

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.08.008

引用格式:和洁,冯大政,孟超,等.采用遗传算法的 MIMO 雷达 L 型阵列稀布优化[J].电讯技术,2015,55(8):872-878. [HE Jie, FENG Dazheng, MENG Chao, et al. L-shape Sparse Array Optimization Based on Genetic Algorithm in MIMO Radar[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(8):872-878.]

采用遗传算法的 MIMO 雷达 L 型阵列稀布优化*

和 洁^{1,2,**},冯大政²,孟 超³,马 仑¹

(1. 长安大学 信息工程学院 通信工程系,西安 710064;2. 西安电子科技大学 雷达信号处理重点实验室,西安 710071;
3. 陕西省气象局,西安 710014)

摘 要:针对多输入多输出(MIMO)雷达阵列稀布导致栅瓣效应的问题,研究了 L 型阵列方向图综合方法。通过在发射和接收阵列的阵元位置中引入随机扰动,同步优化收发阵列,对 MIMO 雷达 L 型阵列等效构造的虚拟矩形平面阵列进行二维方向图综合,并且对遗传算法的变异算子进行改进,提高全局搜索性,从而有效抑制栅瓣,降低二维合成方向图中方位维和俯仰维的峰值旁瓣电平。仿真实验证明了所提算法的有效性。

关键词:MIMO 雷达;L 型阵列;遗传算法;方向图综合

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)08-0872-07

L-shape Sparse Array Optimization Based on Genetic Algorithm in MIMO Radar

HE Jie^{1,2},FENG Dazheng²,MENG Chao³,MA Lun¹

(1. Department of Communication Engineering, School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;
3. Shaanxi Province Meteorology Bureau, Xi'an 710014, China)

Abstract: In order to avoid the grating lobe effect in multiple-input multiple-output(MIMO) radar caused by array sparse distribution, a synthesis and optimization algorithm of L-shape sparse array in MIMO radar is proposed. Two-dimensional pattern synthesis is achieved with L-shape sparse array in MIMO radar which is equivalent to virtual rectangular plane array. Both the transmitting and receiving antenna array geometries are optimized through introducing a random perturbed variable, so that the grating lobe can be suppressed and two-dimensional pattern synthesis with lower relative sidelobe levels in both azimuth and elevation dimensions can also be obtained. In the proposed method, mutation operation in classic genetic algorithm is modified to enhance the global search capability. Simulation results indicate the validity of the proposed methods.

Key words: MIMO radar; L-shape array; genetic algorithm; pattern synthesis

1 引 言

在许多工程应用中,需要使用较少天线阵元达到分辨率等技术指标,节约天线系统成本,因此,经常采用天线阵元在阵列孔径上稀疏分布的方式^[1]。而天线的最大旁瓣电平是衡量天线性能的一个重要参数,如何尽可能降低稀布阵列的最大旁瓣电平一

* 收稿日期:2015-02-02;修回日期:2015-06-02 Received date:2015-02-02;Revised date:2015-06-02
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401045);中央高校基本科研业务费项目(2013G1241106)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61401045);The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2013G1241106)

** 通讯作者:hejie@chd.edu.cn Corresponding author:hejie@chd.edu.cn

直都是稀布天线阵列综合的重要研究课题。近年来,常规的阵列稀布方法例如 Chebyshev-Dolph 综合法^[2]、遗传算法^[3-5]、模拟退火算法^[6]等都获得了广泛且深入的研究,但都是基于收发共用的阵列天线实现方向图综合。而多输入多输出(Multiple-input Multiple-output, MIMO)雷达^[7-10]使用多个天线阵元发射波形分集信号扫描目标,同时利用多个天线阵元接收目标散射信号,且收发天线可以分置不共用,因此不能直接使用传统的阵列综合方法,需要寻求适用于 MIMO 雷达天线的稀布设计算法。

