

引用格式:刘新星,张贞凯,费晓.模拟退火算法的共享孔径多波束形成[J].电光与控制,2018,25(11):57-61. LIU X X, ZHANG Z K, FEI X. Multi-aperture beamforming with shared aperture based on simulated annealing algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):57-61.

模拟退火算法的共享孔径多波束形成

刘新星, 张贞凯, 费晓
(江苏科技大学,江苏 镇江 212000)

摘要:提出一种基于模拟退火算法的共享孔径多子阵交错分布方法,该方法以波束频率不同为约束条件,以天线阵列的栅格间距和阵元位置为优化变量,两个子阵的峰值旁瓣电平为目标函数。首先,约束阵元栅格间距,设置最小间距和最大间距,确定阵元位置分布后计算阵元的栅格距离,然后利用模拟退火算法优化阵元栅格间距和阵元位置分布,计算并保存目标函数值,最终生成不同频率、不同指向的两个波束。仿真结果表明,所提算法能有效地降低两个子阵的峰值旁瓣电平,且形成的两个不同频率的波束方向图性能相似。

关键词:共享孔径;模拟退火算法;峰值旁瓣电平;波束形成

中图分类号:TN957 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.011

Multi-aperture Beamforming with Shared Aperture Based on Simulated Annealing Algorithm

LIU Xin-xing, ZHANG Zhen-kai, FEI Xiao
(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: A technology of shared aperture with multiple interleaved sub-arrays based on simulated annealing algorithm was proposed. Different beam frequencies were taken as the constraint condition, the grid spacing of the antenna array and the position of the array element were used as the optimal variables, and the peak side lobe level of the two sub-arrays was used as the objective function. Firstly, the grid spacing of the array element was constrained by setting a minimum spacing and a maximum spacing. The grid distance of the array element was calculated after determining the distribution of the array elements. Then, the simulated annealing algorithm was used to optimize the grid spacing and distribution of the array elements, and the value of the objective function was calculated and preserved. Finally, two beams with different frequencies and orientations were generated. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce the peak side lobe level of the two sub-arrays, and the two beam patterns with different frequencies are similar in performance.

Key words: shared aperture; simulated annealing algorithm; peak side lobe level; beamforming

0 引言

为了提高作战平台的综合作战能力,作战平台不得不配备众多的电子作战设备。然而,雷达、电子战和通信系统等设备缺乏足够的集成水平,因此不能最大限度地发挥各自的性能,而且设备增加也会导致严重的电磁干扰^[1-2]。共享孔径技术通过将天线阵列交

错划分为多个子阵,由此实现多功能阵列天线的设计,有利于提升作战系统的作战效能。国内外对共享孔径技术已经开展了很多研究,并取得了不错的成果。文献[3-6]将差集理论应用于稀疏布阵技术,然而现有的差集较少,阵列的结构容易受到限制,最终得到的解也不是最优解;文献[7-9]提出了一种基于子阵激励能量分配的稀疏布阵方式,利用阵元激励与方向图之间的傅里叶变换关系,将天线方向图的能量均匀分配给每个子阵,形成方向图性能近似一致的多个子阵,然而产生的子阵方向图的峰值旁瓣电平较高,需要进一步优化;文献[10]提出一种在同一个孔径区域内交错排列两个不同阵列的方法,将阵元位置作为优化变量,

收稿日期:2017-11-17

修回日期:2017-12-27

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(SJCX18_0766)

作者简介:刘新星(1992—),男,山东枣庄人,硕士生,研究方向为阵列信号处理。

利用入侵杂草算法降低天线阵列的峰值旁瓣电平,形成频率不同的两个波束,然而通过此方法最终形成的天线阵列的阵元间距均不相同,实际操作较为复杂。

现有的研究多是针对同频条件下共享孔径交错布阵方法的设计,天线阵列的工作频带范围窄。本文提出一种基于模拟退火(SA)算法的共享孔径多波束形成方法,将波束频率不同作为约束条件,即通过调整阵元位置分布进行优化时,不同频率的波束方向图性能差距较大,且子阵的峰值旁瓣电平较高。因此本文将阵元栅格间距同时作为优化变量,以子阵的峰值旁瓣电平为优化目标,并通过与其他算法的比较,验证了本文算法的有效性和可行性。

