

## 一种适用于机载 SAR 的改进 PACE 自聚焦算法

薛国义 周智敏 安道祥  
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** PACE 算法是一种新的非模型的高性能 SAR 图像自聚焦算法,可以有效提取 SAR 图像中高频相位误差。由于 PACE 算法直接以图像相位误差校正值系列为待估计参量,计算量巨大,该文从提高 PACE 算法的执行效率的角度出发,提出了一种插值 PACE 算法(IPACE)。IPACE 算法以图像对比度函数为目标函数,以待估计的相位校正矢量中的若干个相位校正值为自变量,通过拟牛顿算法迭代获得它们的最优估计,然后通过插值获得整个相位误差校正矢量的最优估计值。IPACE 算法可以有效地减少待估计变量的个数,提高算法的执行效率,同时几乎不降低算法的聚焦性能。实际相位误差未知的超宽带 SAR 回波数据的聚焦结果表明了该算法能显著改善图像的质量,是一种鲁棒性良好的图像自聚焦算法。

**关键词:** SAR; PACE; 自聚焦; 对比度; 梯度; IPACE

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2719-05

## An Improved Phase Adjustment by Contrast Enhancement Algorithm for Airborne SAR

Xue Guo-yi Zhou Zhi-min An Dao-xiang  
(Electronic Science and Engineering Institute, NUDT, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Phase Adjustment by Contrast Enhancement (PACE) algorithm is a new nonparametric autofocus algorithm, which can extract effectively high frequency phase errors from Synthetic Aperture Radar (SAR) images. PACE algorithm searching the best parameters by optimization method needs much heavy computation load because it takes directly the phase correction vector as variables to be estimated. To reduce the computation load, an improved PACE algorithm is proposed in this paper, which is called Interpolated PACE (IPACE) algorithm. The IPACE takes the contrast function as object function and some variable of the phase correction vector as parameters to be estimated. The IPACE algorithm needs much less computation load than the PACE, and the image quality achieved by IPACE is almost the same good as the quality through PACE. The results of focusing the real SAR data show the method is a good robust autofocus algorithm.

**Key words:** SAR; Phase Adjustment by Contrast Enhancement (PACE); Autofocus; Contrast; Gradient; IPACE

### 1 引言

机载 SAR 成像要求载机沿航线作理想的匀速直线运动,但由于受到气流等因素的影响,载机很难保持匀速直线运动,高效的运动补偿技术是获得高分辨 SAR 图像的关键之一。常见的基于回波数据的运动补偿方法主要有两类,一类是基于模型的补偿方法,如 RDM<sup>[1]</sup>, MapDrift<sup>[2]</sup>, 对比度最优(COA)<sup>[3-5]</sup>等,这些算法只能补偿低阶相位误差(主要是二次项误差);另外一类是基于无模型的 PGA 算法<sup>[6]</sup>, PGA 算法理论上可以补偿任意阶相位误差,被公认为是一种鲁棒性好、补偿效果明显的自聚焦算法。

PACE(Phase Adjustment by Contrast Enhancement)<sup>[7]</sup>是一种新的基于无模型的自聚焦算法,可以有效提取 SAR 图像中的高频相位误差,由 Jesse Kolman 于 2005 年提出。

一般可以认为,图像的聚焦好坏与图像的对比度有着直接的关系,当回波中相位误差达到最小、图像聚焦达到最优时,图像的对比度也达到最大。PACE 算法正是利用相位误差与对比度的这种关系来确定回波中相位补偿矢量。与以往的以图像对比度为基准的自聚焦算法<sup>[3-5]</sup>不同,PACE 算法直接把回波相位校正矢量(回波中相位误差矢量的相反值)作为待估计变量,把对比度函数作为目标函数,通过拟牛顿算法或共轭梯度算法<sup>[8]</sup>搜索使目标函数达到最大的最优变量值,算法的实质是将相位误差估计问题转化成无约束的非线性最优化问题。由于 PACE 算法是以图像的整体聚焦状况来判断图像的聚焦好坏,并不需要图像中存在孤立的强散射点,因此,算法理论上的性能在信噪比较低和没有明显孤立点的情况下比 PGA 好,文献[7]的仿真实验也证明了这一点。