MIMO 雷达的波形分集特性能够形成多个等效相位中心,提高系统自由度,从而增大目标最大可辨识数,增强杂波抑制能力。L 型阵列的 MIMO 雷达能够充分利用这一优势,通过两个线阵 L 型垂直布阵等效构造虚拟平面阵列^[11-13],对实际应用中处于三维空间的目标信号在方位维和俯仰维进行二维处理。文献[11-13]均针对 MIMO 雷达 L 型阵列的波达方向估计方法展开研究,其中文献[11]对 L 型阵列划分子阵并构造估计矩阵实现二维角度估计,文献[12]通过推导目标方位角和俯仰角的闭解式有效降低了算法计算量,文献[13]提出一种将二维估计分解为两个一维估计的算法大大降低了运算量。然而,目前利用 MIMO 雷达 L 型阵列的优势进行布阵优化的研究较少。因此,本文针对 MIMO 雷达 L 型阵列稀布设计问题,利用 L 型阵列可以等效为平面矩形阵列进行二维信号处理的优势,综合考虑接收和发射阵列孔径对布阵优化后进行波束形成的综合方向图的影响,对发射和接收非均匀线阵阵元位置进行同步优化。

2 信号模型

假设一个 MIMO 窄带雷达系统中,两个线阵分别在 X 轴和 Y 轴垂直呈 L 型分布,如图 1 所示。

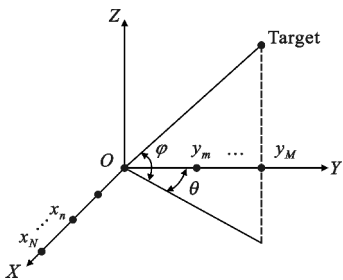


图 1 MIMO 雷达 L 型阵列结构

Fig. 1 MIMO radar L-shape array structure

X 轴方向线阵为发射阵列,由 N 个阵元组成,阵元间距为 d_t ,各阵元发射正交多相编码窄带信

号^[10];Y 轴方向为接收线阵列,由 M 个阵元组成,阵元间距为 d_r ,两个线阵共用位于原点的阵元。设 X 轴上第 n 个发射阵元发射的信号到达目标的波程差为

$$\Delta_m = (n-1)d_t \cos\varphi \sin\theta, n=1,2,\cdots,N, \quad (1)$$

而 Y 轴上第 m 个接收阵元接收目标信号的波程差为

$$\Delta_{rm} = (m-1)d_r \cos\varphi \cos\theta, m=1,2,\cdots,M, \quad (2)$$

假设存在目标所在方位角和俯仰角分别为 θ_0 和 φ_0 ,则接收阵列的信号为

$$\mathbf{X} = \beta \mathbf{a}_r(\theta_0, \varphi_0) \mathbf{a}_t^T(\theta_0, \varphi_0) \mathbf{S} + \mathbf{Z}. \quad (3)$$

式中, β 是 (θ_0, φ_0) 方向目标回波的复幅度; $\mathbf{a}_t(\theta_0, \varphi_0) = [1, e^{-j2\pi\Delta_{t2}/\lambda}, \cdots, e^{-j2\pi\Delta_{tN}/\lambda}]^T$ 和 $\mathbf{a}_r(\theta_0, \varphi_0) = [1, e^{-j2\pi\Delta_{r2}/\lambda}, \cdots, e^{-j2\pi\Delta_{rM}/\lambda}]^T$ 分别为发射阵列和接收阵列的导向矢量, λ 为发射信号波长; $\mathbf{S}$ 为发射信号; $\mathbf{Z}$ 是接收信号中的白噪声。

令 $\mathbf{A}_{tr}(\theta_0, \varphi_0) = \mathbf{a}_r(\theta_0, \varphi_0) \mathbf{a}_t^T(\theta_0, \varphi_0)$ 为收发综合导向矢量矩阵,

$$a_{nm} = e^{-j2\pi(\Delta_m + \Delta_{rm})/\lambda} = e^{-j2\pi((n-1)d_t \cos\varphi_0 \sin\theta_0 + (m-1)d_r \cos\varphi_0 \cos\theta_0)/\lambda}$$

表示 $\mathbf{A}_{tr}(\theta_0, \varphi_0)$ 中第 (n, m) 个元素,则可以看出, L 型阵列第 n 个发射阵元发射经过目标反射后到达第 m 个接收信号的总波程差等于矩形平面 X 轴坐标为 $(n-1)d_t$ 、Y 轴坐标为 $(m-1)d_r$ 的虚拟阵元波程差,即 MIMO 雷达 L 型阵的接收阵元可以等效为 $M \times N$ 维虚拟平面阵列的接收阵元^[11]。图 2 举例说明了 $M=5, N=4$ 的 L 型阵列等效成平面阵列的构造关系,其中位于原点位置的阵元为收发共用。图中“ $\cdot$ ”表示 MIMO 雷达 L 型阵列阵元,“ $\circ$ ”表示虚拟平面阵元。

