

# 一种基于遗传算法的最小熵自聚焦方法

左绍山, 张振华, 邓志强, 张 彬, 石建新, 张剑琦  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 自聚焦算法是获得高质量合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 图像的重要步骤。针对复杂成像场景和复杂运动误差 SAR 自聚焦问题, 提出一种基于遗传算法的最小熵自聚焦方法。方法通过高阶多项式函数拟合相位误差, 以图像熵为代价函数, 利用遗传算法最小化代价函数进而估计出相位误差, 尤其适合于成像场景没有孤立强散射点、高阶相位误差不能忽略的自聚焦问题。仿真数据和实测数据处理结果证实算法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 自聚焦; 最小熵; 遗传算法

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)02-0061-08

## Autofocus method based on the minimum-entropy criterion and Genetic Algorithm

ZUO Shaoshan, ZHANG Zhenhua, DENG Zhiqiang, ZHANG Bin, SHI Jianxin, ZHANG Jianqi  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Autofocus algorithm is significant to acquire high quality Synthetic Aperture Radar (SAR) images. In order to focus the SAR images with complex scene and complex motion error, this paper proposed an autofocus method based on the minimum-entropy criterion and genetic algorithm. In the method, the phase error in the SAR image is modeled by the polynomial and the entropy of the images is the cost function. Then the cost function is minimized by the genetic algorithm to obtain the optimal estimation of the phase error. The proposed method is especially suitable for the problems that there are less isolated prominent points and the high-order phase error is not negligible. The simulated data and the real data results have validated the method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Autofocus; Minimum-entropy (ME); Genetic Algorithm (GA)

## 引 言

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 具有全天候、全天时、探测距离远等特点<sup>[1,2]</sup>。SAR 借助合成孔径技术, 能够对观测场景进行二维高分辨率成像, 极大提高了雷达信息感知和获取的能力<sup>[3]</sup>。因其优异的性能, SAR 在军事和民用领域得到广泛应用。

SAR 成像技术通过相对运动形成虚拟孔径, 从而实现方位向高分辨率成像。但是, 平台运动既是 SAR 成像的根本, 也是 SAR 成像误差的主要来源<sup>[2,3]</sup>。对于实际 SAR 系统, 尤其是轻小型无人机载 SAR, 其运动航迹很容易受到外界环境的影响而不能保持理想的匀速直线运动, 进而引入运动误差, 降低信号相干性, 影响 SAR 成像质量。因此, 运动补偿是 SAR 成像中不可缺少的重要步骤。运动补偿技术可以分为两类, 即基于惯性导航系统、全球定位系统等测量设备的运动补偿方法和基于数据的自聚焦方法。基于测量设备的运动补偿主要通过 SAR 平台安装惯性导航系统、全球定位系统等运动传感器, 获取平台的运动信息, 然后计算平台偏离理想航线的误差并进行补偿。惯性测量系统具有较高的短时测量精度, 但是由于误差漂移, 长期定位精度差。一般通过增加 GPS 或者差分 GPS 来校正惯性测量系统的长期误差, 以提高测量结果的精确度<sup>[4]</sup>。基于数据的自聚焦方法主要是从回波数据或者成像结果中估计误差并补偿, 来获取高质量的 SAR 图像。自聚焦算法也可以划分为两类<sup>[5]</sup>, 即基于相位误差的自聚焦方法和基于 SAR 图像质量的自聚焦方法。基于相位误差的自聚焦方法包括特显点方法<sup>[1]</sup>、子视相关方法 MD<sup>[6]</sup>

