

引用格式:孙立娟,张贞凯,刘新星.基于改进差分进化算法的时间调制阵列多波束优化形成[J].电光与控制,2019,26(12):39-43. SUN L J, ZHANG Z K, LIU X X. An optimized multi-beam forming method of time-modulated array based on improved differential evolution algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(12):39-43.

基于改进差分进化算法的时间调制阵列多波束优化形成

孙立娟, 张贞凯, 刘新星
(江苏科技大学, 江苏 镇江 212000)

摘要:提出了一种基于时间调制阵列的数字多波束形成方法。时间调制阵列会产生基波分量和各次谐波分量,通过调整各个单元的控制时序,实现谐波分量的幅度和相位综合,可以在正负第一次谐波处实现期望方向的波束形成。同时采用改进差分进化算法来优化控制时序,进一步降低最大旁瓣电平,实现两个指向不同的数字波束的设计。最后通过与时间调制阵列波束形成和基于基本差分进化算法的时间调制阵列波束形成对比,验证了该算法在数字多波束形成中的可行性和有效性。

关键词:时间调制阵列;控制时序;差分进化算法;最高旁瓣电平

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.12.008

An Optimized Multi-beam Forming Method of Time-Modulated Array Based on Improved Differential Evolution Algorithm

SUN Li-juan, ZHANG Zhen-kai, LIU Xin-xing
(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: A digital multi-beam forming method based on time modulation array is proposed. The time modulation array will generate fundamental component and each sub-harmonic component. By adjusting the sequence control of each unit, the amplitude-phase synthesis of the harmonic component is realized, and the beam forming in the desired direction is realized at the the first positive and negative sub-harmonic wave. The improved differential evolution algorithm is used to optimize the sequence control, further reduce the maximum sidelobe level, and realize the design of two digital beams of different directions. The feasibility and effectiveness of the proposed algorithm in digital multi-beam forming are verified by comparison with the time-modulated array beam-forming method and the time-modulated array beam-forming method based on basic differential evolution algorithm.

Key words: time-modulated array; sequence control; differential evolution algorithm; maximum sidelobe level

0 引言

近年来,随着无线通信与雷达技术的迅猛发展,传统天线的形式单一,辐射特性容易受到限制,不能按要求灵活地改变,因此难以适应现代化的需求。而随着电磁环境的日益复杂,传统天线技术面临着更为苛刻的要求及全新的挑战^[1-3]。时间调制阵列天线(Time

Modulated Linear Array, TMLA)作为一种新的阵列天线应运而生,它可以解决传统天线设计中的难题^[4],在常规的天线设计中引入“时间”维度,从而将对天线的幅相控制转化为对连接在各个阵元上射频开关控制时序的控制。同时,时间调制阵列结构简单,具有许多特有的辐射特性,可以满足当代对高性能、低成本天线系统的要求^[5]。目前,国内外学者在时间调制阵列的波束形成方面已取得一些成果,文献[6-8]利用差分进化(Differential Evolution, DE)算法优化时间调制阵列的控制时序,实现了第一次谐波分量的波束形成;文献[9]研究了时间调制线性阵列的谐波波束形成特性,利用粒子群优化算法对其方向图进行优化;文献[10]

收稿日期:2018-12-05 修回日期:2019-04-26

基金项目:国家自然科学基金(61871203);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_1687, SJCX18_0766)

作者简介:孙立娟(1990—),女,河北石家庄人,硕士生,研究方向为阵列信号处理。

利用时间调制阵列实现多通道自适应波束形成的基本概念,并通过数值仿真进行了验证。目前基于时间调制阵列的波束形成的研究还比较少,波束形成性能还有很大提升空间。

在以上成果的基础上,本文采用一种改进差分进化算法,即采用基于种群聚集度的自适应变异算子^[11-13]优化控制时序,可以进一步降低最大旁瓣电平,实现两个指向不同的数字波束的设计,且最大旁瓣电平很低。该算法不仅可以提高收敛速度,还能解决因种群多样性下降算法陷入局部最优而导致的早熟问题。

1 基于时间调制阵列的波束形成

时间调制阵列的基本结构如图 1 所示。与传统天线阵列相比,时间调制阵列的不同之处在于每个天线阵元前端都连接了一个射频开关。通过控制各个阵元的控制时序来实现天线幅度和相位的加权,从而降低了硬件系统的复杂程度,也避免了实现超低旁瓣过程中激励动态范围比过大引起的一系列问题,能够丰富阵列天线理论,满足日益复杂的电磁环境对阵列天线的要求。

