

# 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

张杨<sup>①②</sup> 邓云凯<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要** 该文针对改善星载合成孔径雷达(星载 SAR)的模糊特性,以星载 SAR 的模糊度为目标函数,以天线方向图的主瓣宽度和副瓣电平为约束条件,应用遗传算法对天线方向图进行综合。仿真结果表明,这种方法很好地抑制了模糊度,同时控制了主瓣宽度和副瓣电平,对星载 SAR 系统设计具有实际意义。

**关键词** 星载合成孔径雷达, 天线方向图综合, 模糊

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1472-04

## Antenna Pattern Synthesis for Ambiguity Depressing in Spaceborne SAR Systems Based on Genetic Algorithms

Zhang Yang<sup>①②</sup> Deng Yun-Kai<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** In this paper Genetic Algorithms(GA) are applied to antenna pattern synthesis according to ambiguity depressing in spaceborne SAR. The ambiguity of spaceborne SAR is regarded as the objective function, and the beamwidth and the side lobe level of the antenna pattern are regarded as the constraints. The simulation results show that the ambiguity is depressed while the beamwidth and the side lobe level are well controlled via this method, which is quite helpful to spaceborne SAR system designing.

**Key words** Spaceborne SAR, Antenna pattern synthesis, Ambiguities

### 1 引言

模糊特性是星载 SAR 设计中必须考虑的重要因素。对设计者来说,一项重要的工作就是选择合适的脉冲重复频率  $P_{rf}$  (Pulse Repetition Frequency), 而该参数的选择总是受到其他因素的制约, 其中包括距离向和方位向的模糊度 (Ambiguity-to-Signal Ratio, ASR), 通过天线方向图综合使模糊特性得到改善,  $P_{rf}$  的选择就会变得更为灵活<sup>[1]</sup>。另一方面, 模糊的直观表现就是图像的质量下降, 虽然图像处理可以在一定程度上弥补这种缺陷, 但模糊特性的改善对提高图像质量的意义是很明显的。天线方向图综合是改善星载 SAR 模糊特性的一个重要途径。

遗传算法作为一种优化方法, 早已被应用于天线方向图综合当中<sup>[2]</sup>, 但是将遗传算法对天线方向图的综合应用于星载 SAR 图像模糊度分析的报道并不多。本文将应用遗传算法对天线方向图进行综合来改善星载 SAR 的模糊特性。实际设计中针对方位向模糊的天线综合相对容易完成, 以下只讨论距离向模糊。

### 2 问题的数学描述

#### 2.1 模糊的数学表达

地面上被照射的每一点都有两个可以被雷达测量的参

数: 回波延迟时间  $t_d$  和多普勒频移  $f_d$ 。而雷达从每个地面单元接收的回波功率同以下几个参数有关: 天线在该方向的增益  $G(\cdot)$  (设  $G(\cdot)$  为单程增益, 双程增益为  $G_T(\cdot)G_R(\cdot)$ , 其中  $G_T(\cdot)$  表示发射方向图增益, 而  $G_R(\cdot)$  表示接收方向图增益), 该单元到天线的距离  $R(\cdot)$ , 背向散射系数  $\sigma_0(\cdot)$  和单元的面积  $A(\cdot)$ 。这样该单元的回波能量可以表达为<sup>[1]</sup>

$$S(t_d, f_d) = k \frac{G_T(t_d, f_d)G_R(t_d, f_d)\sigma_0(t_d, f_d)A(t_d, f_d)}{R^4(t_d, f_d)} \quad (1)$$

因为这里只讨论距离向模糊, 所以上式中的  $f_d$  为定值, 于是式(1)变为

$$S(t_d) = k \frac{G_T(t_d)G_R(t_d)\sigma(t_d)}{R^4(t_d)} \quad (2)$$

其中  $\sigma(t_d) = \sigma_0(t_d)A(t_d)$ 。

通常  $G(\cdot)$ 、 $\sigma(\cdot)$  不由  $t_d$  表示,  $G(\cdot)$  用距离向离轴角  $\theta$  表示, 背向散射系数  $\sigma(\cdot)$  用擦地角  $\psi$  来表示, 所以回波能量表示为

$$S(t_d) = k \frac{G_T(\theta(t_d))G_R(\theta(t_d))\sigma(\psi(t_d))}{R^4(t_d)} \quad (3)$$