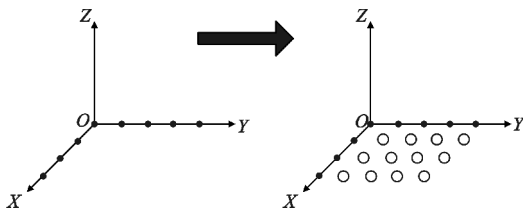


图 2 虚拟平面阵列构造过程

Fig. 2 Construction of the virtual plane array

3 算法描述

遗传算法是借鉴生物的自然选择和遗传进化机制开发出的全局优化自适应概率搜索算法,对最优化的求解具有普遍适用性^[1]。一般是从一个初始种群开始,以适应度函数为依据衡量每个个体的优

劣程度,经过选择(挑选优势个体)、交叉(交换优势个体的基因信息)、变异(保持种群多样性)等遗传和进化操作,产生新一代种群,种群一代一代地进化,直到达到预先给定的精度或进化世代数。

3.1 创建种群

假设一个 MIMO 雷达窄带系统, N 个发射阵元和 M 个接收阵元垂直放置成 L 型阵列,发射天线孔径和接收孔径分别为 $L_t > (N - 1) \lambda/2$ 和 $L_r > (M - 1) \lambda/2$,将发射和接收阵元分别在发射和接收阵列孔径内等间距均匀分布设为布阵优化的初始位置。此时,发射和接收阵列的阵元间距均超过半波长,直接进行波达方向估计,必然会产生较高的旁瓣电平,引起栅瓣效应,必须进行阵列优化。对发射和接收阵列阵元引入随机距离扰动,使每一个阵元在给定的扰动范围内随机变化。在所提算法中,与种群编码操作结合,将发射和接收阵列阵元的实际扰动范围均匀等分,并对等分点进行编码。在进化迭代中,设等分点与当代种群的阵元位置之间的位移为随机扰动值,每一代进化中,根据随机扰动值改变接收和发射阵元所在位置,从而产生新的天线阵列种群。

3.2 适应度函数

设编码信号长度为 K ,发射信号相关矩阵 $\mathbf{R}_{ss} = \mathbf{SS}^H / K$,则接收信号经过脉冲压缩后的回波为

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{K} \mathbf{X} \mathbf{S}^H = \beta \mathbf{a}_t(\theta_0, \varphi_0) \mathbf{a}_r^T(\theta_0, \varphi_0) \mathbf{R}_{ss} + \frac{1}{K} \mathbf{Z} \mathbf{S}^H \quad (4)$$

由于正交相位编码信号协方差矩阵近似为单位阵,即 $\mathbf{R}_{ss} = \mathbf{I}_N$ 。公式(4)向量化后可以表示为

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \text{vec}(\mathbf{Y}) = \beta \mathbf{a}_r(\theta_0, \varphi_0) + \text{vec}\left(\frac{1}{K} \mathbf{Z} \mathbf{S}^H\right) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{a}_r(\theta_0, \varphi_0) = \mathbf{a}_t(\theta_0, \varphi_0) \otimes \mathbf{a}_r(\theta_0, \varphi_0)$,而 $\otimes$ 表示 kronecker 积。综合方向图可以表示为

$$Pr = \mathbf{w}^H \mathbf{a}_r(\theta_0, \varphi_0) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{w} = \mathbf{a}_t(\theta, \varphi) \otimes \mathbf{a}_r(\theta, \varphi)$ 。这样,式(6)可以表示为

$$Pr(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (x_n (\cos\varphi \sin\theta - \cos\varphi_0 \sin\theta_0) + y_m (\cos\varphi \cos\theta - \cos\varphi_0 \cos\theta_0))) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 和 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 分别为发射阵元和接收阵元位置坐标,均假设原点阵元为参考点建立坐标,即 $x_1 = 0, y_1 = 0$ 。以降低稀疏阵列的峰值旁瓣电平为目标,选择最大相对旁瓣电平(Max Relative Sidelobe Level, Max RSLL)^[14-15]构造

适应度函数

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_M) = \max \text{RSLL} = 10 \lg \left| \frac{Pr_{\max_rsll}}{Pr_{\max}} \right|^2 \quad (8)$$

