

# 一种改进的组合实时自聚焦算法

王家海<sup>1,2</sup> 王岩飞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100190)

**摘要:**在高分辨率 SAR 中,方位向运动误差给成像带来的影响越来越大,传统的相位梯度自聚焦(PGA)方法能够估计出运动误差,但其需要多次迭代计算,计算量大,不适合用于实时成像。为了满足高分辨率 SAR 实时成像的需求,提出了一种改进的组合实时 PGA 方法。这种方法将改进的频移相关算法(ISAC)算法、PGA 算法与 RD 成像算法结合运用,不仅使计算量大大减少,而且通过在频移相关算法中加入适量的迭代运算,降低了对运动初始参数的精度要求,取得了较好的成像效果。理论分析和实际数据处理证明了这种方法的有效性。

**关键词:**合成孔径雷达;实时成像;相位梯度自聚焦(PGA)算;迭代频移算法

**中图分类号:** V243.2      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Improved combined real time autofocus algorithm

Wang Jiahai<sup>1,2</sup> Wang Yanfei<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100139, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In the high resolution SAR, the effect of motion error at the azimuth direction is more severe. Though the traditional phase gradient autofocus (PGA) algorithm can be used to estimate the motion error, the iterative phase correction has to be done. The huge computation makes it difficult to be used in real time image processing. In order to meet the request of real time imaging of high resolution SAR, the iterative shift and correlate (ISAC) algorithm, PGA algorithm and range doppler (RD) algorithm are combined in this paper. With the new combined algorithm, the iterative operation can be reduced. At the same time, the precision request for the initial motion parameter is decreased by adding appropriate iterations to the shift and correlate (SAC) algorithm. The theoretical analysis and the result of imaging for real SAR data can validate the new algorithm.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR); real time imaging; phase gradient autofocus (PGA) algorithm; iterative shift and correlate (ISAC) algorithm

### 1 引言

机载 SAR 平台的运动信息对于高分辨率机载 SAR 的成像具有很大的影响。但是受大气湍流的影响,机载雷达平台的运动会偏离理想的运动状态,雷达回波数据在方位向会存在一定的相位误差。这个相位误差通常会引方位向散焦,降低雷达的成像质量<sup>[1-2]</sup>,因此运动补偿是在实际 SAR 系统的应用中必须面对的问题,它是 SAR 清晰成像的前提。运动补偿<sup>[3-4]</sup>可分为基于机载导航系统的运动补偿和基于原始数据获取相位误差的补偿<sup>[5]</sup>。通过精确的导航系统可以使雷达在方位向的运动误差得到补偿,但这会使机载 SAR 系统的实现难度增加。如果能够利用

机载 SAR 的回波数据进行自聚焦<sup>[6]</sup>处理,补偿估计出的这部分相位误差,就可以提高方位向的分辨率,同时使系统的实现难度降低。机载雷达平台<sup>[7]</sup>运动引起的误差一般会含有高次项相位误差,并且这些高次项相位误差对高分辨率机载 SAR 的成像质量有很大的影响,不能将其忽略,必须对其进行运动补偿。传统的频移相关法<sup>[8-9]</sup>(shift and correlate, SAC)和子孔径相关法<sup>[10-11]</sup>(map drift, MD)是基于二阶相位误差多项式的,高次的相位误差用这两种算法是估计不出来的。相位梯度自聚焦<sup>[12-13]</sup>算法(phase gradient autofocus, PGA)是一种非参数模型的相位误差估计算法,它不需要确定待估计的相位误差的最高阶数,