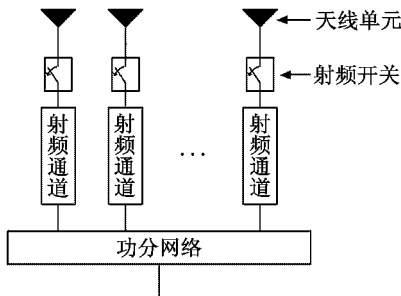


图 1 时间调制阵列的基本结构

Fig. 1 Basic structure of a time modulation array

一个阵元数为 N 、阵元间距为 $1/2$ 波长的均匀线阵,阵元均为理想的全向性单元,当每个阵元都连接一个射频开关时,时间调制阵列的方向图可表示为^[14]

$$F(\theta, t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{k=1}^N A_k e^{j\alpha_k} U_k(t) \cdot e^{j(k-1)\beta d \sin \theta} \quad (1)$$

式中: f_0 是阵列的中心频率; A_k 和 α_k 分别是第 k 个阵元的静态激发幅度和相位; d 是阵元间距; $\beta = 2\pi f_0 / c$, c 是自由空间中的光速; θ 为扫描范围, $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。

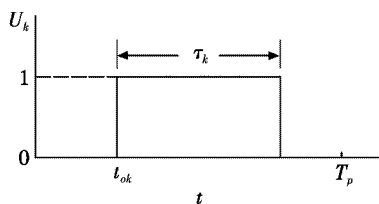


图 2 第 k 个通道上的控制时序

Fig. 2 Sequence control on the k th channel

如图 2 所示,第 k 个阵元的控制时序 $U_k(t)$ 为

$$U_k(t) = \begin{cases} 1 & t_{0k} \leq t \leq t_{0k} + \tau_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_{0k} 是开关打开的时刻; τ_k 是开关打开的持续时间。由于 $U_k(t)$ 的周期性,式(1)的空间和频率响应可以通过将其分解为傅里叶级数来获得,每个频率分量的频率为 n/T_p , $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$, 其中, T_p 是时间调制周期。故式(1)的 n 阶傅里叶分量可以写成

$$F_n(\theta) = \sum_{k=1}^N \alpha_{n,k} \cdot e^{-j(k-1)\pi \sin \theta} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{n,k}$ 是复振幅,即

$$\alpha_{n,k} = A_k \cdot \frac{\sin(n\pi f_p \tau_k)}{n\pi} \cdot e^{-jn\pi f_p (2t_{0k} + \tau_k)} \quad (4)$$

式中: $f_p = 1/T_p$; t_{0k} 和 τ_k 可以在一个时间调制周期 T_p 中归一化。因此,根据式(3)和式(4),在中心频率 ($n=0$)、正第一次谐波 ($n=1$) 和负第一次谐波 ($n=-1$) 处的时间调制阵列的方向图可以分别写成

$$F_0(\theta) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot T_k \cdot e^{-j(k-1)\pi \sin \theta} \quad (5)$$

$$F_1(\theta) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \frac{\sin(\pi T_k)}{\pi} \cdot e^{-j\pi(2T_{0k} + T_k)} \cdot e^{-j(k-1)\pi \sin \theta} \quad (6)$$

$$F_{-1}(\theta) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \frac{\sin(\pi T_k)}{\pi} \cdot e^{j\pi(2T_{0k} + T_k)} \cdot e^{-j(k-1)\pi \sin \theta} \quad (7)$$

式中: $T_k = \tau_k/T_p$; $T_{0k} = t_{0k}/T_p$ 。由式(5)~式(7)可知, $T_k \in [-0.5, 0.5]$ 和 $T_{0k} \in [-0.5, 0.5]$ 。令激励为 $g_k = A_k \sin(\pi T_k)$, 则 g_k 可以是特定的分布,如切比雪夫和泰勒分布,这里通过切比雪夫求出激励 g_k , 则 T_k 和 T_{0k} 分别为

$$T_k = (1/\pi) \cdot \arcsin\left(\frac{g_k}{A_k}\right) \quad (8)$$

$$T_{0k} = \frac{1}{2} \left[\frac{(k-1)\pi \cdot \sin \theta_0}{\pi} - T_k \right] \quad (9)$$

