signal-in-space errors [C]//Institute of Navigation-International Technical Meeting (ION ITM), 2011:312-319.
- [12] 刘万科, 任杰, 曾琪, 等. 2013—2015 年 BDS 空间信号测距误差的精度评估 [J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3):1-6.
- [13] 彭小强, 高井祥, 王坚. WGS84 和 CGCS2000 坐标转换研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(2):219-221.

(上接第 55 页)

- Driven Optimization (WDO): a novel nature-inspired optimization algorithm and its application to electromagnetics [C]//IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society, 2010:1-4.
- [8] SUN J, WANG X, HUANG M, et al. A cloud resource allocation scheme based on microeconomics and wind driven optimization [C]//ChinaGrid Conference, IEEE Computer Society, 2013:34-39.
 - [9] BAYRAKTAR Z, KOMURCU M, BOSSARD J A, et al. The wind driven optimization technique and its application in electromagnetics [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(5):2745-2757.
 - [10] 陈客松, 韩春林, 何子述. 一种有阵元间距约束的稀布阵天线综合方法 [J]. 电波科学学报, 2007, 22(1):27-32.
 - [11] 孙绍国. 基于粒子群算法的非均匀稀布阵列综合 [J]. 火控雷达技术, 2014, 43(1):14-17.
 - [12] 万再莲. 数字多波束形成与波束跟踪算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.