

一种改进的星载 SAR 波束优化算法

孙慧峰*^{①②} 石力^{①②} 邓云凯^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 针对传统的星载 SAR 波束展宽优化算法中优化变量数目多、计算时间长的缺点, 该文提出了一种减少变量数目、提高优化速度的算法。该算法对常规遗传算法进行了改进, 以正交多项式为天线口径分布的基函数, 以多项式系数为优化变量, 从而大大减少了优化的变量数目, 提高了优化速度。此算法经过了长时间的改进, 已经在多个型号项目中得到了广泛的应用。

关键词: 星载 SAR; 阵列天线; 波束优化; 遗传算法

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0706-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00666

An Improved Beam Optimization Algorithm for Spaceborne SAR Applications

Sun Hui-feng^{①②} Shi Li^{①②} Deng Yun-kai^①

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In this paper, an improved beam optimization algorithm for spaceborne SAR applications is presented to reduce the number of optimizing variables and the calculation time, compared with the traditional algorithm. This algorithm improves on the traditional genetic algorithm. In order to reduce the number of the optimizing parameters and expedite the optimization speed, the coefficients of a group of orthogonal base functions are set as the optimizing variables. This algorithm has been widely used in many projects and results with high performance are obtained.

Key words: Spaceborne SAR; Array antennas; Beam optimization; Genetic Algorithm (GA)

1 引言

采用固态有源相控阵天线的星载SAR一般具有多种工作模式, 每种模式有多个波位, 不同波位要求天线具有不同的波束宽度。为了满足成像幅宽和辐射功率的需要, 经常要求天线在全阵面工作的情况下, 波束宽度灵活可变。星载SAR有源相控阵天线一般采用分布式固态T/R组件: 发射模式下, T/R组件为饱和放大, 输出功率恒定, 相位可量化控制; 接收模式下, 幅度和相位均可量化控制。因此, 发射模式和接收模式下的波束优化应采用不同的优化策略。典型的单极化T/R组件如图1所示, 收发通道共用一个移相器, 接收通道有一个独立的数控衰减器, 收发之间通过收发开关进行切换, 控制芯片采用单片ASIC专用电路。发射模式仅对发射通道的相位进行优化, 优化出的发射相位通过移相器移相得

到。接收模式对幅度和相位均进行优化, 但考虑到大衰减会使接收通道噪声系数增加, 应设定最大接收衰减幅度, 在幅度衰减限定内进行幅度优化。

根据系统所要求的天线指标和波束形状求解阵列天线的激励幅相分布的过程称为综合。阵列方向图的综合方法多种多样, 有解析法, 也有数值法。遗传算法是一种非数值的并行方法, 它适用于处理和解决复杂和非线性的问题, 对搜索空间也没有特殊要求。遗传算法已经被许多学者成功地应用到了天线领域, 解决了许多有关天线的问题。文献[1,2]在保持波束宽度不变的情况下, 用遗传算法对方向图的副瓣进行了压制; 文献[3]利用遗传算法对阵列天线单元的位置进行了优化; 文献[4]使用遗传算法优化基于圆柱共形天线阵的方向图, 以实现所期望的平均副瓣和指定方向的零陷; 文献[5]使用遗传算法纠正了相控阵天线单元的相位; 文献[6]使用二进制的遗传算法对辐射单元的幅度和相位进行优化得到了所期望的方向图; 文献[7]结合星载合成孔径

