

星载 SAR 波束展宽研究

徐 慧 李建新 胡明春

(中国电子科技集团第十四研究所天线与微波技术国防科技重点实验室 南京 210013)

摘 要: 该文提出了一种新型的混合遗传算法——基于排序的主动变异型退火-遗传算法(AMAGA), 描述了星载 SAR 天线部分单元仅相位加权波束展宽方法, 并将量化效应考虑在内, 避免了量化所带来的误差, 计算结果可直接工程应用。部分单元仅相位加权波束展宽方法比满阵单元相位加权更具有可实现性和灵活性。文中给出波束展宽实例, 宽波束主瓣内凹口可以控制, 且波束具有较低的副瓣电平。

关键词: SAR; 波束展宽; 部分相位加权; 混合遗传算法; 量化

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0540-04

Research on Beam Widening of Spaceborne SAR

Xu Hui Li Jian-xin Hu Ming-chun

(The 14th Research Institute, CETC, National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: This paper proposes a novel mixed genetic algorithm—Active Mutating Anneal-Genetic Algorithm(AMAGA) based on sorting and describes an elevation beam widening method of spaceborne SAR antenna, which only changes the phases at part of array elements and so called Partly Phase-only Weighting Method (PPWM). Moreover, the resulting phases need not be quantized and can be directly applied to engineering project. In comparison with the fully phase-only weighting method for beam widening, the partly phase-only method for beam widening is more realizable and more flexible. Simulated examples show that the mainlobe notch of widened beam can be controlled finely with lower sidelobe.

Key words: SAR; Beam widening; Partly phase-only weighting; Mixed genetic algorithm; Quantization

1 引言

为了满足星载SAR成像幅宽的需要, 要求天线的距离向波束可以展宽若干倍。由于星载SAR固态有源相控阵天线采用了分布式T/R组件, 其距离向的波束扫描通过T/R组件中的移相器加以实现, 所以仅采用相位加权实现距离向波束展宽是一种很好的方法。仅相位加权波束展宽利用已有的设备——移相器, 不增加硬件设备量, 具有工程应用价值。另外, 部分相位加权^[1]在减小计算量的同时又达到波束展宽的目的, 比满阵相位加权更具有吸引力。因此, 本文具体描述了部分相位加权波束展宽方法, 满阵相位加权仅为一种特殊情况。

传统的仅相位加权波束展宽方法, 利用在天线口径上附加平方或立方相差等手段展宽波束, 简单易行, 其局限性主要在于: (1)难以大倍数高效地展宽天线波束; (2)产生移相器量化误差; (3)难以兼顾副瓣电平和效率的需要。克服这些缺点较有效的办法就是采用非线性优化, 而天线阵规模越大越复杂。同时, 传统的各种最优化方法, 往往容易陷入局部最优解, 达不到理想的效果, 且难以兼顾副瓣约束、工程应用等因素。

遗传算法(GA)与模拟退火(SA)都是模拟自然界的某些

规律来进行问题求解的优化算法。如何将它们有机地结合起来, 是目前研究的一个有意义的课题。模拟退火算法和遗传算法两种算法都是全局随机优化算法, 它们在传统的基于梯度的优化方法难以解决的复杂优化问题中显示了优良的求解特性, 得到广泛研究和应用。虽然遗传算法有较强的全局搜索性能, 但在实际应用中容易产生早熟收敛的现象, 且在进化后期搜索效率较低。而模拟退火算法却具有摆脱局部最优点的的能力, 能抑制遗传算法的早熟现象。因此, 考虑将模拟退火的思想引入遗传算法中, 可以有效地克服遗传算法易陷入局部最优的弱点。

因此, 本文提出了一种基于排序的主动变异型退火-遗传算法(Active Mutating Anneal-Genetic Algorithm based on sorting), 将模拟退火策略引入到遗传算法的变异操作中, 对主动变异结果以双向概率接收, 并将该算法应用于星载 SAR 距离向波束展宽。此外, 该算法采用二进制编码遗传算法, 将移相器量化效应考虑在内, 同时对展宽倍数、主瓣内凹口、副瓣电平等等加以约束。其计算分析结果可直接工程应用, 避免了通常方法实数值向二进制值转化所带来的量化误差。

目前采用混合遗传算法进行距离向波束展宽的文献较为鲜见。本文第2节论述了常规相位加权波束展宽方法, 第3节论述了部分单元仅相位加权波束展宽原理, 第4节论述

了混合遗传算法的执行方案,第5节给出了部分单元相位加权波束展宽的优化实例,初步表明该算法是有效的。

2 常规相位加权波束展宽方法

常规相位加权波束展宽方法,利用了在天线口径上附加平方、立方相差展宽波束的基本原理。对于一个具有 N 个单元的均匀直线阵,可如下式在天线每个单元上附加平方相差实现天线波束展宽:

$$\varphi_n = c \left(\frac{2n - (N + 1)}{N - 1} \right)^2 \quad (1)$$

式中 $n=1, 2, \dots, N$; c 为常数。调整 c 值,可以使天线波束宽度展宽到相应的倍数。有时可以考虑在式(1)中加入立方相差项,甚至于用其它形式的方法^[2-4],这里不一一赘述。