(Map Drift) 和相位梯度自聚焦方法 PGA<sup>[1,7]</sup> (Phase Gradient Autofocus) 等。特显点方法首先提取 SAR 图像中的多个孤立强散射点, 然后估计出特显点的相位误差并对复图形进行补偿。MD 方法利用子孔径数据之间的频谱偏移估计信号的调频率误差, 再对调频率误差进行积分得到相位误差。该方法适用于二阶相位误差估计, 它的出现对高分辨率雷达成像技术的发展起了很大的促进作用<sup>[5,6]</sup>。PGA 方法把相位梯度作为估计对象, 通过对选取的特显点移位、加窗、相位误差梯度估计等处理得到相位误差, 它能同时补偿低阶和高阶的相位误差。由于其在相位误差估计方面性能优良, 而得到广泛应用。最初, PGA 方法是了解决 SAR 聚束模式自聚焦问题而提出的, 而且其性能受到成像场景的影响。算法中选点的孤立性及窗函数的宽度对相位误差的估计精度有很大影响<sup>[8,9]</sup>。为了进一步提高 PGA 算法的稳健性和适用范围, 研究人员对其进行了改进和完善<sup>[8-12]</sup>。基于 SAR 图像质量的自聚焦方法主要有最大对比度自聚焦方法<sup>[4,5]</sup>、最小熵自聚焦方法<sup>[13]</sup>等。这类方法将图像质量评价函数, 比如对比度、熵, 作为代价函数, 通过优化代价函数得到相位误差的最优解。这些方法往往需要迭代搜索, 以得到全局最优解, 计算量比较大。参考文献[14]提出了一种基于切比雪夫多项式和级数反演的自聚焦方法 CA-MSRA, 该方法不需要迭代运算, 大大提高了计算效率。但是, 该方法只估计二阶相位误差, 没有考虑更高阶的误差。

在实际应用中, 成像场景复杂多样, 不一定有孤立的强散射点, 图像的信噪比也不一定足够高。除此之外, 雷达运动轨迹比较复杂, 只采用二阶相位误差模型往往不能很好地逼近真实的相位误差, 剩余的高阶误差也会影响成像质量。为了减少成像场景对自聚焦算法的限制, 同时能够估计更高阶(三阶及以上)的相位误差, 本文提出了基于遗传算法的最小熵自聚焦方法 GA-ME。该方法利用高阶多项式拟合相位误差以熵函数为代价函数, 通过遗传算法<sup>[15]</sup>得到最优的多项式系数, 实现相位误差高精度估计。

## 1 自聚焦算法

本节简要介绍经典的 PGA 算法和 CA-MSRA 算法。

### 1.1 PGA 算法

假设粗聚焦后的图像中某个强散射点为  $x(n,m)$  (二维时域), 其方位频域信号表示为  $x(n,k)$ 。

$$x(n,k) = A_n \cdot \exp[j(\phi_0 + \phi_e(k))] + \varepsilon(k) \quad (1)$$

式中,  $n$  表示第  $n$  个距离单元,  $k$  为方位采样单元,  $A_n$  表示孤立强散射点的幅度,  $\phi_0$  表示该散射点的相位,  $\phi_e(k)$  表示相位误差,  $\varepsilon(k)$  表示噪声。将方位向的相邻两个脉冲信号共轭相乘可得

$$\Delta x(n,k) = A_n^2 \cdot \exp[j(\phi_e(k) - \phi_e(k-1))] + g(k) \quad (2)$$

PGA 算法没有直接估计相位误差  $\phi_e(k)$ , 而是将相位误差的梯度  $\Delta\phi_e(k) = \phi_e(k) - \phi_e(k-1)$  作为估计对象。为了减少噪声干扰项  $g(k)$  的影响, 需要在多个距离单元中选择孤立强散射点。通过叠加处理估计出相位梯度。相位梯度的最大似然估计表示为

$$\Delta\phi_e(k) = \arg\left[\sum_{n=1}^{N_s} \Delta x(n,k)\right] \quad (3)$$

式中,  $N_s$  表示强散射点的个数,  $\arg[\cdot]$  表示取相位运算。

估计出相位梯度后, 对相位梯度进行累加得到相位误差

$$\phi_e(k) = \sum_{i=1}^k \Delta\phi_e(i) \quad (4)$$

PGA 算法的流程图如图 1 所示。

理论上, PGA 算法能够估计任意相位误差。但是, PGA 算法需要场景中存在强散射点, 选点的孤立性及窗函数的宽度对相位误差的估计精度有很大影响<sup>[9]</sup>。另外, PGA 算法要求 SAR 图像有较大的信噪比<sup>[5]</sup>。