由于 PACE 算法直接把回波相位校正矢量作为待估计量,导致在通过最优化求解最佳参数时需要迭代的次数过

多,尤其是当处理的图像方位点较多时,PACE算法运算量过大,其图像自聚焦效率令人难以接受,为此,本文提出了一种IPACE(Interpolated Phase Adjustment by Contrast Enhancement)算法,通过估计相位误差校正序列中的若干个变量,利用这已估计出的变量通过分段牛顿插值获得整个相位误差校正矢量,从而有效地减少了PACE算法中待估计变量个数,提高了算法的运算效率,同时保证了算法的聚焦性能。同原始的PACE算法一样,实现IPACE算法的关键是给出对比度函数关于各个插值节点的梯度,本文中给出了这一求解梯度表达式的过程。此外,与文献[7]中实验方法不同,本文通过对未知误差的超宽带SAR图像聚焦来验证算法的有效性(文献[7]通过在已聚焦好的图像中加入相位误差使得图像散焦,然后再通过PACE来提取相位误差、聚焦图像来验证PACE算法的性能)。

## 2 PACE算法的基本原理<sup>[7]</sup>

PACE算法根据图像对比度的变化,通过最优化搜索的方法来寻找回波中相位误差校正矢量的最优估计。通常,在最优化搜索中,需要定义一个目标函数和一个待估计的变量或矢量,在PACE算法中,定义图像对比度函数 $C$ 为最优化搜索时的目标函数,定义待估计的相位校正矢量 $\phi = [\phi(0), \phi(1), \dots, \phi(N-1)]$ 为最优化搜索中的待估计参量。下面根据目标函数和待估计参量来描述PACE算法的数学模型。

PACE算法中目标函数(对比度函数) $C$ 定义为图像幅度的均方差与均值之比,考虑到用多个距离门平均减少噪声的影响, $C$ 可用下式表示:

$$C = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \frac{\sigma_i}{\mu_i}, \quad i = 0, \dots, M-1 \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (|f_i(n)| - \mu_i)^2} \quad (2)$$

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |f_i(n)| \quad (3)$$

式(1)中, $\sigma_i$ 为某个距离门上图像幅度的均方差, $\mu_i$ 为均值, $M$ 为所选用的距离门数,式(2)、式(3)中, $n$ 为方位向采样单元序号, $N$ 为方位向总共采样点数, $f_i(n)$ 为复图像的像素值,当SAR成像的最后一步通过逆傅里叶变换实现SAR方位向聚焦时,图像像素可用下式表示:

$$f_i(n) = \sum_{k=0}^{N-1} u_i(k) \exp(j2\pi nk/N), \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$u_i(k) = \tilde{u}_i(k) \exp(j\phi(k)), \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (5)$$

式(4)中, $u_i(k)$ 为复图像经过傅里叶变换后的频域回波数据,式(5)中 $\tilde{u}_i(k)$ 为含有相位误差的回波数据, $\phi(k)$ 为消除回波中相位误差用到的相位校正函数。由式(2)-式(5)可以看出,图像幅度的均方差和均值都是频域相位校正矢量 $\phi(k)$ 的函数,因此,PACE算法的数学模型可表示为

$$\max C(\phi) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \frac{\sigma_i(\phi)}{\mu_i(\phi)} \quad (6)$$

式(6)中, $\max$ 表示求最大值。显然式(6)表示的是一个无约束非线性最优化问题,需要通过最优化理论中的拟牛顿算法或共轭梯度算法来搜索使对比度函数达到最大的 $\phi$ ,从而,PACE算法将SAR回波中相位误差估计问题转化成无约束非线性最优化估计问题。由于拟牛顿算法或共轭梯度算法在迭代搜索中都要求提供目标函数关于自变量的梯度表达式(通过数值求解的方式求取梯度的计算效率非常低、运算量大,给出梯度表达式是实现PACE算法的关键),因此,在迭代搜索相位校正矢量的最优估计之前,需要先提供对比度函数关于相位校正矢量的梯度表达式<sup>[7]</sup>:

$$\frac{dC}{d\phi(k)} = \sum_{i=0}^{M-1} \gamma_i \cdot \text{Im}[u_i^*(k)q_i(k)] \quad (7)$$

$$\gamma_i = -\frac{1}{MN} \left( \frac{1}{\sigma_i} + \frac{\sigma_i}{\mu_i^2} \right), \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

$$q_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{f_i(n)}{|f_i(n)|} \exp(-j2\pi nk/N) \quad (9)$$