1 模拟退火算法

模拟退火(SA)算法是一种随机搜索算法,是对热力学中退火过程的模拟,与其他智能算法不同的是,SA算法在迭代过程中会以一定的概率接受相对差的解,随着温度的降低,接受概率随之减小,这种处理可以在一定程度上避免算法陷入局部最优解。

然而SA算法也有一定的缺陷,由于在搜索过程中接受差解,所以有可能导致遗失掉最优解。为避免最优解的遗失,本文在算法执行过程中做一个“记忆”处理,即设置一个最优解,将每次产生的新解与最优解进行比较,根据差值决定是否更新最优解。算法流程如图1所示。

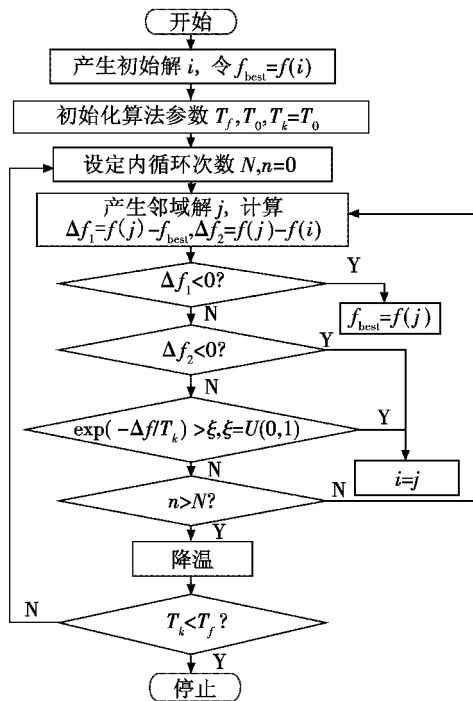


图 1 模拟退火算法流程图

Fig. 1 Flow chart of simulated annealing algorithm

2 共享孔径交错阵列设计

2.1 优化模型

交错阵列天线的模型如图2所示,将天线阵列划分为两个子阵,分别用 I_1 和 I_2 表示,天线阵列的栅格间距用 $d_i (i=1,2,3)$ 表示为

$$\begin{cases} d_1 = w_1 \lambda_1 \\ d_2 = w_2 \lambda_2 \\ d_3 = w_3 (\lambda_1 + \lambda_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_1 为子阵1之间的阵元栅格间距; d_2 为子阵2之间的阵元栅格间距; d_3 为子阵1与子阵2之间的阵元栅格间距; λ 为子阵的工作波长; w 为调整栅格距离的权值。

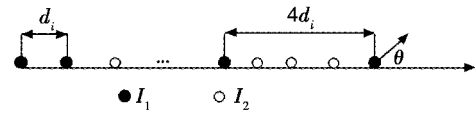


图 2 交错阵列天线结构图

Fig. 2 Structure of interleaved array antenna

假设天线阵列的阵元数为 N , 阵元激励的幅度和相位相同,则子阵的天线方向图^[11]可表示为

$$F_1(\theta) = \sum_{n=1}^{N_1} \exp(jk_1 x_n \cos \theta) \quad (2)$$

$$F_2(\theta) = \sum_{n=1}^{N_2} \exp(jk_2 y_n \cos \theta) \quad (3)$$

式中: $N_1 = N_2 = N/2$, 为两个子阵的阵元数; x_n 和 y_n 分别为子阵1和子阵2第 n 个阵元相对第一个阵元的距离; $k_i = 2\pi/\lambda_i (i=1,2)$; θ 为波束扫描角。

天线阵列方向图的峰值旁瓣电平可以表示为

$$\begin{cases} P_{PSLL1} = \max \{ \max (|F_1(\theta, \alpha)|) \} \\ P_{PSLL2} = \max \{ \max (|F_2(\theta, \alpha)|) \} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_i(\theta, \alpha)$ 为旁瓣区域中的值。