式中, $Pr_{\max_rsll}$ 为最大相对旁瓣电平, $Pr_{\max}$ 为主瓣电平。由于最大旁瓣电平为负值,故选取适应度函数为

$$\text{fitness} = \min \{f(x_1, x_2, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_M)\} \quad (9)$$

3.3 改进变异算子

变异算子决定了遗传算法的局部搜索能力,这里采用改进的基本位变异。基本位变异是对个体编码串中以变异概率 p_m 随机指定的某一位或某几位基因座上的基因值作变异运算。具体步骤为:

- (1) 对个体的每一个基因座,依变异概率 p_m 指定其为变异点;
- (2) 对每一个指定的变异点,对其基因值做取反运算或用其他等位基因值来代替,从而产生出一个新的个体。

由于变异发生概率较小不利于全局搜索,所提算法对经典基本位变异进行改进,令第 t 代种群的变异算子为

$$p_m(t) = p_{m0} + t^4 (0.9 - p_{m0}) / T^4 \quad (10)$$

式中, p_{m0} 为初始变异算子, T 为进化世代数总数。可以看出,随着进化世代数的增加,变异概率逐步增大,从而改善遗传算法的全局搜索能力。

为了进一步提高布阵优化性能,将第一次优化得到的阵元位置设为阵元初始位置,给定每一个阵元较小的扰动范围,再次进行布阵优化,即在初次优化的位置附近进行微调,努力寻求全局最优解,避免算法收敛于次最优位置。算法流程如图 3 所示。

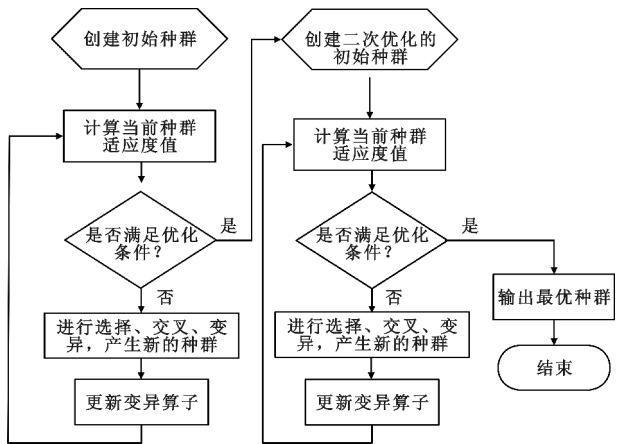


图 3 算法的流程图
Fig. 3 The algorithm flow chart

4 实验仿真

采用 L 型稀布阵列的 MIMO 雷达系统,发射阵元数 $N=10$,发射天线的孔径 $L_t=(N-1)\lambda$,接收阵元数 $M=10$,接收天线的孔径 $L_r=(M-1)\lambda$ 。假设目标角度为 $(45^\circ,45^\circ)$ 。初始阵元均匀分布,此时天线稀布率约为 52.6%,依照所提算法建立初始种群。

图 4 为布阵优化前阵列综合方向图及其等高线图。可以看出,若不进行稀布阵列优化,栅瓣效应明显,无法分辨出目标所在角度。

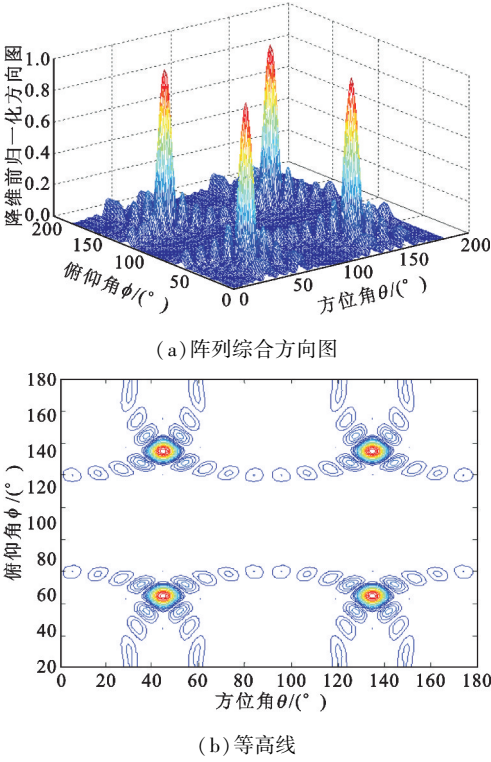


图 4 布阵优化前阵列综合方向图及其等高线图
Fig.4 Array pattern and its contour plot before optimization