星载 SAR 测绘带内的回波要经过多个脉冲重复周期才被雷达接收到, 所以总可以找到某些地面区域, 这些区域的回波延迟时间和测绘带内的回波延迟时间正好相差脉冲重

复周期的整数倍, 两者的回波相重叠, 造成模糊。因此, 考虑综合孔径效应后模糊度可以表达为<sup>[3]</sup>

$$ASR = \frac{\sum_{n \neq i} \int_{-T_w/2}^{T_w/2+n/P_{rf}} R^{-3}(t_{dn})G_T(t_{dn})G_R(t_{dn})\sigma(t_{dn})dt_{dn}}{\int_{-T_w/2}^{T_w/2} R^{-3}(t_{di})G_T(t_{di})G_R(t_{di})\sigma(t_{di})dt_{di}} \quad (4)$$

式中  $n=1,2,\dots$  为模糊带或测绘带的标号,  $i$  为测绘带的标号,  $G(\cdot) = G(\theta(\cdot))$ ,  $\sigma(\cdot) = \sigma(\psi(\cdot))$  ( $G(\theta)$ ,  $\sigma(\psi)$ ,  $\theta(t_d)$ ,  $\psi(t_d)$  的表达式在附录中详细描述),  $T_w$  为测绘带近端和远端回波的双程延时差。

### 2.2 主瓣宽度和副瓣电平

容易理解, 只有测绘带中(图 1,  $C_1$  区域)天线辐射的强度达到一定的值才可能较好的对测绘带成像, 即

$$\min_{\theta \in C_1} G(\theta) > A_1(\text{dB}), \quad A_1 < 0 \quad (5)$$

另一方面, 为了更有效地利用天线的辐射能量, 在保证主瓣宽度的同时, 天线方向图的副瓣( $C_2$  区域)要尽量低, 即

$$\max_{\theta \in C_2} G(\theta) < A_2(\text{dB}), \quad A_2 < 0 \quad (6a)$$

$$\text{亦即 } -\max_{\theta \in C_2} G(\theta) > -A_2(\text{dB}), \quad A_2 < 0 \quad (6b)$$

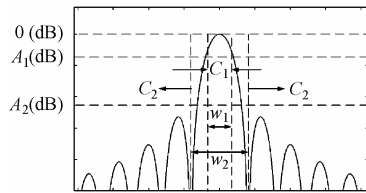


图 1 约束条件示意图

Fig.1 Sketch of the constraints

以上两个条件共同作用, 主瓣的宽度得到限制, 即式(5)满足, 则主瓣的宽度不会小于  $w_1$ , 同时, 式(6)满足, 则主瓣的宽度不会大于  $w_2$ 。

综上所述, 对模糊度和方向图的综合优化可以采用下述模型:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } f(a_i, \varphi_i) \\ &\text{Subject to } g_j(a_i, \varphi_i) > T_j \quad (i=1,2,3 \dots n; \quad j=1,2) \end{aligned} \quad (7)$$

$f$ ,  $g_1$ ,  $g_2$  分别适用于式(4), 式(5)和式(6b)。这属于有两个约束条件的单目标优化问题, 目标函数和限制条件都是非线性的, 这种非线性不同于简单的多项式加减, 而且需要优化的变量数目比较多。传统方法尤其是线性规划对上述优化问题显得无能为力, 遗传算法是一种较好的选择。