根据式(7)、式(8)、式(9)确定的梯度表达式,并根据最优化算法的原理就可以通过迭代的方式求取回波中相位校正矢量的最优估计值。

## 3 PACE算法的改进

在原始PACE算法中,为了提取回波中的高频相位误差,它将相位校正矢量序列中的每一个值都作为一个变量,待估计参量值过多,导致计算量巨大(在文献[5]中,虽然提供了一种计算量较小、能提取回波中二次相位误差的方法,但这种方法只能提取SAR图像中的低阶多项式相位误差,不能有效提取图像中的高频相位误差),对于含 $N$ 个变量的正定二次函数,由于不可避免的计算机数值误差,共轭梯度法搜索变量的最优值的迭代次数通常都会大于 $N^2$ ,对于如式(6)表示的复杂函数,搜索迭代次数更是远超过 $N$ ,PACE算法迭代次数与待估计变量个数直接相关。当需要聚焦的图像方位点较多时,显然,利用PACE算法提取相位误差的效率将会很低,因此,为了提高算法的运算效率,必须减少待估计变量的个数。

### 3.1 本文提出的IPACE算法

实际上,SAR图像方位向采样率(亦即相位误差曲线采样率)通常远大于图像中相位误差的带宽,根据Nyquist采样定理,当采样率不小于相位误差的带宽时即可通过插值无失真地恢复出原相位误差曲线,因此,可以通过对相位误差校正曲线降采样,仅估计原相位误差校正序列中的若干点,然后根据这些已知点通过插值恢复出原相位误差校正系列。根据这一原理,本文提出一种插值PACE算法(IPACE),以减小算法的运算量,同时并能有效提取回波中的高频相位误差。

IPACE算法仅估计相位校正矢量中若干个变量,依据这些已估计出的变量值通过插值得到整个相位校正系列。考虑如图1所示的插值示意图:设需要估计的相位校正矢量为

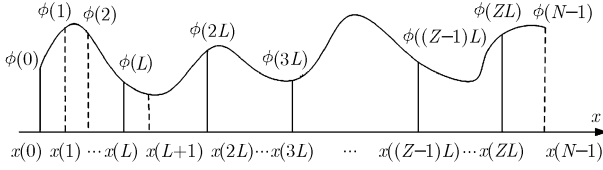


图 1 分段 Newton 插值示意图

$\phi = [\phi(0), \phi(1), \dots, \phi(N-1)]$ , 共  $N$  个变量, 校正矢量对应的频率矢量为  $\mathbf{X} = [x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)]$ , IPACE 算法估计矢量为  $\phi_z = [\phi(0), \phi(L), \dots, \phi(ZL)]$ , 即仅估计  $\phi$  中的  $Z+1$  个变量(实线部分对应的相位校正变量), 然后由  $Z+1$  个插值节点(坐标值为  $(x(0), \phi(0)), (x(L), \phi(L)), \dots, (x(ZL), \phi(ZL))$ )通过某种插值算法获得整个相位校正矢量的估计。

为了简单起见, 本文采用分段牛顿抛物线插值的方法来拟合整个相位校正系列(用高阶多项式拟合复杂的曲线的精度远不如分段多项式插值拟合的精度高), 并设各个已知的插值节点的距离都是相同的。同时, 为了充分利用已估计出的相位校正序列, 减少有限次多项式插值带来的误差, 采用如下规则获得插值序列: 当  $1 \leq P \leq Z-1$  时, 待插值区间  $[x(PL), x((P+1)L)]$  中的  $L$  个被插值点通过 3 节点  $(x((P-1)L), \phi((P-1)L))$ 、 $(x(PL), \phi(PL))$ 、 $(x((P+1)L), \phi((P+1)L))$  抛物线插值得到, 而待插值区间  $[x(0), x(L)]$  中的  $L+1$  个被插值点通过 3 节点  $(x(0), \phi(0))$ 、 $(x(L), \phi(L))$ 、 $(x(2L), \phi(2L))$  抛物线插值得到, 区间  $(x(ZL+1), x(N-1))$  中的待插值点由节点  $(x((Z-2)L), \phi((Z-2)L))$ 、 $(x((Z-1)L), \phi((Z-1)L))$ 、 $(x(ZL), \phi(ZL))$  插值得到。因此, 采用上述规则获得整个相位校正系列的方法可用下式表示:

$$\begin{aligned} \phi(k) = & \alpha_2(\phi(0), \phi(L), \phi(2L)) \text{rect}\left\{\frac{k-L/2}{L}\right\} \\ & + \sum_{p=1}^{Z-1} \alpha_2(\phi((P-1)L), \phi(PL), \phi((P+1)L)) \\ & \cdot \text{rect}\left\{\frac{k-(PL+L/2)}{L}\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中  $\text{rect}(\cdot)$  表示单位幅度的矩形窗,  $\alpha_2(\cdot)$  表示牛顿抛物线插值函数, 可用下式表示:

$$\begin{aligned} \alpha_2(\phi((P-1)L), \phi(PL), \phi((P+1)L)) = & \phi((P-1)L) \\ & + \frac{\phi(PL) - \phi((P-1)L)}{x(PL) - x((P-1)L)} (x(k) - x((P-1)L)) + \dots \\ & + \frac{\phi((P+1)L) - \phi((P-1)L)}{x((P+1)L) - x((P-1)L)} \frac{\phi(PL) - \phi((P-1)L)}{x(PL) - x((P-1)L)} \\ & \cdot (x(k) - x((P-1)L))(x(k) - x(PL)), \end{aligned} \quad (11)$$

如同原始的 PACE 算法一样, 插值 PACE 算法的关键是求出对比度函数关于相位校正矢量的梯度表达式。根据前面的相位插值规则和式(7), 式(8), 式(9)表示的对比度函数关于校正矢量的梯度表达式, 并结合复合函数求导法则, 可以得到对比度函数关于所选插值节点函数值的梯度:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \phi(PL)} = & \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\partial C}{\partial \phi(k)} \frac{\partial \phi(k)}{\partial \phi(PL)} \\ = & \sum_{i=0}^{M-1} \gamma_i \text{Im} \left\{ \sum_{k=(p-1)L+1}^{(p+2)L} H_p(k) u_i^*(k) q_i(k) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$P = 3, 4, \dots, Z-2$$

其中  $\gamma_i$  由式(8)确定,  $q_i(k)$  由式(9)确定,  $H_p(k)$  且由下列 3 式确定:

$$H_p(k) = \begin{cases} \frac{1}{2h^2} (x(k) - x((P-2)L))(x(k) - x((P-1)L)), & k = (P-1)L+1, (P-1)L+2, \dots, PL \\ \frac{1}{h} (x(k) - x((P-1)L)) & \\ -\frac{1}{h^2} (x(k) - x((P-1)L))(x(k) - x(PL)), & k = pL+1, pL+2, \dots, (p+1)L \\ 1 - \frac{1}{h} (x(k) - x(PL)) + \frac{1}{2h^2} (x(k) - x(PL)) \\ \cdot (x(k) - x((P+1)L)), & k = (p+1)L+1, (p+1)L+2, \dots, (p+2)L \end{cases} \quad (13)$$

$$x(k) = kf_s / N \quad (14)$$

$$h = x(3L) - x(2L) = x(4L) - x(3L) \quad (15)$$

式(12)中,  $\partial(\cdot)/\partial(\cdot)$  表示求偏导数, 式(14)中  $x(k)$  表示多普勒频率,  $f_s$  为方位向采样率,  $N$  为方位向总采样点数, 式(15)中的  $h$  表示相邻插值节点间的频率差。

式(12)表述了当  $P \in [3, Z-2]$  时, 对比度函数  $C$  关于插值节点  $\phi(PL)$  的梯度, 当  $P=1, 2$  及  $P=Z-1, Z$  时,  $C$  关于  $\phi(PL)$  及  $\phi(0)$  的梯度表达式可以通过前面类似的方法求得(根据前面所述插值规则, 其梯度需要单独推导), 限于篇幅, 本文不在此列出。

当求得目标函数  $C$  关于被估计的相位校正矢量的梯度表达式后, 就可以通过共轭梯度算法或拟牛顿算法(Quasi-Newton)(本文采用拟牛顿算法)经过若干次迭代后获得 SAR 回波中的相位校正, 进而获得聚焦明显改善的图像。