可以看出,公式中所计算出的相位必须加以量化,从而得到移相器可实现的量化值。对第 n 个单元的相位值 φ_n 的量化公式如下:

$$\varphi_n^q = \text{Int}(\varphi_n / \delta) \cdot \delta \quad (2)$$

式中 $\text{Int}(x)$ 表示对括号内数值 x 四舍五入取整; δ 为移相器的最小移相量,它与移相器的位数 K 有关,可表示为

$$\delta = 2\pi / 2^K \quad (3)$$

最大移相量为

$$\varphi_{\max} = 2\pi - \delta \quad (4)$$

天线波束展宽后,天线的方向性系数会有一定程度的下降,从而导致增益下降,这是必然结果。为了表征天线波束展宽前后的增益特性,这里引入口径利用系数的定义:

$$\eta = \left| \sum_{n=1}^N a_n e^{j\varphi_n} \right|^2 / \left(N \sum_{n=1}^N a_n^2 \right) \quad (5)$$

式中 a_n 为第 n 个单元的激励幅度。

3 部分单元仅相位加权波束展宽方法

如图1所示,考虑间距为 d 的 N 元线阵,在理想情况下,当各单元幅度分布为 a_n ,初始各单元相位为零时,场强方向图可以描述为

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n \exp[j(n-1)u] \quad (6)$$

相位加权波束展宽后的场强方向图为

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n \exp(j\varphi_n) \exp[j(n-1)u] \quad (7)$$

其中 $u = 2\pi d(\sin\theta - \sin\theta_0) / \lambda$, θ 为从阵列法向算起的角度, λ 为波长, φ_n 为第 n 个天线单元的相位。假定相位呈对称分布,则 $\varphi_n = \varphi_{N-n+1}$ 。

设 M 为线阵某一端相位加权的单元数,当 $M < n \leq N/2$

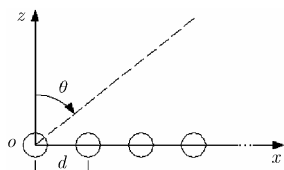


图1 N 单元等距阵几何结构

(N 为偶数)或 $M < n \leq (N+1)/2$ (N 为奇数)时 $\varphi_n = 0$, 则加权相位依次为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M, 0, \dots, 0, \varphi_{N-M+1}, \dots, \varphi_{N-1}, \varphi_N$ 。当 $M=N/2$ 或 $M=(N+1)/2$, 便实现了满阵相位加权。因此满阵相位加权只是部分相位加权的一种特殊情况。

由波束展宽的思想,并兼顾副瓣约束,采用加权方法可得如下目标函数:

$$f = \alpha_1 \left| \frac{\text{SLL} - \text{SLL}_0}{\text{SLL}_0} \right| + \alpha_2 \left| \frac{\text{BW} - \text{BW}_0}{\text{BW}_0} \right| \quad (8)$$

式中 SLL 为当前最大副瓣电平, SLL_0 为目标最大副瓣电平, BW 为当前波束宽度, BW_0 为目标波束宽度。针对不同情况,适当调整目标值,会得到较好的效果。 α_1, α_2 为加权系数,它们的大小直接影响副瓣和波束展宽的性能。

从式(8)中可以看出,展宽的最终目的就是求

$$\min_{\forall \varphi_n \in \Phi} f \quad (9)$$

式中 $\Phi = \{ \forall \varphi \mid 0 \leq \varphi \leq \varphi_{\max} \}$ 。

4 基于排序的主动变异型退火-遗传算法

基于排序的主动变异型退火-遗传算法的步骤如下:

(1) 编码 具有 K 位数字移相器的相位为

$$\varphi_m = \frac{360}{2^K} \times \{ k_1 + k_2 2^1 + k_3 2^2 + \dots + k_K 2^{(K-1)} \} \quad (10)$$

所以,可将 N 个单元相位的二进制编码依次排列构成染色体,即

$$V = \left\{ \underbrace{k_1^1 k_2^1 \dots k_K^1}_{\varphi_1} \underbrace{k_1^2 k_2^2 \dots k_K^2}_{\varphi_2} \dots \underbrace{k_1^N k_2^N \dots k_K^N}_{\varphi_N} \right\} \quad (11)$$