图 5 为传统遗传算法和所提算法两次优化的适应度函数收敛曲线,种群分别收敛至 $-15.759\ 8\ \text{dB}$ 、 $-17.416\ 8\ \text{dB}$ 和 $-18.680\ 7\ \text{dB}$ 。

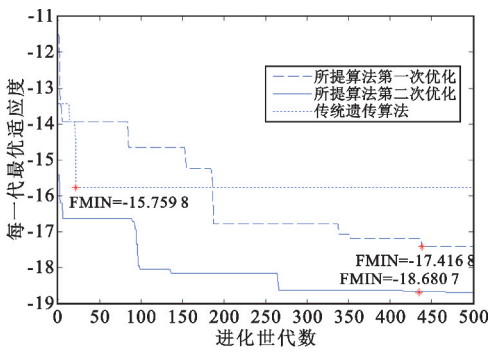


图 5 适应度函数收敛曲线对比
Fig.5 The comparison of the fitness function convergence

图 6 为阵列两次优化后的综合方向图及其等高线图,图 7 为布阵后传统遗传算法和所提算法两次优化的方位维和俯仰维的方向图切面对比。从仿真结果可以看出,经过布阵优化,阵列合成方向图能够克服栅瓣效应,并且经过两次优化,最大相对旁瓣电平得到了进一步有效抑制,相对于传统遗传算法,所提算法能够有效避免算法收敛于次最优解,有效降低旁瓣电平。