本文以两个子阵的峰值旁瓣电平之和为优化目标,将阵元栅格间距和阵元位置分布作为优化变量。为了避免阵元分布过于稀疏,对阵元的栅格间距加以约束,如图2所示,每个子阵的最小阵元间距为 d_i , 最大间距为 $4d_i$, 即每个子阵的阵元间距不超过4个栅格距离,可得到目标函数为

$$\min \{ P_{PSLL1} + P_{PSLL2} \} \quad (5)$$

$$\text{s. t. } d_i \leq |x_m - x_n| \leq 4d_i,$$

$$d_i \leq |y_m - y_n| \leq 4d_i,$$

$$i = 1, 2, 3, \quad m, n = 1, 2, \dots, N/2, m \neq n.$$

由此定义适应度函数为

$$f(x) = \max \{ P_{PSLL1} + P_{PSLL2} \}. \quad (6)$$

2.2 算法设计流程

将一个阵元数为 N 的天线阵列划分为阵元数相同的两个子阵,首先产生初始权值,根据式(1)计算出阵元栅格间距 d_i 。根据图 3 确定初始阵元位置分布。

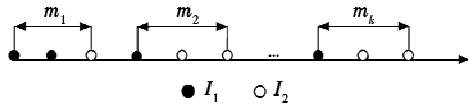


图 3 阵元位置分布结构图

Fig. 3 Structure of array elements' distribution

以 3 个阵元为一组,将天线阵列划分为 $k(k = N/3)$ 组,其中: $m_i(i = 1, 3, \dots, n_1)$ 中含有子阵 1 的阵元数为 2, 相应的子阵 2 的阵元数为 1; $m_j(j = 2, 4, \dots, n_2)$ 中含有子阵 1 的阵元数为 1, 子阵 2 的阵元数为 2。分析可得

$$\begin{cases} n_1 + n_2 = N/3 \\ 2n_1 + n_2 = N/2 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)计算可得 $n_1 = n_2 = N/6$,即要求天线阵列的阵元数为 6 的倍数,当阵元数不为 6 的倍数时,根据余数值在天线阵列的首尾处将多余的阵元均匀分配给两个子阵。

在确定初始阵元位置分布后,利用模拟退火算法进行优化,具体步骤如下。

1) 根据式(2)和式(3)计算初始状态下两个子阵的天线方向图,并根据式(4)和式(6)计算适应度函数值,将当前权值及阵元位置分布下的解作为最优解 f_{best} 。

2) 初始化模拟退火参数,给定初始温度 T_0 ,终止温度 T_f 和内循环次数,令 $T_k = T_0$ 。

3) 改变权值 w ,进入内循环。

4) 产生随机整数 $r_1, r_2(r \in [1, N/3])$,改变第 r 组中阵元的位置分布;计算改变位置后的适应度函数值 $f(x)$,将当前适应度函数值与最佳适应度函数值进行比较,根据差值情况判断是否更新最优解。

5) 计算当前状态 S_j 与上一时刻状态 S_i 的目标增量 Δf ,若 $\Delta f < 0$,令 $S_i = S_j$;否则产生一个 $0 \sim 1$ 的随机数 ξ ,若 $\exp(-\Delta f/T_k) > \xi$,则令 $S_i = S_j$ 。

6) 判断是否达到内循环次数,若达到则转到下一步,否则转到 4)。

7) 降低温度,判断是否达到终止温度,是则停止,否则转到 3)。

3 实验仿真与分析

为了验证本文算法的有效性和可行性,设置天线阵列的阵元数为 60,将天线阵列交错划分为两个子阵。

3.1 仿真 1

设置相同的 T_0, T_f 和内循环次数,将本文算法与固定阵元栅格间距时的算法做比较。设置阵元的栅格间

距为 $d_1 = \lambda_1/2, d_2 = \lambda_2/2, d_3 = (\lambda_1 + \lambda_2)/4$;为了更好地分析比较,将主瓣方向均指向 0° ,仿真结果见图 4。