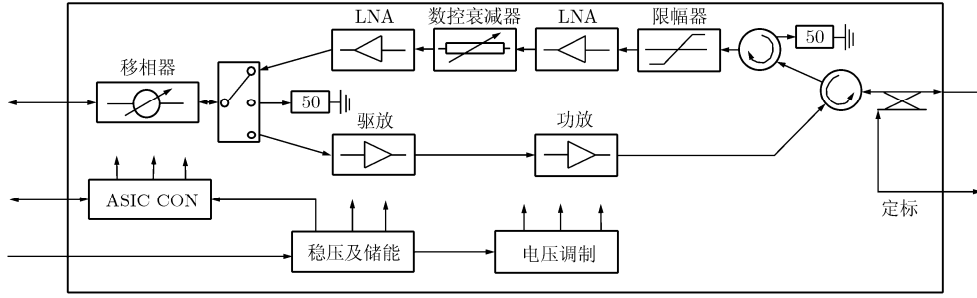


图1 典型单极化T/R组件组成电路

雷达(星载SAR)的模糊特性,应用遗传算法对天线方向图进行综合;文献[8]对星载相控天线进行了部分相位的加权;文献[9]分析了遗传算法中各种目标函数对方向图优化的影响;文献[10]使用遗传算法对阵列方向图进行了综合;文献[11]利用遗传算法实现了超低副瓣方向图的综合。然而这些传统的遗传算法都存在一个共同的缺点,它们以天线的阵元激励幅度、相位和位置作为优化变量。但在大型的阵列天线综合中,传统的遗传算法的染色体中的变量太多,使得收敛速度慢,算法应用上不尽如人意。

针对传统的遗传算法的优化变量多和收敛速度慢的缺点,本文提出了一种改进的遗传算法,大大提高了大阵列的综合优化速度,得到了令人满意的结果。该算法用几个有限正交基函数来表示天线的相位随天线位置的变化,发射模式天线阵元激励为均匀分布,接收模式天线阵元幅度仍采用泰勒加权分布,正交基函数的系数成为遗传算法染色体中的变量,大大减少了优化变量的数目,优化出的相位分布具有光滑的优点。文章最后给出了一个计算实例,并对计算结果和实测结果进行了比较,证明了此算法的正确性和有效性。

2 算法描述

2.1 天线理论模型

若在区间 (x_1, x_2) 内,一个完备正交函数集为 $\{g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x), \dots\}$, 设其下标越大函数变化越剧烈,频率越高。在一定精度下,任意低阶光滑函数 $f(x)$ 在区间 (x_1, x_2) 内的值可以近似用前 M 项表示为

$$f(x) \approx \sum_{r=1}^M c_r g_r(x) \quad (1)$$

在天线阵列中,阵列单元的相位是连续变化的。若单元的位置为 x , 则阵列单元的相位可以表示成与单元位置有关的曲线 $\varphi(x)$ 。通过平移和缩放,使得位置 $x \in (x_1, x_2)$ 。由式(1)得

$$\varphi(x) \approx \sum_{r=1}^M c_r g_r(x) \quad (2)$$

由此,天线阵列的阵元激励相位由正交函数的系数和它的位置决定,并且可以看出随着天线阵列单元的增多,正交函数的系数的数目不变,并且可以得出天线单元不是等间距分布的相位值。

阵元的激励相位 $\varphi(x)$ 的值由式(2)可以求出,第 i 个阵元的复激励为

$$I_i = |I_i| e^{j\varphi(x_i)} \quad (3)$$

接收模式下阵元的激励幅度 $|I_i|$ 可由泰勒加权求出,发射模式下 $|I_i|$ 为均匀分布,可得出天线方向图为

$$F(\theta) = F_e(\theta) \sum_{i=1}^N I_i e^{jkx_i \sin \theta} \quad (4)$$

式中 θ 为从线阵中心的法线开始测量的空间角, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为工作波长, $F_e(\theta)$ 为单元方向图,令

$$F_e(\theta) = (\cos \theta)^{0.5} \quad (5)$$

选取正交基函数为勒让德多项式,即

$$g_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n \quad (6)$$

式中 $x \in [-1, 1]$, $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

取勒让德多项式的前 M 项组成一组正交函数集 $\{g_0(x), g_1(x), \dots, g_M(x)\}$, 每项对应的系数为 $\{c_0, c_1, \dots, c_M\}$ 。

考虑 N 个辐射单元组成的线阵,单元排列的直线取作 x 轴,阵中心取为坐标原点,那么第 n 个阵元的位置为 x_n 。

由于勒让德多项式的取值区间为 $[-1, 1]$, 对第 n 个阵元位置 x_n 进行如下处理:

$$x'_n = 2x_n / L \quad (7)$$

式中 L 为线阵的长度, x'_n 为第 n 个阵元新的位置。

由式(2)可得第 n 个阵元的激励相位为

$$\varphi(x'_n) \approx \sum_{r=1}^M c_r g_r(x'_n) \quad (8)$$

由于 $g_0(x) = 1$ 为常数，它对方向图没有影响，故 r 从1取起。

接收模式下阵元的激励幅度可由泰勒加权求出，发模式为均匀激励，由式(3)可求出阵元的激励幅相，由式(4)可得出该激励条件下的天线方向图。

2.2 天线方向图计算目标函数

如图2所示，天线方向图评价目标函数求解包含3个区域：主瓣区、近副瓣区和模糊压制区。主瓣区内的目标函数包括3类：主瓣增益、波束宽度和平坦度；近副瓣区有左右两部分组成，每部分包括两类目标函数：平均副瓣和峰值副瓣；模糊压制区可以有多个，每个区内的目标函数有两类：平均副瓣和峰值副瓣。