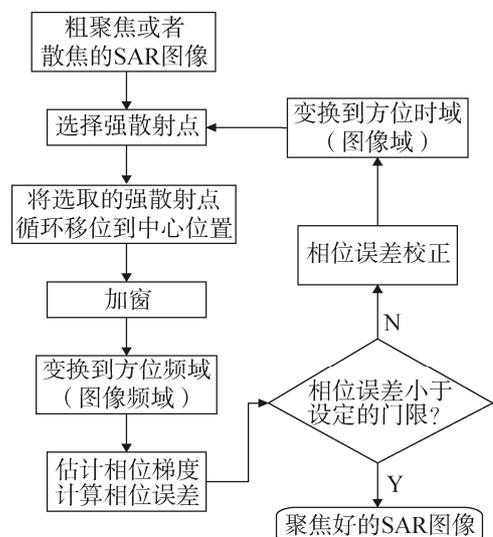


图 1 PGA 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of PGA

## 1.2 CA-MSRA 算法

CA-MSRA算法以图像熵作为评价准则,利用切比雪夫多项式和级数反演对熵函数进行建模和求解,通过最小化熵函数来获得相位误差系数的最优解。

假设相位误差为

$$\phi_e(k) = a \cdot k^2 \quad (5)$$

其中,系数  $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$ ,  $a_{\min}$  和  $a_{\max}$  是系数的下限和上限。对相位误差进行估计和补偿,估计的相位误差越接近真实值,图像聚焦效果越好,图像熵就越小。因此,图像熵可以表示为系数  $a$  的函数  $E(a)$ 。为了方便切比雪夫多项式拟合,令

$$a = \frac{a_{\max} + a_{\min}}{2} + \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2} b \quad (6)$$

其中,  $-1 \leq b \leq 1$ , 用  $b$  替换  $a$ , 熵函数  $E(a) = E(\frac{a_{\max} + a_{\min}}{2} + \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2} b) = F(b)$ 。利用  $I=4$  阶切比雪夫多项式拟合  $F(b)$ , 可得

$$F(b) = \sum_{i=1}^4 H_i C_i(b) = \mu_0 + \mu_1 b + \mu_2 b^2 + \mu_3 b^3 + \mu_4 b^4 \quad (7)$$

式中,  $C_i(b)$  为切比雪夫多项式的系数,

$$H_i = \begin{cases} \frac{1}{I+1} \sum_{p=0}^I F(x_p), i=0 \\ \frac{2}{I+1} \sum_{p=0}^I F(x_p) \cos[\frac{(2p+1)}{2(I+1)} i\pi], i>0 \end{cases} \quad (8)$$

$x_p$  为切比雪夫多项式的节点,  $x_p = \cos[\frac{(2p+1)}{2(I+1)} \pi]$ 。

$$\begin{cases} \mu_0 = H_0 - H_2 + H_4 \\ \mu_1 = H_1 - 3H_3 \\ \mu_2 = 2H_2 - 8H_4 \\ \mu_3 = 4H_3 \\ \mu_4 = 8H_4 \end{cases} \quad (9)$$

当熵函数最小时,  $\frac{dF(b)}{db} = \mu_1 + 2\mu_2 b + 3\mu_3 b^2 + 4\mu_4 b^3 = 0$ 。利用级数反演方法可以得到  $b$  的最优解

$$b_{\text{opt}} = -\frac{1}{2\mu_2} \mu_1 - \frac{3\mu_3}{8\mu_2^3} \mu_1^2 - \frac{9\mu_3^2 - 4\mu_2\mu_4}{16\mu_2^5} \mu_1^3 \quad (10)$$

根据式(6)可得  $a$  的最优解  $a_{\text{opt}}$ , 进而计算出最优的相位误差。

相比于误差尝试方法, CA-MSRA 算法不需要迭代运算, 运算效率高。但是这种算法只考虑了二次相位误差, 不能估计三次及以上的误差。另外, 系数  $a$  的范围应该包含其最优解  $a_{\text{opt}}$ , 如果  $a_{\min}$  和  $a_{\max}$  选得不合适, 就得不到全局最优的  $a_{\text{opt}}$ , 进而影响相位误差估计精度。

## 2 本文算法

### 2.1 信号模型

假设回波信号已经经过脉冲压缩和距离徙动校正, 此时二维时域信号(图像域)为  $x(n, m)$ ,  $n=1, 2, \dots, N$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ 。其中,  $N$  为距离向采样点数,  $M$  为方位向采样点数。将  $x(n, m)$  变换到方位频域(图像频域)

$$X(n, f) = \text{FFT}[x(n, m)] \quad (11)$$

式中,  $f$  表示方位频率,  $\text{FFT}[\cdot]$  表示傅里叶变换。当存在相位误差时,

$$X(n, f) = X_0(n, f) \cdot \exp[j\phi_e(f)] \quad (12)$$

式中,  $X_0(n, f)$  表示理想无误差的信号,  $\phi_e(f)$  为相位误差,  $\exp(\cdot)$  表示指数运算,  $j = \sqrt{-1}$  表示虚数单位。