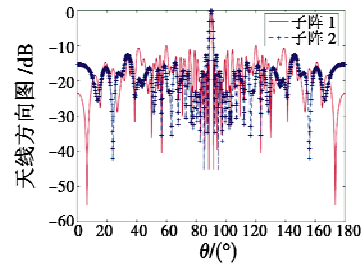


图 4 子阵天线方向图

Fig. 4 Radiation pattern of sub-array

从图 4 中可以看出,当固定栅格间距时,不同频率的波束方向图性能差距较大,子阵 1 的旁瓣电平明显高于子阵 2 的旁瓣电平;且两个子阵的旁瓣电平较高,其中,子阵 1 的峰值旁瓣电平(保留两位小数,下同)为 -9.87 dB,子阵 2 的峰值旁瓣电平为 -11.91 dB。

将阵元栅格间距同时作为优化变量,对算法进行改进,仿真结果如图 5 所示。

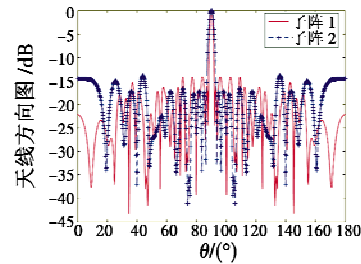


图 5 改进算法后的子阵天线方向图

Fig. 5 Radiation pattern of sub-array of the improved algorithm

从图 5 中可以看出,改进算法后,不同频率的波束方向图性能接近,且子阵的峰值旁瓣电平得到了进一步优化,其中,子阵 1 的峰值旁瓣电平为 -14.06 dB,子阵 2 的峰值旁瓣电平为 -13.42 dB。

改进算法得到的最优权值(保留两位小数)为 $w = [0.83, 0.64, 0.11]$ 。

算法得到的最优阵元位置分布为:子阵 1:10001100101101011010010101010110100110001101010110;子阵 2:0111001101001010010110101010011010101001011001110010101001。

通过阵元位置分布可以看出,两个子阵的孔径大小与原天线阵列的孔径大小基本一致,天线孔径的利用率较高。为了对比算法改进前后对天线方向图的优化效果,表 1 列出了交错阵列的性能参数对比。

由表 1 可以看出,改进后的本文算法中,两个子阵的峰值旁瓣电平均得到了优化。其中,子阵 1 的峰值旁瓣电平下降 4.19 dB,子阵 2 的峰值旁瓣电平下降 1.51 dB,两个子阵的峰值旁瓣电平之差由 2.04 dB 下降为

0.64 dB,由此可以得出,在将阵元栅格间距同时作为优化变量后,天线方向图的性能得到了很大的改善。

表1 交错阵列的性能参数

Table 1 Performance parameters of interleaved array

算法	阵元数	w	$P_{\text{PSLL1}}/\text{dB}$	$P_{\text{PSLL2}}/\text{dB}$	$ P_{\text{PSLL1}} - P_{\text{PSLL2}} /\text{dB}$
SA 算法	60	[0.5, 0.5, 0.25]	-9.87	-11.91	2.04
本文算法	60	[0.83, 0.41, 0.11]	-14.06	-13.42	0.64

3.2 仿真2

为了进一步验证本文算法的有效性,将其与迭代FFT算法进行比较,首先对迭代FFT算法进行仿真,仿真结果如图6所示。

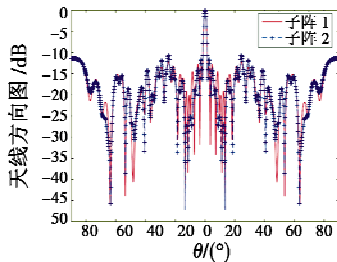


图6 FFT算法子阵天线方向图

Fig. 6 Radiation pattern of sub-array of FFT algorithm

由图6可以看出,利用迭代FFT算法产生的两个子阵的波束方向图性能相近,但子阵的旁瓣电平较高;图7为子阵1的峰值旁瓣电平迭代曲线,从图中可以看出,其值并不收敛,因此利用迭代FFT算法得到的解并非最优解。