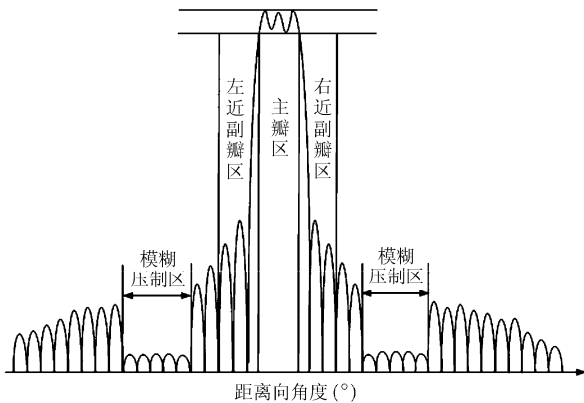


图2 天线方向图评价目标函数分布示意图

上述所有目标函数均采用非线性指数曲线罚函数，即罚函数计算值越小，表示该指标越优。罚函数包括3部分：权值、目标、指数，即

$$\text{fit} = \text{weight} \times |w - w_d|^{\text{pow}} \quad (9)$$

式(9)中， weight 表示权值， w 表示实际值， w_d 表示期望值。

按照式(9)，可分别计算出波束宽度的罚函数 fit_{wb} ，主瓣内的平坦度的惩罚函数 fit_s ，增益损耗的罚函数 fit_{gl} ，主瓣左边的最大副瓣罚函数 fit_l ，主瓣右边的最大副瓣罚函数 fit_r ，主瓣左边的平均副瓣罚函数 fit_{la} ，主瓣右边的平均副瓣惩罚函数 fit_{ra} 和规定区域内的零点罚函数 fit_z ，则可得出总的惩罚函数：

$$\begin{aligned} \text{fit} = & \text{fit}_{wb} + \text{fit}_s + \text{fit}_{gl} + \text{fit}_l + \text{fit}_r \\ & + \text{fit}_{la} + \text{fit}_{ra} + \text{fit}_z \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 传统遗传算法的改进

传统的遗传算法对天线方向图综合时，有优化变量多和收敛速度慢的缺点。对传统遗传算法的改进可在一定程度上克服这些缺点，以下具体说明。

由以上可知，构成遗传算法的染色体为 $\{c_0, c_1, \dots, c_M\}$ ，由此可以看出，随着阵列阵元的增加，优化变量的个数始终不变。对大型有源相控阵而言，本算法减少了优化变量的个数，提高了优化速度。

若天线不扫描，天线的阵元相位对于阵中心是对称分布的，由此只需优化系数的偶次项，即染色体变为 $\{c_0, c_2, c_4, \dots, c_M\}$ ，可进一步减少优化变量的个数。

该算法的具体步骤：

(1)染色体的编码方式。采用实数编码，染色体为 $\{c_0, c_1, \dots, c_M\}$ 。

(2)选择。这里采用基于排序的选择机制，首先将群体中的染色体由好到坏进行排序。若种群规模等于 n ，令序号1对应的选择概率为 p_{s1} ，序号 n 对应的选择概率为 p_{sn} ，选择概率是等差数列，且和等于1。令公差为 q ，最大选择概率与最小选择概率之比为 r ，可以得出：

$$p_{sn}/p_{s1} = r \quad (11)$$

$$p_{sn} = p_{s1} + (n-1) \times q \quad (12)$$

$$(p_{s1} + p_{sn})/2 \times n = 1 \quad (13)$$

由式(11)，式(12)和式(13)可以得出：

$$p_{s1} = 2 \times r / [(r+1) \times n] \quad (14)$$

$$q = 2 \times (1-r) / [n(n-1)(r+1)] \quad (15)$$

已知 r 的值，可以得出排序后的选择概率为 $\{p_{s0}, p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{sn}\}$ 。