在实际中, 相位误差  $\phi_e(f)$  往往是未知的。在本文中采用多项式函数逼近相位误差, 即

$$\phi_e(f) = \sum_{i=2}^K a_i \cdot f^i \quad (13)$$

式中,  $K$  为多项式函数的阶数,  $a_i$  是第  $i$  阶多项式的系数, 是未知的。由于一次项相位误差 (线性相位误差) 只影响聚焦位置, 而不影响聚焦效果。因此, 本文中只考虑阶数  $i \geq 2$  的相位误差。

### 2.2 图像熵

熵源于信息论领域, 表示数据中含有信息的多少。当利用熵作为图像质量的评价标准时, 可以发现, 图像熵值越小, SAR 图像聚焦效果越好; 反之, SAR 图像散焦越严重。图像熵计算方法如下

$$E = -\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{nm} \cdot \ln(p_{nm}) = -\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{|x(n, m)|^2}{E_z} \cdot \ln \frac{|x(n, m)|^2}{E_z} = -\frac{1}{E_z} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |x(n, m)|^2 \cdot \ln |x(n, m)|^2 + \ln E_z \quad (14)$$

其中,  $E_z = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |x(n, m)|^2$  表示图像的总能量,  $|x(n, m)|^2$  表示图像的强度,  $p_{nm}$  表示图像像素的归一化强度。

### 2.3 算法流程

为了得到聚焦良好的 SAR 图像, 首先要估计出相位误差  $\phi_e(f)$ 。相位误差的估计准确度决定着 SAR 图像聚焦质量。遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来的一种启发式优化算法, 具有高效、全局优化等特点。遗传算法根据优胜劣汰, 适者生存的原则, 通过种群中个体的进化, 逐次产生一个近似最优解, 最终得到全局最优解。本文将最小熵准则和遗传算法相结合, 来估计相位误差, 即以多项式函数系数  $a_i (i=2, 3, \dots, K)$  为变量, SAR 图像的熵值作为个体适应度评价函数, 通过遗传算法来最小化图像熵; 当图像熵最小时, 认为估计的相位误差最逼近真实的相位误差。具体步骤如图 2 所示。

#### ① 设置参数

设置多项式函数的阶数为  $K$ , 即遗传算法中变量个数为  $K-1$ ; 确定种群中个体数量  $N_p$ , 量化位数  $Q$ , 以及交叉概率  $P_c$ 、变异概率  $P_m$ ; 确定最大遗传代数  $G_{\max}$ 。

#### ② 生成初始种群 $P_0$

随机生成一个大小为  $N_p \times (K-1)$  的矩阵, 每一行代表种群中的一个个体  $P_0^k$ , 每个个体包含  $K-1$  个变量  $(a_2, a_3, \dots, a_K)^k$ , 上标  $k$  表示种群中第  $k$  个个体,  $1 \leq k \leq N_p$ 。

#### ③ 计算图像的熵

首先对图像进行相位校正,

$$\hat{x}(n, m) = \text{IFFT}[\text{FFT}[x(n, m)] \cdot \exp(-\hat{\phi}_e(f))] \quad (15)$$

式中,  $\text{IFFT}[\cdot]$  和  $\text{FFT}[\cdot]$  分别表示逆傅里叶变换和傅里叶变换,  $\hat{\phi}_e(f)$  表示由系数  $(a_2, a_3, \dots, a_K)^k$  生成的相位误差。然后按照式 (14) 计算  $\hat{x}(n, m)$  的熵  $E_k$ ,  $1 \leq k \leq N_p$ 。