### 3.2 IPACE 算法中插值节点间距的选取

通常, SAR 载机平台类型不同时, 回波中相位误差带宽不同, SAR 图像最终需要补偿的频率范围也不同<sup>[9]</sup>(这儿所讲的补偿频率范围与载机的类型相关, 但与载机某次的具体飞行无关)。因此, 在应用 IPACE 校正相位误差时, 需要根据 SAR 平台和 SAR 图像方位向采样率来确定插值节点间的间距大小(降采样), 当载机平台较大(如‘运-7’运输机)时, 一般其飞行都较平稳, 回波中相位误差带宽较小, 因此插值节点间间距可以取较大值, 而当载机平台较小(如‘米-8’直升机)时, 则飞行状态相对较差, 回波中相位误差带宽较大, 插值节点间距则不能取得过大。一般情况下, 插值节点间距  $L$  与回波中需要补偿的相位误差带宽  $B$  的关系可以近似用下式表示:

$$L \leq f_s / B \quad (16)$$

式(16)中  $L$  为插值节点间距离(以方位向点数计算),  $B$  为

SAR回波数据需要补偿的相位误差带宽(不同的SAR载机平台对应不同的相位误差带宽值<sup>[9]</sup>,如雷达载机平台为‘运-7’时,载机飞行较平稳,需要对带宽约为10Hz以内的相位误差补偿,而对于‘米-8’直升飞机,载机飞行状态较差,需要补偿的带宽则为40Hz), $f_s$ 为SAR图像方位向采样率(通常 $f_s$ 远大于 $B$ )。

当选取第1个插值节点与待估计的相位校正系列第1点重合(如图1所示)时,并根据式(16),针对不同的载机平台,确定了不同插值节点间距后,就可以确定整个待估计的插值节点序列,然后根据前面所述方法求得各节点估计值,并通过分段Newton插值获得整个待估计相位校正矢量序列,根据这个插值校正矢量序列可以补偿掉回波中残余的高频相位误差,获得质量较好的图像。

### 3.3 IPACE算法与PACE算法的比较

当利用PACE算法提取回波中的高频相位误差时,它将回波相位校正矢量 $\phi$ 中的全部变量都看作是需估计的参数,利用拟牛顿算法搜索最优估计值至少需要 $N$ 次迭代,而当采用本文提出的IPACE算法提取高频相位误差时,由于待估计的变量减少为原来的 $1/L$ 倍( $L$ 为插值节点间距,由载机平台类型决定),相应的迭代搜索次数近似为 $N/L$ ,可见本文提出的IPACE算法计算量可以大大减少。

由前面3.1节可知,IPACE算法通过分段Newton插值来拟合整个相位校正曲线,不管相位校正曲线如何复杂,只要所选择的插值节点间距合适,IPACE都可以最大程度地逼近真实的相位校正曲线,而利用PACE算法提取回波中频域二次相位误差时(本文这种方式的PACE算法为二次PACE算法),计算量虽然可以大大降低,但由于这种二次PACE算法只能提取回波中低频相位误差,当回波中相位校正曲线稍复杂时,该二次PACE算法都无法准确地提取回波中的相位误差。实际数据处理时,常希望在SAR成像的最后阶段通过PGA或其它自聚焦算法消除回波中的高频相位误差,而非低频误差,如P波段超宽带SAR由于合成孔径较长,回波中相位误差表现出很强的高频特性,当利用MD或COA消除了回波中的二次相位误差后,SAR复图像中仍存在严重的高频相位误差,所得图像质量较差,此时需要有效的基于图像域的SAR自聚焦算法来进一步改善SAR图像质量,如在此时应用二次PACE算法聚焦图像,图像质量改善将十分有限,而应用原PACE算法又计算量巨大,自聚焦效率非常低,在此情况下,可以应用本文提出的IPACE算法来消除图像中的高频误差,将可以大大改善图像的质量。

## 4 实验结果

为了验证算法的性能,本文对实际工作在P波段的超宽带SAR回波数据进行了处理。本次试验中采用的UWB SAR回波数据的载机平台为“运-7”飞机,SAR图像方位向采样率为200,下面试验中列出的各幅图像都是从宽幅图像中截取的小部分。每次实验时,先用基于模型的低阶自聚焦算法