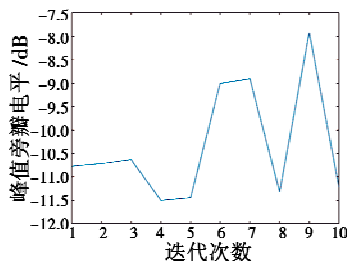


图7 峰值旁瓣电平的迭代曲线

Fig. 7 Iterative curve of PSLL

设置相同的阵元数,且将本文算法中子阵1的波束频率设置为与迭代FFT算法的波束频率相同,对两种算法进行仿真比较,仿真结果如图8所示。

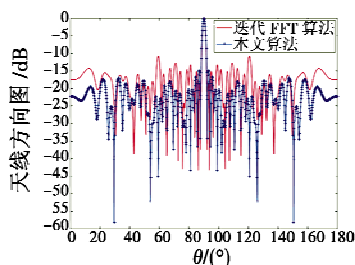


图8 本文算法与迭代FFT算法

Fig. 8 Simulated annealing algorithm and iterative FFT algorithm

仿真结果表明,当阵元数和波束频率相同时,利用迭代FFT算法形成的波束方向图的旁瓣电平明显高于本文算法。其中,迭代FFT算法得到的峰值旁瓣电平为-10.76 dB,本文算法得到的峰值旁瓣电平为-14.96 dB,在主瓣宽度基本相同的情况下,子阵的旁瓣电平得到了进一步优化;利用迭代FFT算法形成的是两个频率相同的波束,而本文算法形成的是两个不同频率的波束,拓宽了天线阵列的工作频带,由此可以证明本文算法在性能上优于迭代FFT算法。

3.3 仿真3

为验证波束指向的灵活性,将两个子阵的主瓣方向指向不同角度,仿真结果如图9所示。

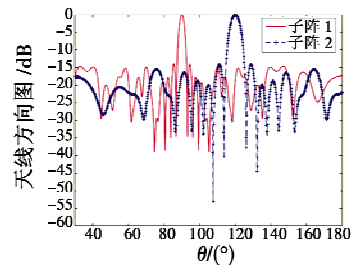


图9 不同波束指向天线方向图

Fig. 9 Radiation pattern of two subarrays in different beam directions

从仿真结果可以看出,本文算法可以灵活控制波束指向,实现不同角度的波束扫描,方便多功能阵列的天线设计。

调整栅格间距的权值是随机产生的,因此会影响算法的收敛性,当某一个权值下的解较差时,通过调整阵元位置对目标函数的优化效果也不太好,会降低算法的运行速度。为解决这个问题,在算法中设置一个阈值电平和接受次数,当在某一个权值下,适应函数值大于阈值电平的次数超过接受次数时,则跳出当前内循环。对此方法进行仿真,改进前的运行时间为158.60 s,改进后运行时间为149.03 s,结果表明,此方法能在一定程度上优化本文算法的运行速度。