#### ④ 编码

将种群中各个变量转换成  $Q$  位二进制数, 示意图如图 3 所示。

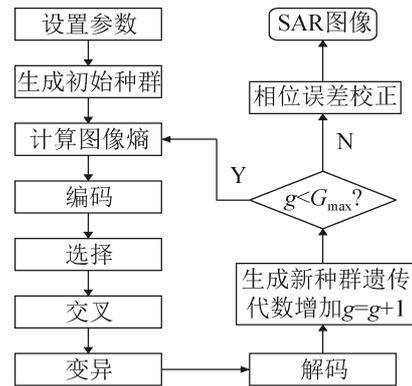


图 2 本文算法流程图  
Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

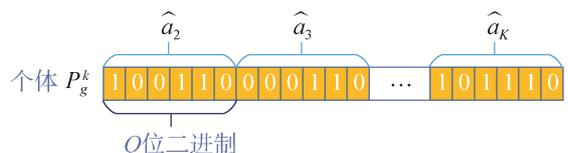


图 3 编码示意图  
Fig. 3 Diagram of coding

⑤ 选择

选择操作的目的是在群体中选择适应力强的个体产生新的群体。根据每个个体适应度值的大小进行选择，适应度大的个体对应的变量被遗传到下一代群体的概率大；反之，适应度值小的个体对应的变量被遗传到下一代群体的概率小。通过优胜劣汰使得个体的适应度值不断接近最优解。本文以图像熵作为适应度评价准则，采用轮盘赌的方式进行选择操作。具体来说，首先计算群体适应度值的总和  $F = \sum_{k=1}^{N_p} \frac{1}{E_k}$ ；

然后，计算每个个体的选择概率  $p_k = \frac{1}{E_k F}$ ，以及累计概率  $s_k = \sum_{k=1}^{N_p} p_k$ ， $1 \leq k \leq N_p$ ；接下来生成随机数  $r$ ， $0 \leq r \leq 1$ ，如果  $s_k \leq r \leq s_{k+1}$ ，则第  $k+1$  个个体被选择。

⑥ 交叉

交叉操作是对两个相互配对的个体按某种方式相互交换其部分基因（编码后的变量序列，如图4所示），从而形成两个新的个体。交叉运算是遗传算法的重要步骤，是区别于其他进化算法的重要特征。本文中采用单点交叉的方式交换两个配对个体的部分基因，首先，生成  $N_p$  个 0~1 之间的随机数，确定小于交叉概率  $P_c$  的随机数的位置  $k_1, k_2, \dots$ ，找到  $k_1, k_2$  对应的个体  $P_g^{k_1}, P_g^{k_2}$  作为交叉对象；然后随机生成交叉点位置，并交换交叉点之后的基因。交叉过程如图4所示。

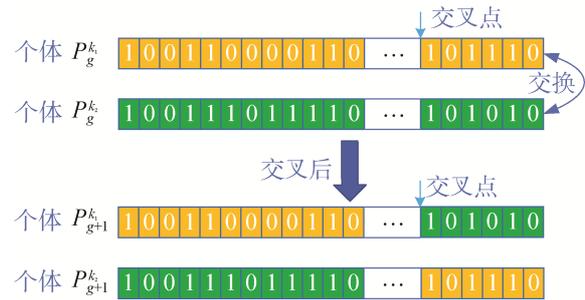


图4 交叉示意图

Fig. 4 Diagram of crossover

⑦ 变异

变异是以较小的概率对个体编码序列上的某个位值进行改变，即将0变为1，将1变为0，进而生成新个体。变异操作是遗传算法中不可缺少的步骤，使得遗传算法有良好的全局优化能力。首先生成  $Q \cdot (K-1)$  个 0~1 之间的随机数，随机序列值小于变异概率  $P_m$  的位置编号对应的基因位置发生变异。变异过程如图5所示。

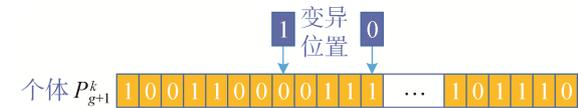


图5 变异示意图

Fig. 5 Diagram of mutation

⑧ 解码

和编码相对应，将二进制数转换成十进制数。

⑨ 生成新种群

判断算法是否收敛或者遗传代数是否达到设置的最大遗传代数  $G_{max}$ 。如果没有达到  $G_{max}$ ，则重复步骤③~⑧，直到满足终止条件。最后进行相位校正，得到聚焦好的 SAR 图像。

从算法步骤可以看出，本文提出的基于遗传算法的最小熵自聚焦方法能够估计高阶（阶数大于2）的相位误差，而且对成像场景，比如场景均匀度、信噪比以及孤立特显点等特征无特殊要求，具有比较广的适用性。