(如MD,对比度最优秀)对SAR回波进行初步聚焦,然后将所得复图像经过IPACE算法完成更为精细的聚焦操作,在处理过程中,并不知道SAR回波经过初步聚焦后的剩余相位误差。IPACE算法聚焦图像时,方位向每隔15个采样点估计一个相位校正值,通过抛物线牛顿插值获得整个相位校正系列。

图2(a)为陕西某地域经MD自聚焦后的部分图像(SAR回波数据由国防科技大学电子工程学院提供,载机平台为‘运-7’),图2(b)为图2(a)线框标定区域的局部放大,图2(c)为将MD聚焦后的图像经过IPACE处理后的与图2(b)对应的部分图像。图3(a)为另一地域经对比度最优(COA)自聚焦后的部分图像,图3(b)为经过IPACE处理后的图像对应部分。图4(a)为某地域经MD自聚焦后的部分图像(SAR回波数据由合肥某电子所提供),图4(b)为经过IPACE进一步聚焦后的图像对应部分。

比较图2(b)、2(c)椭圆标定区域,可以发现SAR回波基于MD自聚焦后仍存在大量的高频误差,需要采取进一步的聚焦才能得到聚焦优良的图像,图2(c)表明IPACE算法能有效提取回波中的残余高频相位误差,显著改善图像的质量;图3(b)中的亮点显示经过IPACE聚焦后,点目标聚焦更好(与图3(a)相比);图4(a)显示由于MD自聚焦后仍存在大量的高频相位误差,这些高频误差严重影响图像质量,使得图像中部分纹理模糊,椭圆线框标定区域严重散焦,图4(b)显示IPACE可以有效补偿回波中高频误差,IPACE补偿后的图像纹理清晰,图4(a)中原已散焦的图像经过IPACE补偿后可以得到较好的聚焦,图4(b)的图像质量较图4(a)大幅提高。可见IPACE算法确实能有效提取回波中高频相位误差,显著地改善图像的质量。

此外,我们还比较了PACE算法和本文提出的IPACE算法,实际数据处理的结果表明,IPACE算法的聚焦性能和PACE算法几乎一样(限于篇幅,这儿没有列出原PACE自聚焦后的图像),但算法的执行效率则高得多。对于一副方位向512点,距离向1024点的子图像,PACE算法需要数百次迭代才能完成聚焦操作,而IPACE算法则仅需几十次迭