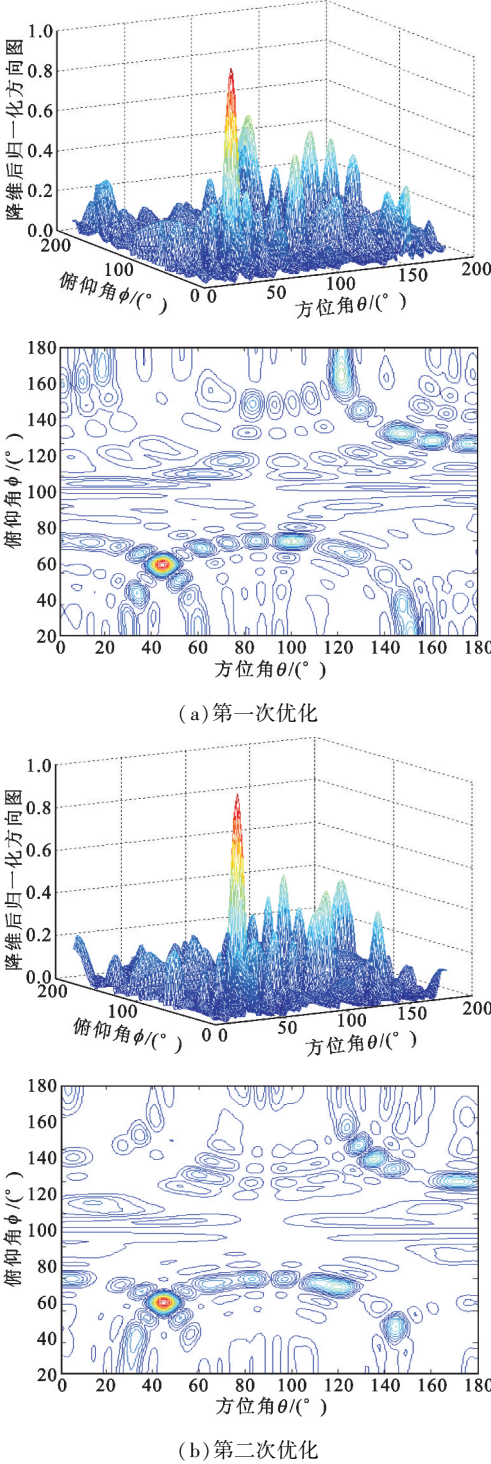


图 6 阵列优化后的综合方向图及其等高线图
Fig.6 Array patterns and contour plots after optimization

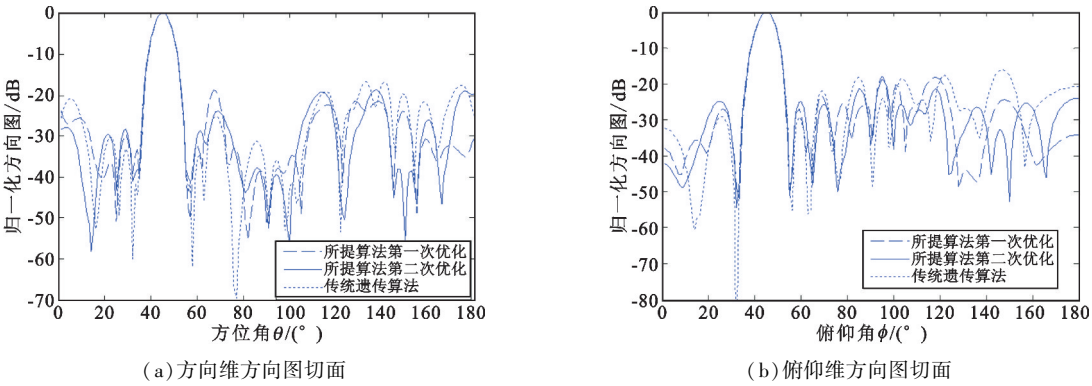


图 7 布阵后方位维和俯仰维的方向图切面对比
Fig.7 Beam patterns in azimuth and elevation views after optimization

表 1 给出了所提算法两次进行布阵优化后的阵元位置,单位为波长。

表 1 两次优化所得接收和发射阵列的阵元位置

Table 1 Relative antenna positions of the transmitting and receiving arrays after two times optimization

优化次序	x										y									
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	y ₉	y ₁₀
第一次	0	1.187 5	1.500 0	2.750 0	3.687 5	5.312 5	5.937 5	7.375 0	8.437 5	9.000 0	0	0.500 0	2.000 0	3.375 0	3.875 0	4.562 5	5.500 0	6.875 0	8.437 5	9.000 0
第二次	0	0.750 0	2.000 0	2.5000	3.937 5	4.500 0	5.875 0	7.125 0	7.875 0	9.000 0	0	0.500 0	2.437 5	3.187 5	3.750 0	5.000 0	6.375 0	7.312 5	7.687 5	9.000 0