3 实验

为了验证所提算法的性能，我们分别进行仿真实验和实测数据处理。

3.1 仿真数据处理

实验中采用来自 Sandia 实验室的无人机 SAR 复图像。首先，对聚焦良好的 SAR 复图像加入方位向相位误差，加入误差前、后图像如图6所示。从图6可以看

表1 GA-ME 算法参数  
Table 1 Parameters for the GA-ME method

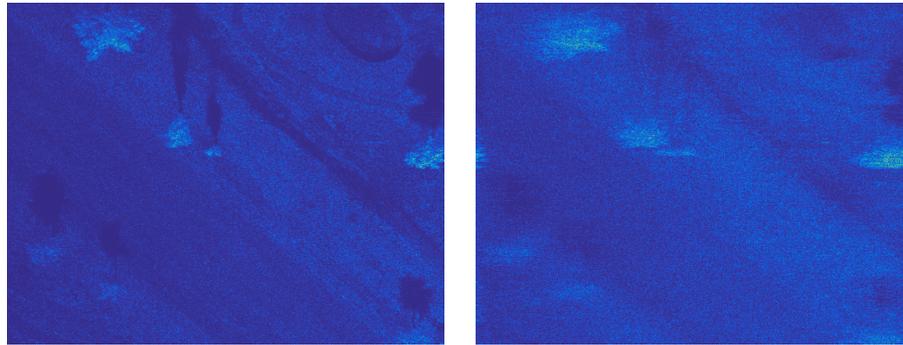
参数	值
种群数量	50
最大遗传代数	250
量化位数	60
阶数	5
交叉概率	0.05

表2 图像熵

Table 2 Entropy of the images

图像	熵
原始图像	12.342 5
加入误差后的图像	12.562 1
PGA	12.383 4
CA-MSRA	12.402 0
GA-ME	12.345 7

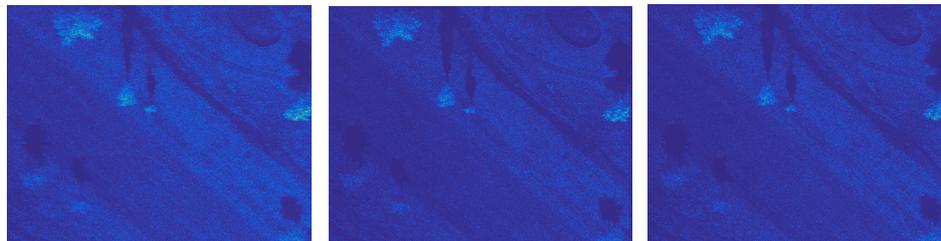
出，加入相位误差前图像聚焦良好，加入误差后，图像方位向散焦（图中水平表示方位向，垂直表示距离向）；然后分别采用 CA-MSRA 算法、PGA 算法和本文算法进行聚焦处理（在处理过程中，GA-ME 算法设置的参数见表 1），成像结果如图 7 所示。成像结果的熵见表 2。



(a) 加入相位误差前 (a) The original image (b) 加入相位误差后 (b) The blurred image

图 6 加入相位误差前后的 SAR 图像

Fig. 6 SAR images before and after blurring by the phase error



(a) CA-MSRA 聚焦效果 (a) Autofocus by CA-MSRA (b) PGA 聚焦效果 (b) Autofocus by PGA (c) 本文算法聚焦效果 (c) Autofocus by GA-ME

图 7 成像结果

Fig. 7 Autofocus results

估计的相位误差如图 8 所示。

相位误差的估计值与真实值之间偏差的均方根 RMS 见表 3。

### 3.2 实测数据结果

为了进一步验证算法的性能，我们分别采用 CA-MSRA 算法、PGA 算法和本文所提的 GA-ME 算法对某机载实测数据进行自聚焦处理，以图像的熵、图像中的强散射点的方位剖面图来评价三种算法的聚焦性能。在处理过程中，GA-ME 算法设置的参数见表 1。实测数据的参数如表 4 所示。