在区间 $[-1, 1]$ 内产生均匀分布的随机数 p_s ，若 $p_{s_{i-1}} < p_s \leq p_{s_i}$ ，则选择第 i 个染色体。不断重复 n 次，可得到 n 个选择的染色体。

(3)交叉。本文采用以下遗传繁殖操作，设父代染色体为 A_1 和 A_2 ，交叉得到的子代为

$$B_1 = A_1 + \text{rand}_1 \cdot (A_2 - A_1)$$

$$B_2 = A_2 + \text{rand}_2 \cdot (A_1 - A_2)$$

rand_1 和 rand_2 是 $[-1, 1]$ 区间内的随机数。比较 A_1 ， A_2 ， B_1 和 B_2 ，选出两个惩罚值低的作为下一代的父代染色体，如此循环。

(4)变异。本文采用非均匀变异。随着染色体代数的增加，变异的概率越来越小。设遗传迭代共有 G 代，初始的变异的概率为 p_{m_start} ，最后的变异概率为 p_{m_end} ，可得出第 i 代的变异概率为

$$p_{m_i} = p_{m_start} + (i-1) \times \frac{p_{m_end} - p_{m_start}}{G} \quad (16)$$

对于第 i 代的第 j 个染色体，在区间 $[-1, 1]$ 内产生均匀分布的随机数 p_s ，若 $p_s < p_{m_i}$ ，则对该染色体中的基因执行如下变异操作：

$$c_{jk} = c_{L_k} + (c_{U_k} - c_{L_k}) \cdot \text{rand}_{jk} \quad (17)$$

式中 c_{jk} 表示为第 j 个染色体中第 k 个基因, c_{U_k} 表示第 k 个基因取值区间的上限, c_{L_k} 表示第 k 个基因取值区间的下限, rand_{jk} 是 $[-1,1]$ 区间内的随机数。为了不丢失最好的个体, 实施最优保存策略。

3 设计实例

为了验证算法, 在一个有源相控阵天线上进行了验证。该天线为垂直极化, 为减轻测试复杂度, 取距离向 48 个单元, 单元间距 18 mm, 方位向一行波导子阵, 每个波导子阵 12 个辐射缝隙。这样, 天线阵面为 48 根波导子阵连接有 48 个 T/R 组件组成。中心等幅同相对应波束宽度约为 1.84° , 对有源天线模块的发射模式下波束展宽至 3.2° , 6.4° 和

11° 进行了测试, 测试验证结果如图 3-图 8 所示。

实测结果表明, 主瓣和近区副瓣误差不超过 1 dB, 远区副瓣比理论值偏高, 这是由于实际工程中, 馈电网络的幅相误差和移相器量化误差的存在所引起的, 不影响工程实用。

4 结论

本文提出了基于正交基函数的遗传算法, 主要叙述了相位加权波束优化的方法, 且对相位加权实现波束展宽进行了举例, 得到了令人满意的结果。可以看出基于正交基函数的遗传算法具有优化变量少、优化时间短的优点, 具有很好工程实用价值。