图 8 为假设目标角度为(30°,60°),使用所提算法阵列优化后得到的稀布阵,即表 1 中阵元位置,进行阵列波束形成得到的综合方向图及其等高线图。

图 9 进行了所提算法与传统遗传算法的方向图切面比较,可以看出,算法能够克服目标角度位置影响,具有良好的通用性。

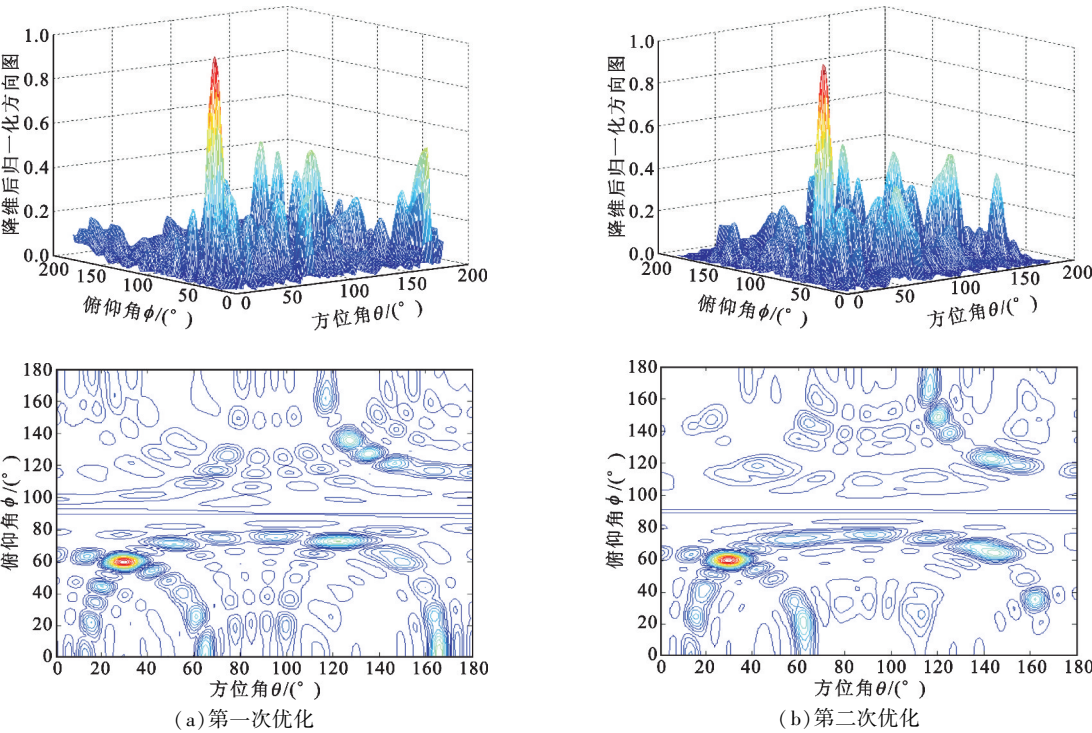


图 8 目标位于(30°,60°)布阵优化后综合方向图及其等高线图
Fig.8 Array patterns and contour plots after optimization at $\theta=30^\circ$ and $\varphi=60^\circ$

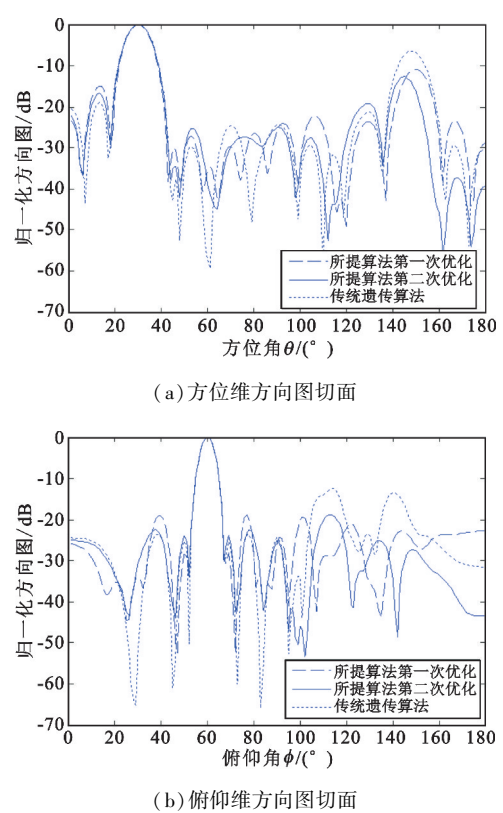


图 9 目标位于(30°,60°)布阵优化后方位维和俯仰维的方向图切面对比

Fig. 9 Beam patterns in azimuth and elevation views after optimization at $\theta=30^\circ$ and $\varphi=60^\circ$

5 结束语

MIMO 雷达 L 型稀疏阵列的二维波束形成方向图存在明显栅瓣效应,且收发阵元位置均对方向图造成影响。针对这个问题,本文提出了一种基于遗传算法的 MIMO 雷达 L 型阵列稀疏优化算法,对 L 型阵列的发射天线和接收天线的位置进行同步优化,并对经典遗传算法的变异算子进行改进,改善遗传算法容易陷入局部最优而早熟收敛的情况,并且通过将第一次优化的阵元位置设为第二次优化的初始值再次进行优化,避免算法收敛于次最优解,有效解决了 MIMO 雷达天线二维方向图综合中的栅瓣效应以及方位维和俯仰维低旁瓣电平设计问题。仿真结果证明了所提算法能够有效克服栅瓣效应,降低最大旁瓣电平,且具有良好的通用性,为 MIMO 雷达稀疏阵列应用于实际工程提供了理论支持。下一步将会对存在通道误差等系统环境因素情况下本文算法的适用性做进一步研究。

参考文献:

[1] 陈容松. 稀疏天线阵列的优化布阵技术研究[D]. 成

都:电子科技大学,2006.

CHEN Kesong. Research on synthesis and optimization techniques of sparse antenna arrays[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)

[2] 王朴中,石长生. 天线原理[M]. 北京:清华大学出版社,1993:71-75.

WANG Puzhong, SHI Changsheng. Antenna principle [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1993:71-75. (in Chinese)

[3] Haupt R L. Thinned arrays using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1994,42 (7):993-999.

[4] 张妍,冯大政,曲小宁. 枝切法与曲面拟合结合的 InSAR 相位展开算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012,39(5):47-53.