$\pm \theta_0$ 为期望方向。

2 数字多波束形成设计

2.1 改进的差分进化算法

差分进化(DE)算法是一种模拟种群进化差异的启发式随机搜索算法。DE算法的优点是参数少、过程简单、适应性强,在解决复杂的全局优化问题方面的性能突出,这些优点使其在解决实际优化问题方面得到了广泛的应用。然而,DE算法也存在收敛速度慢和易陷入局部最优等缺陷,尤其是在后期阶段,种群多样性降低,易使算法陷入局部最优^[15]。为提高DE算法种群的多样性,避免早熟,加快收敛速度,本文提出一种

改进 DE 算法,该算法采用基于种群聚集度的自适应变异算子,算法流程如图 3 所示。

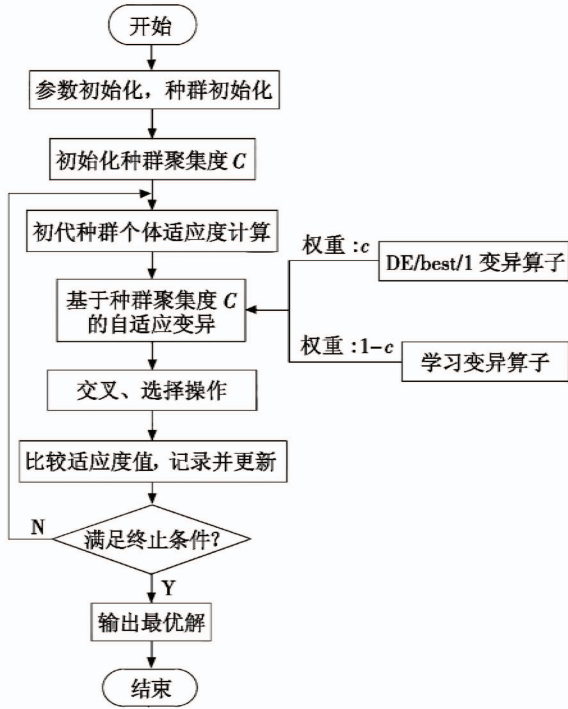


图 3 改进 DE 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the improved DE algorithm

这种改进 DE 算法依据种群个体的聚集度自适应地调整 DE/best/1 变异算子和学习变异算子的变异权重:在进化初期,个体分散,DE/best/1 变异算子的权重较大,提高收敛速度;而在进化后期,种群个体之间的差异性变小,种群聚集度高,学习变异算子的权重增大,从而提高种群的多样性,避免算法陷入局部最优,进一步提高算法的精度。本文采用改进 DE 算法优化每个阵元的控制时序,降低时间调制阵列形成波束的最大旁瓣电平,进一步优化形成波束的性能。

为了简化分析,静态振幅分布 A_k 被选为均匀分布的。通过文献[6]可知:只改变每个阵元开关打开的时刻 t_{ok} ,谐波的波束指向就会改变;而只改变每个阵元开关打开的持续时间 τ_k ,谐波的波束指向不变。因此,以开关打开的持续时间 τ_k 为优化变量,目标函数为

$$f = \omega_1 \cdot (p_{0_max} - T_{SLL}) + \omega_2 \cdot (p_{1_max} - T_{SLL}) + \omega_3 \cdot (p_{2_max} - T_{SLL}) \quad (10)$$

式中: T_{SLL} 是设定的最大旁瓣电平的阈值; p_{0_max} , p_{1_max} 和 p_{2_max} 分别是基波、正负第一次谐波的最大旁瓣峰值; ω_1 , ω_2 和 ω_3 分别是每项的权重。

2.2 算法设计流程及优化步骤

由于周期性的时间调制,时间调制阵列会产生基波分量和各次谐波分量,基波分量方向图始终指向阵列

的法向,可用于方向图综合,各次谐波分量的幅度和相位均可以通过控制时序来改变,可用于波束形成。考虑一个阵元数为 N 的时间调制阵列,阵元间距为 $1/2$ 波长,阵元均为理想的全向性单元。时间调制阵列的优化目标是使得正第一次谐波分量和负第一次谐波分量的方向图分别指向 $\pm \theta_0$,并且使得其栅瓣电平都小于 R_0 。利用切比雪夫方法对阵列进行加权,求出其中各阵元的激励 g_k 。根据各阵元激励,通过式(8)和式(9)求出控制时序。

在确定各阵元的控制时序后,利用改进 DE 算法进行优化,具体步骤如下所述:

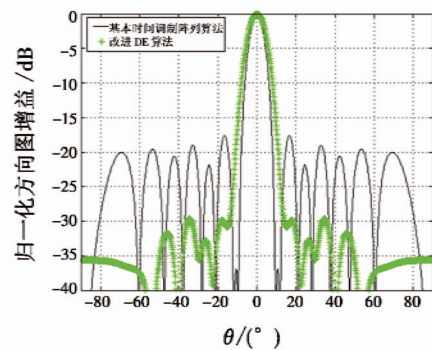
- 1) 初始化基于种群聚集度自适应变异的 DE 算法的参数,给定初始种群聚集度 C ;
- 2) 根据式(5)~式(7)计算初始状态下基波和正负第一次谐波的天线方向图,并根据式(10)计算适应度函数值,将当前控制时序下的解作为最优解;
- 3) 根据聚集度 C 的值调整 DE/best/1 变异算子和学习变异算子的权重,自适应变异;
- 4) 对变异完的个体进行交叉选择工作;
- 5) 计算当前的适应度函数,记录最优值,更新;
- 6) 判断是否满足终止条件,若满足则停止,输出结果,否则转到 2)。

3 实验仿真与分析

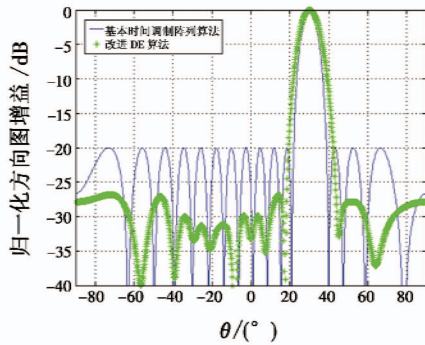
设置天线阵列的阵元数为 16,阵元间距为 $1/2$ 波长,期望方向 $\theta_0 = \pm 30^\circ$ 。参照文献[9],并经过多次仿真寻优后,改进 DE 算法的具体参数设置如下:变异算子初值 $F_v = 0.5$;交叉算子 $C_r = 0.9$;种群聚集度 $C \in [0.05, 0.95]$ 。

3.1 仿真 1

设置基波指向 0° ,正第一次谐波指向 20° ,种群数规模为 50,迭代次数为 200,将本文算法与基本时间调制阵列算法形成的波束性能作对比,其仿真结果如图 4 所示。



a 基波方向图



b 正第一次谐波方向图

图4 改进DE算法和基本时间调制阵列算法方向图
Fig.4 Directional diagrams of improved DE algorithm and the basic time modulation array algorithm

通过图4可以看出:基本时间调制阵列算法基波的峰值旁瓣电平最小值为-17.4 dB,正第一次谐波的峰值旁瓣电平为-20 dB;采用改进DE算法后,波束方向图性能接近,且基波和正第一次谐波的峰值旁瓣电平得到了进一步的优化,其中基波的峰值最小旁瓣电平降为-28.7 dB,正第一次谐波的峰值旁瓣电平降为-26.9 dB。由此可以得出,在将开关打开的持续时间作为优化变量后,天线方向图性能得到了很大的改善。

3.2 仿真2

设置基波指向0°,正第一次谐波指向20°,种群规模为50,迭代次数为200,将本文算法进行仿真并与基本DE算法的性能进行对比,分别如图5、图6所示。

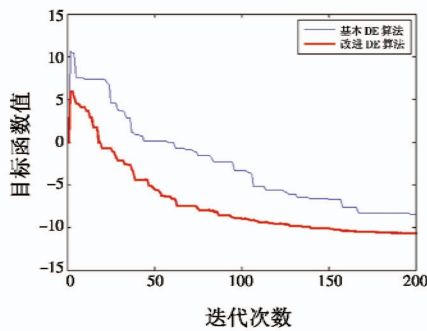
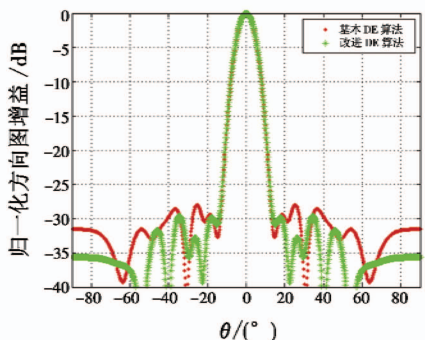
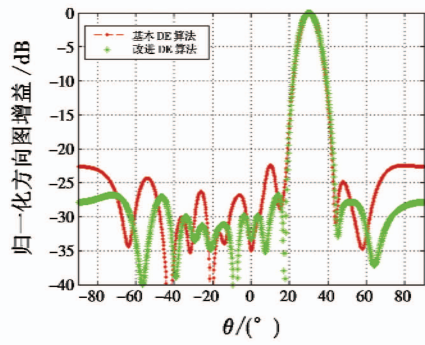