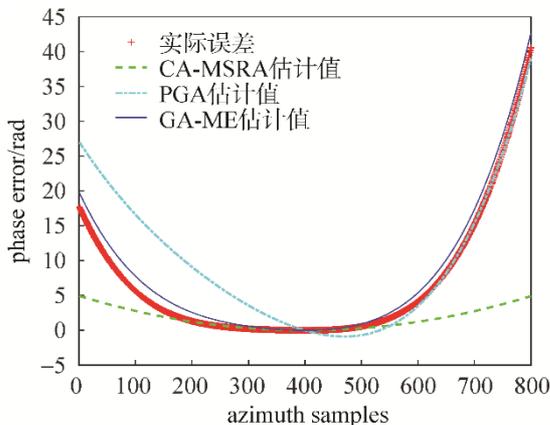


图 8 估计的相位误差

Fig. 8 The estimated phase error

表 3 估计值的均方根误差

Table 3 Root mean square errors

估计方法	均方根误差
CA-MSRA	9.192 5
PGA	6.307 6
GA-ME	1.473 0

表 4 实测数据参数

Table 4 The parameters of the real data

参数	值
带宽	500 MHz
采样率	600 MHz
脉冲重复频率 PRF	1 000 Hz
作用距离	10 km
载机速度	50 m/s

三种算法聚焦效果如图9所示。

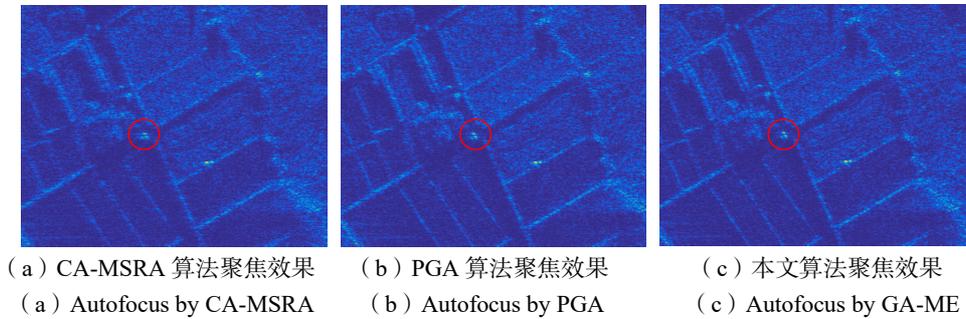


图9 实测数据聚焦效果

Fig. 9 Autofocus results of the real data

红圈中强散射点放大图如图10所示。

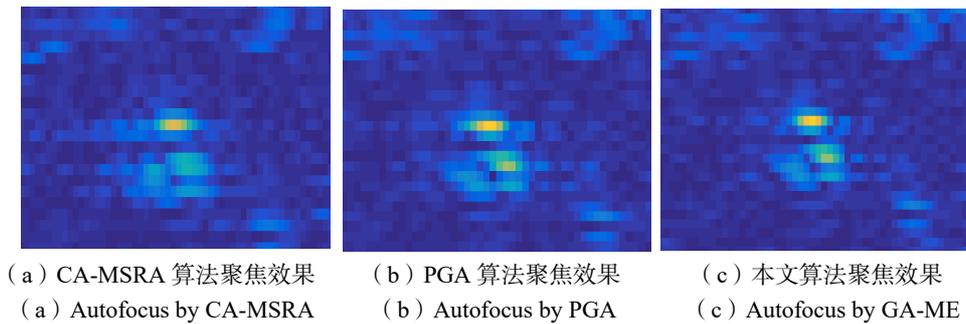


图10 图9红圈中强散射点

Fig. 10 Points in the red circle in Fig. 9

红色圈中孤立强散射点的方位剖面图如图11所示。

### 3.3 实验结果分析

图7是仿真数据成像结果，可以看出，相比于图6(b)三种自聚焦方法都能得到比较清楚的SAR图像。图8给出了三种算法估计的相位误差，表3给出了相位误差估计的均方根误差。可以看出，CA-MSRA算法的相位误差估计值均方根误差最大，这是因为仿真实验中加入了三次以上的相位误差，而CA-MSRA算法只能估计二次相位误差，无法估计三次及以上的相位误差。由于仿真实验采用的SAR图像中没有明显的强散射点，这就给PGA算法中找点和加窗带来困难，进而影响了相位误差估计精度，导致其估计的相位误差与真实误差有一定差异。本文算法能够估计高阶相位误差，而且对成像场景没有要求，因此本文算法估计的相位误差最接近真实的相位误差（均方根误差最小）。图9、图10分别是实测数据成像结果以及成像结果在孤立特显点（图9红色圆圈内的点）放大图。图11给出了实测数据成像结果中强散射点的方位剖面图，相比于CA-MSRA算法和PGA算法，本文算法聚焦结果的主瓣最窄，旁瓣最低。表2和表5分别给出了仿真和实测数据聚焦结果的熵，可以发现本文算法成像结果的熵最小，表明本文所提出的GA-ME算法聚焦效果最佳。