4 结论

本文将SA算法运用到共享孔径技术中,对阵元位置分布和阵元栅格间距进行优化,使形成的两个子阵的波束方向图性能相似,且子阵的旁瓣电平相对于其

他算法得到了进一步优化。同时,本文算法将波束频率不同作为约束条件,拓宽了天线阵列的频带范围,又可以通过移相器灵活控制波束指向,从而实现多功能阵列天线的设计。

宽带波束形成技术是当前阵列信号处理研究的重点,对于改善天线阵列的性能有着重要的意义,后续将进一步研究宽带信号的共享孔径技术。

参考文献

- [1] 杨瑞娟,陈小民,李晓柏,等. 雷达通信一体化共享信号技术研究[J]. 空军预警学院学报,2013(1):39-43.
- [2] 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.
- [3] COMAN C I, LAGER I E, LIGTHART L P. A deterministic solution to the problem of interleaving multiple sparse array antennas [C]//European Radar Conference, IEEE, Paris, 2005:243-246.
- [4] QIN Y, GAO S, SAMBELL A, et al. Design of a broadband square-ring-slot coupled patch antenna [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2005, 47(5):454-457.
- [5] SIMEONI M, LAGER I E, COMAN C I, et al. Implementation of polarization agility in planar phased-array antennas by means of interleaved subarrays [J]. Radio Science, 2009, 44(5):1-12.
- [6] 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.
- [7] 李龙军,王布宏,夏春和,等. 基于子阵激励能量匹配的多子阵交错阵列设计[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(11):2395-2402.
- [8] 李龙军,王布宏,夏春和. 基于迭代 FFT 算法的平面阵列交错稀疏布阵方法 [J]. 电波科学学报,2016,31(2):387-393.
- [9] 李龙军,王布宏,夏春和. 基于改进迭代 FFT 算法的均匀线阵交错稀疏布阵方法 [J]. 电子与信息学报,2016,38(4):970-977.
- [10] GUO H, GUO C J, DING J. Pattern synthesis of dual-band shared aperture interleaved linear antenna arrays [J]. Radioengineering, 2014, 23(3):798-804.
- [11] 陈客松. 稀布天线阵列的优化布阵技术研究 [D]. 成都:电子科技大学,2006.
- [12] 侯彪,胡育辉,焦李成. SAR 图像水体的改进 Shearlet 边缘检测 [J]. 中国图象图形学报,2010,15(10):1549-1554.
- [13] 徐川,华凤,眭海刚,等. 多尺度水平集 SAR 影像水体自动分割方法 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2014,39(1):27-31.
- [14] 蔡强,刘亚奇,曹健,等. 一种基于自适应标记与区域间近邻传播聚类的分水岭图像分割算法 [J]. 电子学报,2017,45(8):1911-1918.
- [15] 沈夏炯,吴晓洋,韩道军. 分水岭分割算法研究综述 [J]. 计算机工程,2015,41(10):26-30.
- [16] 苏腾飞,张圣微,李洪玉. 基于纹理特征与区域生长的高分辨率遥感影像分割算法 [J]. 国土资源遥感,2017,29(2):72-81.
- [17] 徐蔚波,刘颖,章浩伟. 基于区域生长的图像分割研究进展 [J]. 北京生物医学工程,2017,36(3):317-322.
- [18] 陈志国. 高分辨率 SAR 卫星影像洪水区域提取应用研究 [D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [19] SASCHA K, BJORN W, SILVIA V, et al. Automatic detection of rivers in high-resolution SAR data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(5):1364-1368.
- [20] 吴戌,叶伟. 复杂场景下的 SAR 图像水域边缘特征提取 [J]. 兵器装备工程学报,2017,38(8):136-139.
- [21] 贺飞跃,赵伟. 含水体的合成孔径雷达图像配准 [J]. 光学学报,2017,37(9):295-303.
- [22] LEI X G, LI Y, ZHAO N, et al. Fast segmentation approach for SAR image based on simple Markov random field [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(1):31-36.
- [23] 曹志民,吕秀丽,吴云,等. 基于渐进核图割的 SAR 图像自动分割 [J]. 光学技术,2016,42(4):357-360,366.

(上接第 24 页)

- [11] SILVEIRA M, HELENO S. Separation between water and land in SAR images using region-based level sets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3):471-475.
- [12] 侯彪,胡育辉,焦李成. SAR 图像水体的改进 Shearlet 边缘检测 [J]. 中国图象图形学报,2010,15(10):1549-1554.
- [13] 徐川,华凤,眭海刚,等. 多尺度水平集 SAR 影像水体自动分割方法 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2014,39(1):27-31.
- [14] 蔡强,刘亚奇,曹健,等. 一种基于自适应标记与区域间近邻传播聚类的分水岭图像分割算法 [J]. 电子学报,2017,45(8):1911-1918.
- [15] 沈夏炯,吴晓洋,韩道军. 分水岭分割算法研究综述 [J]. 计算机工程,2015,41(10):26-30.
- [16] 苏腾飞,张圣微,李洪玉. 基于纹理特征与区域生长的高分辨率遥感影像分割算法 [J]. 国土资源遥感,2017,29(2):72-81.