## 3 天线综合的算法实现

### 3.1 遗传算法

遗传算法是人们受生物遗传过程的启发而发展出的一种优化方法, 这种方法以其在解决多变量非线性优化问题中的突出表现而得以广泛应用。遗传算法的流程如图 2 所示。

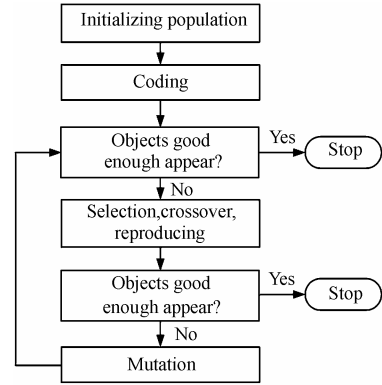


图 2 遗传算法流程框图

Fig.2 Genetic algorithm cycle

### 3.2 编码及遗传操作中的各种参数

3.2.1 编码 星载 SAR 系统设计中, 天线收发方向图有所不同, 通常发射方向图仅进行相位综合, 而接收方向图可同时进行相位、幅度综合。发射方向图和接收方向图的综合过程是相似的, 只是后者需要优化的变量数比前者多一倍, 不失一般性, 这里以接收方向图的综合过程为例进行讨论。

各个阵元的相位和幅度并不是连续可调, 取值为离散空间。设阵元数为  $ENo$ , 阵元幅度值为  $a_i$  ( $i=1,2,\dots,ENo$ ), 相位值为  $\varphi_i$  ( $i=1,2,\dots,ENo$ )。则所有阵元的幅度可取值为  $ENo$  维离散空间  $S_{aENo}$ , 所有阵元的相位可取值为  $ENo$  维离散空间  $S_{\varphi ENo}$ 。如果使用  $N$  位移相器,  $M$  位放大器, 则二进制编码长度为  $ENo \times (M + N)$  位(若  $ENo=20$ ,  $N=6$ ,  $M=5$  则  $ENo \times (M + N)=220$ , 搜索空间为  $2^{220}$ )。实际计算中对该编码进行过试验, 效率非常低; 如果采用实数编码, 效率可以得到提高, 但存在这样的问题: 优化的结果直接以  $ENo \times 2$  个实数来表示, 但放大器和移相器的输出并不能精确地表达这些实数, 仍然需要进行近似, 从而造成与优化结果的偏差, 即量化误差。

本文采用这样的方法: 编码位数为  $ENo \times 2$ , 每一位用一个实数表示一个幅度值或一个相位值, 这些值在放大器或移相器的可能输出中选择, 即:  $v_i \in S_{ENo}$ , ( $v_i$  为  $a_i$  或  $\varphi_i$ ,  $S_{ENo}$  为  $S_{aENo}$  或  $S_{\varphi ENo}$ , 下同), 每次遗传操作都按照实数编码来进行:  $v_{new\_i} = GA\_Operation(v_{old\_i})$ ,  $v_{old\_i}$ ,  $v_{new\_i}$  分别表示操作前和操作后的幅度值或相位值,  $GA\_Operation$  表示一次遗传操作。但该次操作后以最靠近该值的可选幅度值或相位值来近似, 即:  $v_{new\_i} \leftarrow v_{near\_i} \in S_{ENo}$ , 其中  $v_{near\_i}$  为最靠近  $v_{new\_i}$  的可选值。这样操作的结果使得上文的近似过程在遗传运算中同时被优化, 优化的结果直接作为放大器或移相器的输出。

### 3.2.2 遗传操作规则

(1)交叉规则 使用算术交叉(Arithmetic Crossover)<sup>[4]</sup>,  $A$  与  $B$  为执行交叉的两个个体,  $v_{A\_old\_i}$ ,  $v_{B\_old\_i}$  为对应的基因座(即幅度值或相位值), 那么交叉之后生成的新基因座为

$$\left. \begin{aligned} v_{A\_new\_i} &= v_{A\_old\_i} \cdot \text{Rand}_i + v_{B\_old\_i} \cdot (1 - \text{Rand}_i) \\ v_{B\_new\_i} &= v_{A\_old\_i} \cdot (1 - \text{Rand}_i) + v_{B\_old\_i} \cdot \text{Rand}_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中  $\text{Rand}_i \in (0,1)$ ，为随机数。