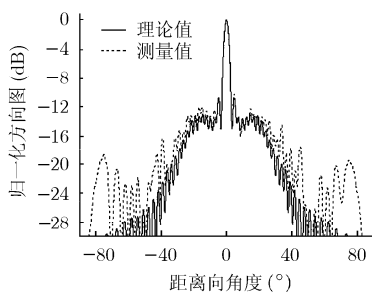


图3 发射模式波束展宽 3.2° 验证结果

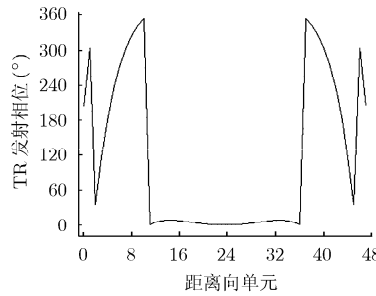


图4 发射模式波束展宽 3.2° 相位优化结果

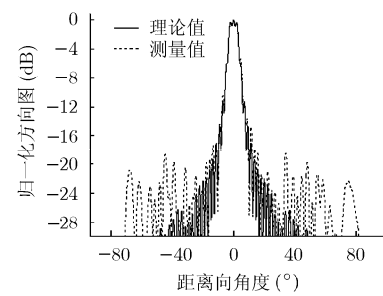


图5 发射模式波束展宽 6.4° 验证结果

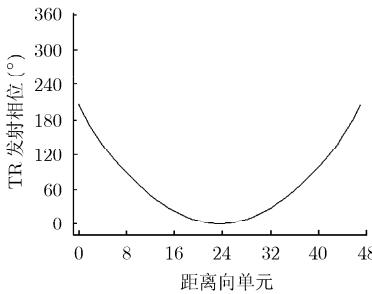


图6 发射模式波束展宽 6.4° 相位优化结果

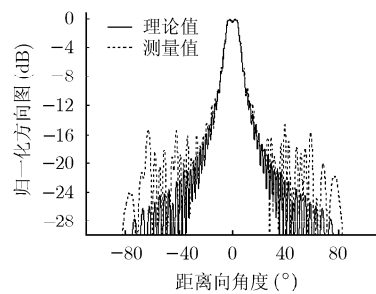


图7 发射模式波束展宽 11.0° 验证结果

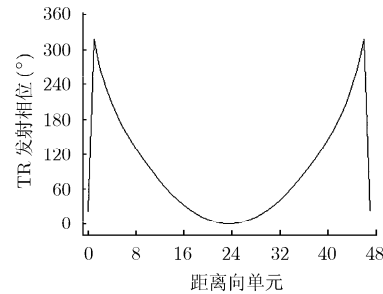


图8 发射模式波束展宽 11.0° 相位优化结果

参考文献

- [1] Mandal D, Ghoshal S K, Das S, Bhattacharjee S, and Bhattacharjee A K. Improvement of radiation pattern for linear antenna arrays using genetic algorithm[C]. International Conference on Recent Trends in Information, Telecommunication and Computing, Kochi, Kerala, 2010: 126-129.
- [2] Zhao Fei and Cheng Nai-ping. Genetic algorithm in the design of thinned arrays with low sidelobe levels[C]. International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, China, 2009: 1-4
- [3] Grubisic S, Carpes W P Jr, and Bastos J P A. Optimization model for antenna positioning in indoor environments using 2-D ray-tracing technique associated to a real-coded genetic algorithm [J]. *IEEE Transactions on Magnetic*, 2009, 45(3): 1626-1629.
- [4] 路占波, 孙丹, 陈亚军. 遗传算法在共形天线阵方向图综合中的应用[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(5): 1488-1491.
- [5] Lu Zhan-bo, Sun Dan, and Chen Ya-jun. Application of genetic algorithm to conformal antenna array pattern synthesis [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(5): 1488-1491.
- [5] Son Seng Ho, Eom Song Young, Jeon Soon Ik, and Hwang Woonbong. Automatic phase correction of phased array antennas by a genetic algorithm [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2008, 56(8): 2751-2754.
- [6] Villegas F J. Parallel genetic-algorithm optimization of shaped beam coverage areas using planar 2-D phased array[J].

- IEEE Transaction on Antenna Propagation*, 2007, 55(6): 1745-1753.
- [7] 张杨, 邓云凯. 基于遗传算法的星载合成孔径雷达天线方向图与模糊综合[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(8): 1472-1475.
Zhang Yang and Deng Yun-kai. Antenna pattern synthesis for ambiguity depressing in spaceborne SAR systems based on genetic algorithms [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(8): 1472-1475.
- [8] 徐慧, 李建新, 胡明春. 星载 SAR 波束展宽研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 540-543.
Xu Hui, Li Jian-xin, and Hu Ming-chun. Research on beam widening of spaceborne SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 540-543.
- [9] 范瑜, 金荣洪, 刘波, 耿军平. 阵列天线方向图综合中的遗传算法目标函数研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 801-804.
Fan Yu, Jin Rong-hong, Liu Bo, and Geng Jun-ping. Study on the objective function for the array pattern synthesis based on genetic algorithms [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(5): 801-804.
- [10] Marcano D and Duran F. Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, 42(3): 12-20.
- [11] 李东风, 龚中麟. 遗传算法应用于超低副瓣线阵天线方向图综合[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 82-84.
Li Dong-feng and Gong Zhong-lin. Application of genetic algorithms in the pattern synthesis of ultra-low sidelobe linear array antenna. [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(1): 82-84.
- 孙慧峰: 男, 1979 年生, 博士生, 以 SAR 天线为研究方向.
石力: 男, 1983 年生, 硕博连读生, 以缝隙阵列天线和波束赋形为研究方向.
邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事 SAR 雷达系统和技术的研究.