图5 目标函数迭代曲线

Fig.5 Objective function iteration curve



a 基波方向图



b 正第一次谐波方向图

图6 改进DE算法和基本DE算法方向图
Fig.6 Directional diagrams of the improved DE algorithm and the basic DE algorithm

从图6可以看出,两种算法都能在期望方向形成方向图,但本文算法在期望方向形成的方向图性能更好。经DE算法优化的基波的峰值旁瓣电平最小值为-28.3 dB,正第一次谐波的峰值旁瓣电平为-22.3 dB;采用改进DE算法后,波束方向图性能接近,且峰值旁瓣电平得到了进一步优化,其中基波的峰值最小旁瓣电平降为-28.7 dB,正第一次谐波的峰值旁瓣电平降为-26.9 dB。正负第一次谐波方向图近似一致,只是指向关于0°对称。

以上的仿真表明,改进DE算法有较好方向图效果,同时具有较快的收敛速度。该算法能依据种群个体当前的种群聚集度自适应地调整变异算子的变异权重,避免算法过早陷入局部最优导致的早熟问题,比其他常规方法具有更好的波束性能。

4 结论

本文将基于种群聚集度的改进DE算法应用到时间调制阵列的谐波波束形成上,以开关打开的持续时间为优化变量,以降低形成的基波和正负第一次谐波方向图的最高旁瓣电平为优化目标进行优化。仿真结果验证了本文算法的可行性和有效性。

时间调制阵列天线与传统阵列天线相比,在形成相同个数的子阵情况下可以形成更多的波束,且其系统结构简单、成本低廉,在实际应用中具有非常重要的意义。后续将进一步研究基于时间调制阵列的多波束形成技术。

参考文献

[1] LIER E, PURDY D, MAALOUF K. Study of deployed and modular active phased-array multibeam satellite antenna [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45 (5):34-45.

- [2] MAHANTI G K, DAS S, CHAKRABARTY A, et al. Design of reconfigurable array antennas with minimum variation of active impedances[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, 5(1):541-544.
- [3] LIM E H, LEUNG K W, SU C C, et al. Green antenna for solar energy collection[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, 9(2):689-692.
- [4] SHANKS H E, BICKMORE R W. Four-dimensional electromagnetic radiator[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2011, 37(3):263-275.
- [5] 雷亚杰. 基于压缩感知的时间调制阵列的 DOA 估计[D]. 西安:西安电子科技大学,2017.
- [6] LI G, YANG S W, CHEN Y K, et al. A novel electronic beam steering technique in time modulated antenna array[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, 97:391-405.
- [7] MANDAL S K, MAHANTI G K, GHATAK R. Synthesis of simultaneous multiple-harmonic-patterns in time-modulated linear antenna arrays[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2014, 34:135-142.
- [8] GUNNEY K, BASBUG S. Null synthesis of time-modulated circular antenna arrays using an improved differential evolution algorithm[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(12):817-820.
- [9] POLI L, ROCCA P, OLIVERI G, et al. Harmonic beamforming in time-modulated linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(7):2538-2545.
- [10] TONG Y Z, TENNANT A. A two-channel time modulated linear array with adaptive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(1):141-147.
- [11] 廖雄鹰,李俊,罗阳坤,等. 基于自适应变异算子的差分进化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(6):128-134,142.
- [12] 余伟伟,谢承旺. 一种多策略混合的粒子群优化算法[J]. *计算机科学*, 2018, 45(s1):120-123.
- [13] 马永杰,朱琳,田福泽. 动态参数调整的多策略差分进化算法[J]. *西北师范大学学报:自然科学版*, 2018, 54(3):40-46.
- [14] 贺冲. 时间调制阵列理论与应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [15] 于鸿达,王从庆,贾峰,等. 一种基于差分进化混合粒子群算法的多无人机航迹规划[J]. *电光与控制*, 2018, 25(5):22-25,45.



请扫描二维码关注我刊