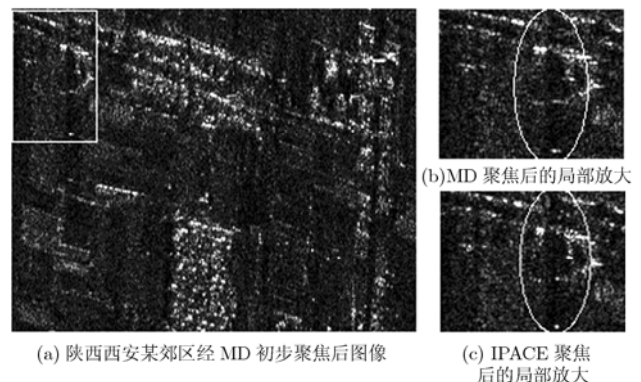


图2

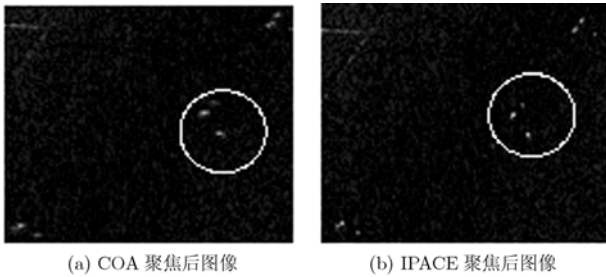


图 3

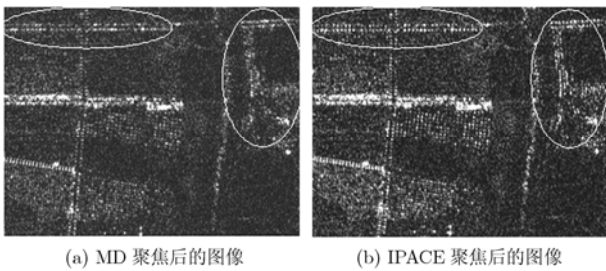


图 4

表 1 PACE 与 IPACE 算法效率比较

聚焦算法	聚焦时间	聚焦效果
PACE	25min 左右	良好
IPACE	1.5min 左右	几乎和 PACE 一样

代就可完成聚焦, 算法执行效率提高了十几倍, 表 1 列出了两种算法执行效率的比较。

而用提取回波中二次相位误差的 PACE 算法则对 MD 或 COA 聚焦后的图像质量几乎没有改善, 实际上, 利用 MD 或 COA 对 SAR 图像进行初步聚焦时即已消除了回波中的低频相位误差, 回波中只存在高频相位误差, 此时再用简化的 PACE 算法提取回波中相位误差显然不会改善图像质量。

## 5 结束语

由于原始 PACE 算法直接以图像中相位误差校正矢量作为自变量来获得校正值系列, 需要的运算量较大, 当需要对宽幅大场景 SAR 图像进行自聚焦时, 即使对于非实时应用的环境, PACE 算法的执行效率有时仍然是令人难以接受的。本文在深入研究了 PACE 算法的原理后, 针对原 PACE 算法待估计变量过多, 计算量巨大的不足, 提出了一种有效减少最优化估计中的变量个数、提高 PACE 算法执行效率的 IPACE 算法。IPACE 算法如同 PACE 算法一样, 可以有效提取回波中的高频相位误差, 同时明显提高了算法的执行效率。实际超宽带 SAR 数据处理的结果表明, IPACE 算法是一种鲁棒性好、能明显改善图像质量的自聚焦算法。

由于 PACE 算法推导中忽略了相位误差的空变特性(文献[5]中的 PACE 算法是针对 spot-light SAR 提出的), 如果

需要将其应用于大测绘带的条带式 SAR, 则需要将宽幅大场景的 SAR 图像沿方位向和距离向分块, 将每一个子块的复图像近似看作聚焦式 SAR 图像, 然后再对子块应用 IPACE 算法进行聚焦得到子图像, 最后再将各子图像拼接起来并消除拼接过程可能带来的图像畸变。

本文的 IPACE 算法是一种均匀插值的 PACE 算法, 实际上可以通过非均匀插值进一步减少待估计变量的个数, 提高算法效率。由于复图像的频域相位误差通常都集中在较低频率部分, 靠近采样率部分的频域相位误差很小, 因此可以研究一种非均匀插值的 PACE 算法。

此外, 由于 IPACE 算法对成像场景无限制, 未来需要用实际回波数据来验证、比较 IPACE(或 PACE)和 PGA 在较均匀场景中的补偿效果的差别。

## 参考文献

- [1] Joao R. Moreira. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1990, 28(4): 620-626.
- [2] Mancill C E and Swiger J M. A map drift autofocus technique for correcting higher order SAR phase error[J]. 27th Annual Tri-Service Radar Symposium Record, Monterey, CA, 1981: 391-400
- [3] Berizzi F and Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic-aperture radar images using contrast optimization. *IEEE Trans. on AES*, 1996, 32(3): 1185-1191.
- [4] 刘月花, 荆麟角. 对比度最优自聚焦算法[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(1): 24-30.
- [5] 武昕伟, 朱兆达. 利用对比度最大化实现 SAR 图像自聚焦[J]. *现代雷达*, 2002, 24(3): 20-22.
- [6] Wahl D E, et al. Phase gradient autofocus-a robust rool for high resolution SAR phase correction. *IEEE Trans. on AES*, 1994, 30(3): 827-834.
- [7] Kolman J. PACE: An autofocus algorithm for SAR. *IEEE International Radar Conference*, May, 2005: 310-314.
- [8] 粟塔山等. 最优化计算原理与算法程序设计. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001, 第 4 章.
- [9] 保铮, 刑孟道等. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2004, 12, 第 6 章.

薛国义: 男, 1975年生, 博士生, 研究方向为SAR运动补偿与信号处理。

周智敏: 男, 1957年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为先进性雷达探测系统与信号处理、SAR信号处理、高速信号处理等。

安道祥: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为SAR实时信号处理与运动补偿。