其中 $k_i^j \in \{0, 1\}$, $i = 1 \sim K$, $j = 1 \sim N$, 上标 j 与单元序号相联系。在相控阵天线中, K 一般为5左右。考虑到部分相位加权的对称关系,上述染色体长度还可以减半甚至更少。

(2) 群体成员的再生产或繁殖(基于排序的轮盘赌选择机制^[5])。

(3) 个体成员之间的基因交换(避同交叉机制^[6])。

(4) 个体成员的变异。

变异的目的是引入随机扰动,增加染色体的多样性,保证在全空间进行搜索,从而使算法具有全局最优性,它进一步增强了基于排序遗传算法的搜索能力。但较大的变异概率会破坏已有的好的模式;较小的变异概率无法保持群体的多样性,容易出现未成熟收敛和收敛速度慢的现象。

模拟退火算法具有摆脱局部最优点的能力,因此,本文将模拟退火算法的 Boltzman 机制引入遗传算法中,提出了一种基于排序的主动变异型退火-遗传算法,即在遗传算法的变异算子中加大变异概率,直至为 1,并对变异结果以双向概率接收,一方面可以加大局部搜索的力度,另一方面又可以减小较优模式的破坏概率。当

$$\min \{ 1, \exp(-(f_{k+1} - f_k) / T_k) \} > \text{rand} \quad (12)$$

接受新解,其中 rand 是区间 $[0, 1]$ 内的随机数, f_{k+1} 为变异后新解的适应函数值, f_k 为变异前的适应函数值, T_k 为当前

温度。

(5) 终止准则 令 $T_{k+1} = T_k \alpha$ ($\alpha < 1$ 但接近于 1)。若满足收敛依据, 则退火-遗传过程结束; 否则, 转(1), 其中退火温度 T 控制着求解过程向最小值的优化方向进行, 同时它又以概率 $\exp(-(f_{k+1} - f_k)/T_k)$ 来接受劣质解, 因此算法可以跳出局部极值点, 得到全局最优。

5 计算实例

考察一均匀直线阵, 单元数 $N=32$, 间距 $d = \lambda/2$, 相位呈对称分布, 各单元激励幅度为 1。理想情况下, 当初始各相位为 0 时, 即 $\{\varphi_n = 0 | n = 1, 2, \dots, N\}$, 场强方向图的主功率点波瓣宽度为 3.17° , 最高副瓣电平为 -13.23dB 。

(1) 常规相位加权波束展宽方法 图 2 画出了天线波束展宽至约 3.8 倍时的阵列各单元相位量化前的分布曲线。若考虑 5 位移相器的相位量化, 即 $K=5$, 则相位量化前后的波瓣图如图 3 所示, 图中实线为相位量化前的展宽波瓣图, 虚线为相位量化后的展宽波瓣图。该例中, $c=246^\circ$, 相位量化前后的天线波束宽度、副瓣电平、口径利用系数和法向方向性系数等参数参见表 1。可以看出, 天线波束展宽后, 其副瓣电平恶化严重, 只有 -3.65dB 左右, 且主瓣处有近 -3dB 的凹口, 口径利用系数非常低。此外, 更大的展宽倍数已经无法实现, 而且主瓣凹口进一步深化。

(2) 基于排序的主动变异型退火-遗传算法的部分相位加权 示例针对线阵两端各 12 个单元相位对称加权, 即 $M=12, \varphi_n = 0, 13 \leq n \leq 20$ 。计算了两种情况, 分别对应于: (a) $\text{SLL}_0 = -17\text{dB}, \text{BW}_0 = 12^\circ$, 如图 4 所示; (b) $\text{SLL}_0 = -14\text{dB}, \text{BW}_0 = 14^\circ$, 如图 5 所示。图中虚线代表未展宽前波束, 实线为展宽波束。波束展宽后的天线性能参数见表 1。

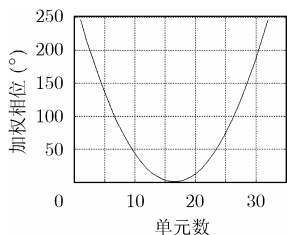


图 2 32 元阵相位分布

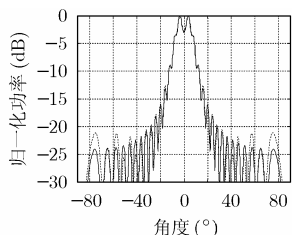


图 3 常规方法波束展宽量化前后波瓣图

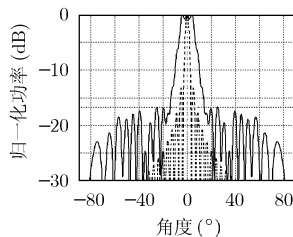


图 4 场强波瓣图

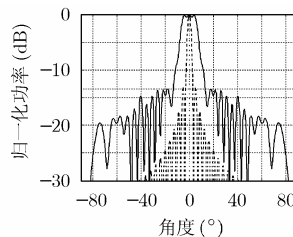


图 5 场强波瓣图

(3) 基于排序的主动变异型退火-遗传算法的满阵相位加权 在此情况下, 所有单元均相位加权, 相位分布对称。计算了两种情况, 分别对应于: (a) $\text{SLL}_0 = -17\text{dB}, \text{BW}_0 = 12^\circ$, 如图 6 所示; (b) $\text{SLL}_0 = -14\text{dB}, \text{BW}_0 = 14^\circ$, 如图 7 所示。图中虚线代表未展宽前波束, 实线为展宽波束。波束展宽后的天线性能参数见表 1。