收稿日期:2017-03

所以不仅能够对低阶相位误差进行估计,而且对高阶相位误差的估计也非常适合,但是PGA算法<sup>[9]</sup>通常需要多次的迭代,使这种算法具有很大的运算量,在当前硬件发展水平下实现实时处理是很困难的。SAC法是由丹麦籍学者 Dall 提出的,虽然它具有较小的计算量,但是却具有与传统 MD 算法相当的精度,与需要重复成像的传统自聚焦算法相比,其运算次数要远少于前者。但是机载导航系统<sup>[14]</sup>(INS)精度不足,或者没有对机载雷达做地速跟踪补偿<sup>[15]</sup>,雷达的实际速度可能会与给定的载机速度有较大的误差,这时候原始的 SAC 算法的估计精度将很难满足期望要求的精度。另外,估计窗宽大小也会影响原始的 SAC 算法的精度。针对原始 SAC 算法的这些缺点,采用一种改进的自聚焦<sup>[16]</sup>算法——迭代频移相关法(ISAC)。该改进型算法可以在有较大的初始速度误差的情况下也能获得比较精确的估计值。理论分析及验证结果都表明,该迭代频移相关自聚焦算法能够获得更加可靠的速度误差估计同时运算量增加也不多。

本文提出了一种将改进的频移相关算法、PGA 算法与 RD 成像算法结合运用的组合实时自聚焦算法,在距离徙动校正完成后,精确的多普勒调频率可以用改进的 SAC 算法估计出,消除二次相位误差的影响,然后高次相位误差用相位梯度自聚焦 PGA 算法来估计,从而消除方位向的相位误差,提高方位向分辨率,提高机载雷达成像质量,在成像处理过程中运算量小,能够实现实时处理<sup>[17-18]</sup>。

## 2 改进型频移相关法

### 2.1 SAC 算法简介

假设机载 SAR 系统为严格正侧视,所以经过距离压缩后,位于方位向  $x_a = vt_a$  处的点目标回波信号表达式为:

$$s(t) = \exp(j\phi_a) \exp(j\pi f_r (t - t_a)^2),$$

$$t_a - T_s/2 < t < t_a + T_s/2 \quad (1)$$

式中:  $T_s = B_d / |f_r|$  表示合成孔径时间,  $B_d$  表示多普勒带宽,  $f_r$  表示多普勒调频率<sup>[19]</sup>,  $\phi_a$  表示回波信号固有相位。

以多普勒中心频率为界,可以将多普勒频谱分为两部分:上频带  $S_{up}(f)$  和下频带  $S_{lw}(f)$ 。将上下频带分别平移  $\pm f_{rf}/4$ ,使上下频带的中心平移到零频位置,则  $s_{up}(t)$  和  $s_{lw}(t)$  表示这两个上下频带的时域信号,它们的表达式可以表示为:

$$s_{lw}(t) = \exp(j\phi_a - j\pi f_{dr} \delta t_a - j\pi f_{dr} (\delta/2)^2) \times \exp(j\pi f_{dr} (t - t_a - (\delta/2))^2)$$

$$t_a < t < t_a + T_s/2 \quad (2)$$

$$s_{up}(t) = \exp(j\phi_a + j\pi f_{dr} \delta t_a - j\pi f_{dr} (\delta/2)^2) \times \exp(j\pi f_{dr} (t - t_a + (\delta/2))^2)$$

$$t_a - T_s/2 < t < t_a \quad (3)$$

式中

$$\delta = f_{prf}/(2f_r) = -[\lambda R/(2v^2)] \cdot f_{prf}/2 \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  表示波长,  $R$  表示距离,  $v$  表示速度。将上下频带的时域信号进行互相关运算,得到互相关信号,其式为:

$$s_c(\tau) = \exp(j2\pi f_r \delta t_a) s_p(\tau - \delta) \quad (5)$$

式中:  $s_p(*)$  表示压缩脉冲,在  $\tau = \delta$  处取得最大值,并且取到最大值的位置跟  $t_a$  没有关系。时间  $\delta$  表示相关函数峰值偏离零点的时刻,测出时间  $\delta$  然后再根据式(4)就可以估算出调频率  $f_r$ 。

### 2.2 迭代频移相关算法

机载导航系统精度不足,或者没有对机载雷达做地速跟踪补偿,雷达的实际速度可能会与给定的载机速度有较大的误差,这时候原始的 SAC 算法的估计精度将很难满足期望要求的精度。针对原始 SAC 算法的这些缺点,通过增加适当的迭代运算,并利用加窗<sup>[20]</sup>和峰值能量比估计加权因子,可以在较大的速度误差下也能获得比较准确的估计值同时运算增量也不大。