ZHANG Yan, FENG Dazheng, QU Xiaoning. Hybrid phase unwrapping algorithm combining branch-cut and surface-fitting for InSAR [J]. Journal of Xidian University, 2012,39(5):47-53. (in Chinese)

[5] 杨朝阳,杨霄鹏,李腾,等. 基于遗传算法的 OFDM 高精度盲频偏估计器[J]. 电讯技术,2014,54(11):1522-1527.

YANG Zhaoyang,YANG Xiaopeng,LI Teng,et al. High accuracy blind carrier frequency offset estimator based on genetic algorithm for OFDM systems [J]. Telecommunication Engineering,2014,54(11):1522-1527. (in Chinese)

[6] 杨勇,谭渊,张晓发,等. 基于模拟退火算法的阵列模型有源校正方法 [J]. 国防科技大学学报,2011,33 (1):91-94.

YANG Yong,TAN Yuan,ZHANG Xiaofa,et al. Calibration of Array Model with Multiple Sources Based on Simulated Annealing [J]. Journal of National University of Defense Technology,2011,33(1):91-94. (in Chinese)

[7] Bliss D W,Forsythe K W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: Degrees of freedom and resolution[C]//Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, Computers. Pacific Grove,CA:IEEE,2003:54-59.

[8] Lehmann N H,Fishler E,Haimovich A M,et al. Evaluation of transmit diversity in MIMO-Radar direction finding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5):2215-2225.

[9] Bekkerman I,Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2006,54(10):3873-3883.

[10] Li J,Stoica P,Xu L,et al. On parameter identifiability of MIMO radar[J]. IEEE Signal Processing Letters,2007, 14(12):968-971.

[11] 符谓波,赵永波,苏涛,等. 基于 L 型阵列 MIMO 雷达的 DOA 矩阵方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33 (11):2398-2403.

- FU Weibo, ZHAO Yongbo, SU Tao, et al. DOA matrix method based on MIMO radar with L-shape arrays[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33 (11): 2398-2403. (in Chinese)
- [12] 郭艺夺,张永顺,童宁宁,等. 基于 L 型 MIMO 雷达二维 DOA 估计新算法[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8 (5): 412-416.
- GUO Yiduo, ZHANG Yongshun, TONG Ningning, et al. New algorithm for 2 - D DOA estimation based on L shaped MIMO radar[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8 (5): 412-416. (in Chinese)
- [13] 王伟,王晓萌,李欣,等. 基于 MUSIC 算法 L 型阵列 MIMO 雷达降维 DOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36 (8) : 1954-1959.
- WANG Wei, WANG Xiaomeng, LI Xin, et al. Reduced-dimensional DOA estimation based on MUSIC algorithm in MIMO radar with L-shaped array[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36 (8) : 1954-1959. (in Chinese)
- [14] 陈客松,何子述,韩春林. 利用 GA 实现非对称稀疏线阵旁瓣电平的优化[J]. 电子与信息学报, 2007, 29 (4) : 987-990.
- CHEN Kesong, HE Zishu, HAN Chunlin. Sidelobe reduction of asymmetric linear thinned arrays using genetic algorithm [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29 (4) : 987-990. (in Chinese)
- [15] Mantawy A H, Abdel-Magid Y L, Selim S Z. Integrating genetic algorithms, Tabu search, and simulated annealing for the unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (3) : 829-836.

作者简介:



和 洁 (1985—), 女, 陕西西安人, 2011 年于西安电子科技大学获通信与信息处理专业博士学位, 现为长安大学信息与工程学院讲师, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理;

HE Jie was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1985. She received the Ph. D. degree from Xidian University in 2011. She is now a lecturer. Her research concerns array signal processing and radar signal processing.

Email: hejie@chd. edu. cn

冯大政 (1959—), 男, 陕西紫阳人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达成像、阵列信号处理、盲信号处理等;

FENG Dazheng was born in Ziyang, Shaanxi Province, in 1959. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns radar imaging, array signal processing and blind signal processing.

孟 超 (1985—), 男, 陕西西安人, 2010 年于西安电子科技大学获硕士学位, 主要研究方向为雷达图像处理、自适应信号处理等;

MENG Chao was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1985. He received the M. S. degree from Xidian University in 2010. His research concerns radar image processing and adaptive signal processing.

马 仑 (1981—), 男, 北京人, 博士, 副教授, 主要研究方向为机载 SAR 成像、多通道阵列误差校正等。

MA Lun was born in Beijing, in 1981. He is now an associate professor with the Ph. D. degree. His research concerns airborne SAR imaging and multichannel array error correction.