(2)变异规则 使用非均匀变异，当一个基因座被选定变异，变异的幅度将根据该基因座所属个体在当前群体中的相对优劣来决定，也就是较好的个体变异的幅度将被设定得比较小，反之则较大。该过程按下述公式来完成<sup>[4]</sup>：

$$\text{Temperature} = 1 - (v_{\text{old}_i} / \text{CurrentBest}) \quad (9)$$

Temperature 是变异相位所属个体的温度系数，CurrentBest 是当前代最大适应度(fitness)。

$$\text{MutationAmp} = 1 - \text{Rand}_i ^ (\text{Temperature} ^ \lambda) \quad (10)$$

MutationAmp 是变异幅度， $\lambda$  是常数，满足： $2 \leq \lambda \leq 5$ ， $\wedge$  表示乘方运算。

变异方向(变大或者变小)随机选定，变异的幅度由下式决定：

$$v_{\text{new}_i} = v_{\text{old}_i} - (v_{\text{old}_i} - v_{\text{Min}}) \text{MutationAmp} \text{ (变大)} \quad (11)$$

$$v_{\text{new}_i} = v_{\text{old}_i} + (v_{\text{Max}} - v_{\text{old}_i}) \text{MutationAmp} \text{ (变小)} \quad (12)$$

$v_{\text{Max}}, v_{\text{Min}}$  分别为  $S_{\text{ENO}}$  中的最大值和最小值。

上述方法的好处在于保护较好的个体，同时利用较差个体较大幅度的变异来搜索新的区域，加快搜索的过程并维持群体多样性。

### 3.3 约束条件的处理

上述遗传操作尚未考虑约束条件的因素。在演化计算领域中，带约束条件的遗传算法已经得到了深入的研究。这里借用一种基于 Nondominated Sorting<sup>[5]</sup> 的约束处理方法。

两个约束条件被改写为如下形式<sup>[6]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} g_1(a_i, \varphi_i) &= \min_{\theta \in C_1} (\min G(\theta, a_i, \varphi_i) - A_1 \text{dB}, 0) \\ g_2(a_i, \varphi_i) &= \min(-\max_{\theta \in C_2} G(\theta, a_i, \varphi_i) + A_2 \text{dB}, 0) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

只有当  $g_j(a_i, \varphi_i) = 0$  时，当前个体为可行个体(解)，其中  $N$  为当前群体中可行个体的总数。Nondominated Sorting 用来对群体的可行性进行排序，每个个体得到一个序号  $\text{rank}1_n$ ；按照目标函数即模糊度的大小对群体进行另一次排序，每个个体得到一个序号  $\text{rank}2_n$ ；综合两个序号：

$$\text{rank}_n = N \cdot \text{rank}2_n + (\text{Population} - N) \cdot \text{rank}1_n \quad (14)$$

以该值为个体的适应度，作为上文遗传操作的依据。

### 3.4 优化结果

假设卫星工作在 L 波段，飞行高度  $H = 600\text{km}$ ，天线法向  $\alpha_0 = 35^\circ$ ，天线距离阵元数为  $\text{ENo} = 20$ 。遗传操作中群体规模(Population)100，选择概率和变异概率分别为 0.6 和 0.05。通常通过 10000 代以内的遗传操作，就会得到比较满意的结果。