迭代频移相关算法是一种以 SAC 算法为基础,运算量小、成像效果好的自聚焦算法,图 1 所示为其实现的过程。

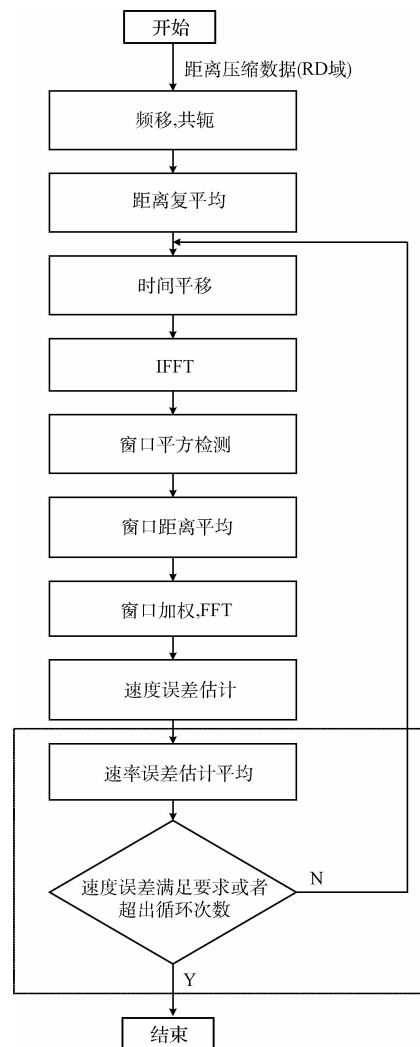


图 1 迭代频移相关算法流程

对于一组点目标,它们的相位在  $0$  到  $2\pi$  符合平均分布,并且具有随机的背向散射系数,需要先检测,然后再在距离向上求平均来检测出互相关函数的峰值点。由于距离变化,多普勒调频率<sup>[21]</sup>也会跟着变化,因此如果平均距离跨度太大,则将存在拖尾现象,因此在给定的速度估计值下,峰值点需要平移到零时刻附近,然后再对处理后的互相关函数在时间域内求距离平均。因此,改进后的 SAC 算法的步骤主要如下。

1) 频移和互相关只需将多普勒信号上边带频谱相对于下边带频谱平移  $f_{\text{DFT}}/2$ , 再对平移后上边带频谱求共轭再与下边带频谱相乘, 就可以实现多普勒信号的频移和互相关。

2) 距离向平均分两个阶段来求解步骤 1) 获得的互相关函数距离向平均。第一阶段是对互相关函数的复频谱在聚焦深度范围内做求和平均运算, 第二阶段则将第一阶段获得的互相关函数平移到零点, 再在窗宽范围内经过检测后, 然后在更大距离范围内做平均运算。运用这种方法, 不但可以使运算量减少, 而且还能将整个距离向的集平均充分考虑到, 并且如果计算的复相关函数足够多, 还能获得较好的互相关函数估计结果。

3) 峰值点位置对由步骤 2) 获得的互相关函数做加权处理, 再将其转换到频域。此时能够由相位谱的斜率得到互相关函数的峰值位置。

4) 峰值能量比加权场景具有随机特性, 即使同一方位向上, 因此速度误差不同距离处也可能存在一定的差异。因此, 在同一距离处, 用峰值点的能量与该距离处的信号的总能量的比值当做加权因子, 加权处理速度估算值。加权因子的值越大, 上下频带信号具有的相关性就越强, 即估计值与真实值的误差就越小。

5) 迭代运算对估计结果进行判断, 看其是否满足预期要求, 或者已循环的次数超过设定的循环次数。当条件满足时, 就将此时的估计值输出; 当条件不满足时, 对从步骤 2) 的第二阶段到步骤 5) 进行循环运算。

由于信号的互相关函数可以在多普勒域中直接求得而不需要预先成像, 并且只需要在检测窗口中进行距离平均及检测, 因此计算量能够大大减少。此外, 由于从步骤 2) 的第二阶段开始迭代, 步骤 1) 和 2) 的第一阶段虽然计算量较大, 但是由于其被跳过, 同时改进后的算法选用了峰值能量比作为加权因子, 算法具有较好的收敛性, 因此改进后的算法运算增量并不大。