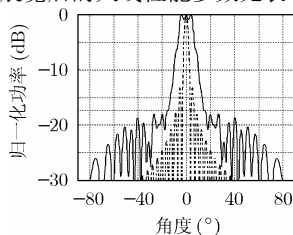


图 6 场强波瓣图

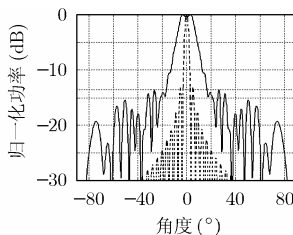


图 7 场强波瓣图

在上面的计算中, 限制主瓣内凹不超过 0.5dB , 不满足条件的个体直接剔除。从示例可以看出, 波束宽度和最大副瓣都达到了预期要求, 证明了该算法的有效性, 且此算法要比常规相位加权波束展宽方法好得多。但随着展宽倍数的增大, 副瓣也会随之抬高, 因此需要适当调整加权系数和目标要求, 以满足特定需要。

此外, 部分和满阵相位加权展宽性能相差不多。满阵相位加权仅是部分相位加权的一个特例, 而部分相位加权不仅可简化计算, 且更具有工程可实现性和灵活性。

6 结束语

该文提出了一种基于排序的主动变异型退火-遗传算法, 主要叙述了部分相位加权距离向波束展宽方法, 对部分和满阵相位加权控制波瓣图的波束展宽进行了举例, 均得到了较低的副瓣和较大的展宽倍数。满阵相位加权只是部分相位加权的一种特殊情况。部分相位加权具有运算量少、调整单元数少的特点, 同时又具有很大的灵活性。在实际工程应用中, 可根据实际需要选择恰当的单元数进行相位加权, 以达到波

表 1 波束展宽参数性能表

示 图	波束宽度($^\circ$)	展宽倍数	副瓣电平(dB)	口径利用系数(%)	方向性系数(dB)
图 3(实线)	11.92	3.76	-3.62	13.65	11.41
图 3(虚线)	12.09	3.81	-3.45	13.95	11.41
图 4(实线)	11.92	3.76	-16.74	25.90	14.25
图 5(实线)	13.98	4.41	-13.42	21.57	13.51
图 6(实线)	11.94	3.76	-17.24	25.56	14.16
图 7(实线)	13.98	4.41	-13.66	18.86	12.91

束展宽的目的。此外,本文所得到的相位加权分析结果已计入相位量化效应。

在作者下一步的工作中将探讨仅相位加权所能实现的最大展宽倍数,并分析其与方向性系数、副瓣电平参数之间的关系,同时研究幅相误差对天线波束展宽的影响,以期为工程应用奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 李建新. 阵列部分单元相位加权波瓣综合. 电波科学学报, 1997, 12(2): 216-219.
 - [2] 王寒松等. 波束展宽的实现及其应用. 〇八一科技, 2002, (1): 23-25.
 - [3] Stutzman W L and COFFEY E L. Radiation pattern synthesis of planar antennas using the iterative sampling method. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1975, 23(6): 764-769.
 - [4] Khzmalyan A D and Kondratiev A S. The phase-only shaping and adaptive nulling of an amplitude pattern. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2003, 51(2): 264-272.
 - [5] 王小平等. 遗传算法—理论、应用及软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 19-20.
 - [6] 马云辉. 基于遗传算法的唯相位控制方向图零点生成. 微波学报, 2001, 2(17): 41-46.
- Ma Yun-hui. Null steering using genetic algorithms by controlling only the current phases. *Journal of Microwaves*, 2001, 2(17): 41-46.
- 徐 慧: 女, 1978年生, 硕士, 助理工程师, 研究方向为相控阵天线、波束赋形、稀疏阵等.
- 李建新: 男, 1966年生, 硕士, 研究员, 硕士生导师, 发表论文60余篇, 研究方向为星载 SAR 相控阵天线、自适应天线和赋形反射面天线等.
- 胡明春: 男, 1963年生, 硕士, 研究员, 硕士生导师, 副总工程师, 天线与微波技术国防科技重点实验室南京分部主任. 研究方向为相控阵天线等.