(1)在不同视角，给定脉冲重复频率时，综合后与未综合天线方向图效果及模糊度比较，如表 1 所示：

从表 1 和图 3 可以看出，给定脉冲重复频率，在 3 种视角时，综合过的方向图模糊度比未经综合的方向图都有所降低。

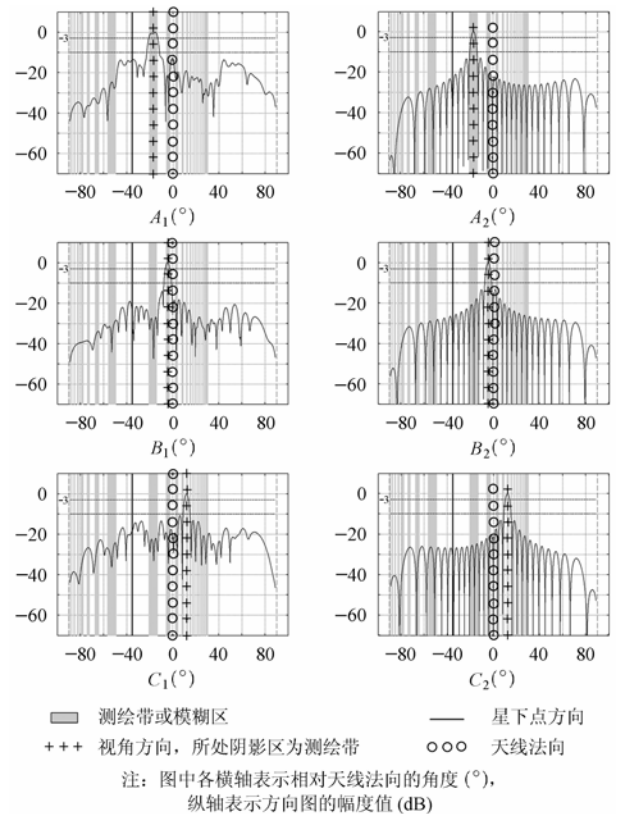


图 3 3 种视角时天线方向图综合效果

Fig.3 Performance of the pattern synthesis at three different view angles (2)给定测绘带宽(40km)，在同一视角(47°)改变  $P_{rf}$ ，综合后与未综合天线方向图效果比较，如表 2 所示。

表 1 3 种视角时方向图及模糊度综合效果

Tab.1 Results of pattern synthesis at three different view angles

序号	综合方式	$P_{rf}$ (Hz)	中心视角 (°)	测绘带宽度(km)	波束宽度 (°)	最大副瓣电平(dB)	模糊度(dB)
A <sub>1</sub>	收发合成方向图	1845	18.00	90.00	7.89	-12.74	-42.77
A <sub>2</sub>	收发均匀口面等效				7.24	-12.76	-29.20
B <sub>1</sub>	收发合成方向图	1855	31.00	55.00	3.88	-14.03	-45.34
B <sub>2</sub>	收发均匀口面等效				3.59	-13.17	-32.51
C <sub>1</sub>	收发合成方向图	1850	47.00	40.00	3.48	-10.69	-20.55
C <sub>2</sub>	收发均匀口面等效				3.66	-13.12	-18.19

表 2 同一视角, 不同 $P_{rf}$ 时的综合效果

Tab.2 Results of pattern synthesis at the same view angle but different  $P_{rf}$  (s)

序号	综合方式	$P_{rf}$ (Hz)	波束宽度 (°)	最大副瓣(dB)	模糊度(dB)
D1	收发合成方向图	1700.00	3.62	-12.01	-21.58
D2	收发均匀口面等效		3.66	-13.12	-16.79
E1	收发合成方向图	1850.00	3.48	-10.69	-20.55
E2	收发均匀口面等效		3.66	-13.12	-18.19
F1	收发合成方向图	2000.00	3.44	-12.24	-19.16
F2	收发均匀口面等效		3.66	-13.12	-13.61

由表 2 可见, 在同一视角( $47^\circ$ ), 给定测绘带宽(40km)条件下, 未综合方向图只在  $P_{rf}=1850\text{Hz}$  时模糊度小于  $-18\text{dB}$ , 而用本文方法综合过的方向图在 3 种  $P_{rf}$  的模糊度均小于  $-18\text{dB}$ 。这表示在给定模糊度的条件下,  $P_{rf}$  的选取变得更加灵活。