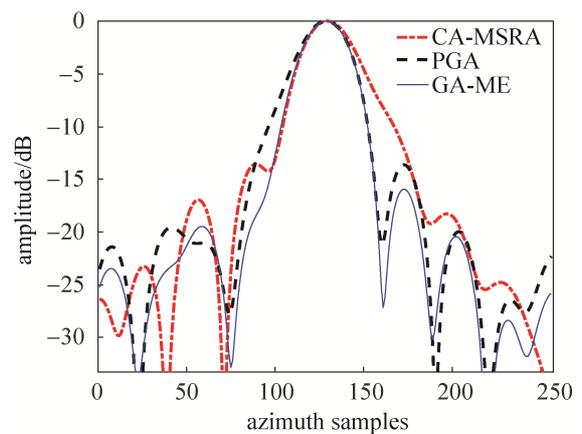


图11 强散射点的方位剖面图

Fig. 11 The profile of the strong point in azimuth direction

表5 成像结果的熵

聚焦方法	图像熵
CA-MSRA	11.427 1
PGA	11.409 5
GA-ME	11.399 7

Table 5 Entropy of the results

#### 4 结束语

本文提出了一种基于遗传算法的最小熵自聚焦方法。该方法采用图像熵作为评价准则, 采用遗传算法估计相位误差。相比于经典的 CA-MSRA 算法和 PGA 算法, 所提方法能够估计三阶以上的相位误差, 而且没有选强散射点等过程, 不受成像场景限制。仿真数据和实测数据处理实验结果验证了本文所提算法的有效性。需要说明的是, 本文算法在估计相位误差过程中需要迭代运算, 计算量比较大。如何减少算法迭代次数, 提高计算效率需要进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.
- [2] CARRARA W G, GOODMAN R S, MAJEWSKI R M. Spotlight synthetic aperture radar: signal procession algorithm[M]. Boston, MA: Artech House, 1995.
- [3] 张磊. 高分辨 SAR/ISAR 成像及误差补偿技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.  
ZHANG Lei. Study on high resolution SAR/ISAR imaging and error correction [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [4] 高阳. 高分辨率机载 SAR 运动误差估计及自聚焦方法研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2014.  
GAO Yang. Study on motion error estimation and autofocus for high resolution airborne SAR[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, 2014.
- [5] 皮亦鸣, 杨建宇. 合成孔径雷达成像原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.  
PI Yiming, YANG Jianyu. The principle of synthetic aperture radar imaging[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2007.
- [6] 邢孟道. 基于实测数据的雷达成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2002.  
XING Mengdao. Study of radar imaging methods based on real data[D]. Xi'an: Xidian University, 2002.
- [7] WAHL D, EICHEL P, GHIGLIA D, et al. Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 827–835.
- [8] CALLOW H J, HAYES M P, GOUGH P T. Stripmap phase gradient autofocus [C]. IEEE in Proc. OCEANS, Sep, 22–26, 2003, 5: 2414–2421.
- [9] 卿吉明, 徐浩煜, 梁兴东, 等. 一种可用于实时成像的改进 PGA 算法[J]. 雷达学报, 2015, 4(5): 600–607.  
QING Jiming, XU Haoyu, LIANG Xingdong, et al. An improved phase gradient autofocus algorithm used in real-time processing[J]. Journal of Radars, 2015, 4(5): 600–607.
- [10] GOUGH P T, HAYES M P, GRIFFITHS D R. Stripmap path correction using phase matching autofocus[A]. 5th ECUA, Lyon, France, July, 2000: 412–418.
- [11] EVERS A, JACKSON J A. A Generalized phase gradient autofocus algorithm[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2019, 5(4): 606–619.
- [12] EVERS AARON, JACKSON JULIE ANN. Generalized phase gradient autofocus using semidefinite relaxation phase estimation[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2019, 6(1): 291–303.
- [13] ZENG T, WANG R, LI F. SAR image autofocus utilizing minimum-entropy criterion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1552–1556.
- [14] XIONG Tao, XING Mengdao, WANG Yong, et al. Minimum-entropy-based autofocus algorithm for SAR data using Chebyshev approximation and method of series reversion, and its implementation in a data processor[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(3): 1719–1728.
- [15] GOLDBERG D E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning[M]. Addison Wesley Publishing Company, 1989.

#### [作者简介]

- 左绍山 1988 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为合成孔径雷达成像算法。  
 张振华 1977 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达成像。  
 邓志强 1986 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 SAR/MTI 雷达系统技术。  
 张 彬 1982 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为 SAR 成像。  
 石建新 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 SAR 成像算法与 DSP 实现。  
 张剑琦 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 SAR 成像算法与系统。