#### 4 结束语

本文简化了星载 SAR 天线方向图综合的模型, 直接以 ASR 为目标函数结合有关主瓣和副瓣的两个约束条件应用遗传算法进行综合, 在编码中应用了介于二进制编码与实数编码之间的一种方式。计算的结果显示, 遗传算法在降低星载 SAR 模糊特性的天线综合中有良好的表现, 在降低模糊的同时很好地控制了主瓣宽度和副瓣电平, 使  $P_{rf}$  的选择变得更为灵活; 由于该问题并不要求实时性, 应用遗传算法在优化速度上也是可以接受的。

#### 附录

##### (1) 卫星飞行中各变量几何关系

图 4 是星载 SAR 的距离向示意图,  $\alpha_0$  为天线法向,  $\alpha$  为视角方向,  $\theta$  为电磁波传播方向( $R$ )与天线法向之间的夹角,  $\psi$  为擦地角,  $R$  为天线到地面物体的距离。以下是  $\theta$ ,  $\psi$ ,  $R$  与  $t_d$  的关系:

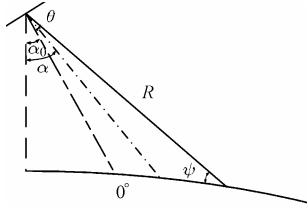


图 4 几何关系示意图

Fig.4 Observation geometry

$$\theta = -\alpha_0 \pm \arccos\left(\frac{(R_e + H)^2 - R_e^2 + (ct_d/2)^2}{(R_e + H)ct_d}\right) \quad (\text{A-1})$$

当  $R$  指向星下点外侧方向时取+, 反之取-;  $c$  为光速,  $R_e$  为地球半径,  $H$  为卫星飞行高度。

$$\psi = \arcsin\left(\frac{(R_e + H)^2 - R_e^2 - (ct_d/2)^2}{R_e ct_d}\right) \quad (\text{A-2})$$

$$\sigma(\psi) = \tan(\psi) \quad (\text{A-3})$$

$$R = ct_d/2 \quad (\text{A-4})$$

##### (2) 关于天线方向图的关系式

设待综合天线上的各阵元幅度和相位为  $a_i, \varphi_i, i=1, 2, \dots, \text{ENo}$ ,  $\text{ENo}$  为阵元数目, 则功率方向图为

$$G(\theta) = e^2(\theta) \left( \sum_{i=1}^{\text{ENo}} a_i^2 + 2 \sum_{m=1}^{\text{ENo}-1} \sum_{n=m+1}^{\text{ENo}} a_m a_n \cdot \cos((n-m)kd \sin(-\theta) + \varphi_m - \varphi_n) \right) \quad (\text{A-5})$$

其中, 设  $e(\theta) = \cos^0.6(\theta)$  为阵元方向图;  $k = 2\pi f/c$ ,  $f$  为卫星工作频率;  $d$  为阵元间距。

#### 参考文献

- [1] Barbarossa S. An antenna pattern synthesis technique for spaceborne SAR performance optimization. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(2): 255-259.
- [2] Haupt R. Genetic algorithm design of antenna arrays. *IEEE Proceedings on Aerospace Applications Conference*, Aspen, CO USA, Feb. 1996, Vol. 1: 103-109.
- [3] 张澄波. 综合孔径雷达——原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1980: 475-477.
- [4] Michalewicz Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin Heidelberg, Springer Press, 1992: 99-102.
- [5] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 1995, 2(3): 221-248.
- [6] Angantyr A, Andersson J, Aidanpaa J. Constrained optimization based on a multiobjective evolutionary algorithm. *Proceedings of the 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003)*, Vol. 3, IEEE Press, Canberra, Australia, December 2003: 1560-1567.

张 杨: 男, 1980 年生, 硕士生, 专业方向为通信信息系统, 对演化计算以及程序设计感兴趣。

邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 研究领域为星载合成孔径雷达系统设计与工程实现。