### 3 组合实时自聚焦算法

#### 3.1 组合实时自聚焦算法

运动相位误差的主要部分为二次相位误差。在大多数情况下, 消除二次相位误差后, 回波数据的高次相位误差只用一次 PGA 处理就可以准确地估算出。所以如果求得的多普勒调频率足够精确, 就可能将 PGA 算法用于实

时成像同时获得较满意的成像效果。因此, 可以将调频率的估计加在 PGA 算法之前, 先精确地估计出调频率, 对二次相位误差进行补偿。改进后的 SAC 算法具有较高的精度, 同时运算量又小, 非常适合实时处理, 所以可以用改进后的 SAC 算法估计多普勒调频率。将迭代频移相关算法和 PGA 算法相结合, 组合实时自聚焦算法流程如图 2 所示。组合实时自聚焦算法既能满足对误差估计精度的要求, 同时运算量大大减少, 因此比较适合用于实时成像。

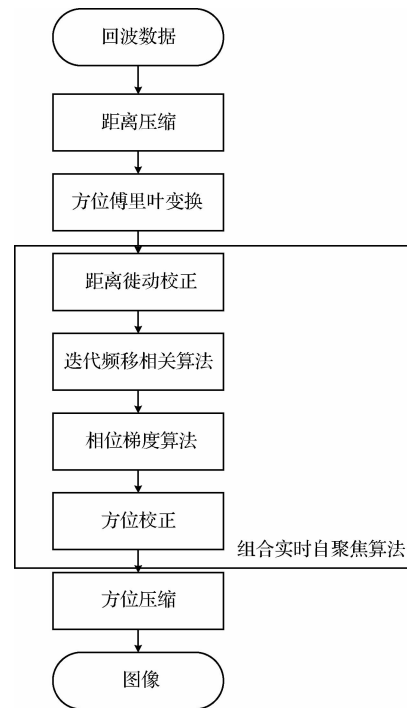


图 2 组合实时自聚焦算法流程

#### 3.2 实时自聚焦算法中点目标的选取

PGA 算法<sup>[22]</sup> 依靠成像场景中的强点目标进行相位误差估计, 所以选取合适的点目标是 PGA 算法获得较好成像效果的重要因素。在条带式 SAR 成像处理中, 一般按照以下 3 个原则来选取点目标。

1) 点目标的多普勒历程覆盖整个方位向的成像区域。

2) 为了保证实时性, 在满足原则 1) 的条件下选择尽可能少的点目标, 降低运算量。

3) 点目标特性要好。通常是选取峰值点当做点目标。

为了提高估计的精确度, 对点目标的质量要求一般是比较高的。一般把峰值点选择为点目标。为了不出现距离单元内的最大峰值点成为非点目标特性的情况, 本文中, 通过对比度准则<sup>[23]</sup>来选取最佳线性调频信号, 该准则的基本内容是: 在一个合成孔径内, 一个理想的点目标产生的线性调频信号幅度是均匀一致的, 式(6)为该准则的数学表达式。

$$Q_k = 1 - \left[ \frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} |F_k(t)| dt \right]^2 / \frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} |F_k(t)|^2 dt \quad (6)$$

式中： $F_k(t)$ 表示线性调频信号，包含点目标的距离门用  $k$  表示， $T_s$  表示合成孔径时间，如果所选点目标的多普勒历程不足一个合成孔径时， $T_s$  就表示  $F_k(t)$ 持续时间。 $Q_k$  值越小，表示选择的点目标越符合要求。

#### 4 实验结果与分析

##### 4.1 计算量分析

现在来分析一下 ISAC 算法和 PGA 算法的计算量，以说明组合自聚焦算法适合实时成像的原因。

##### 4.1.1 迭代频移相关算法

如果初始速度估计值误差较大 ( $\Delta v/v_0 > 5\%$ )，则一次

SAC 运算获得的结果不是很理想。改进型频移相关算法对估计结果进行判断，看其是否达到预期要求的精度值，或者已循环的次数超过设定的循环次数。当条件满足时，就将此时的估计值输出；当条件不满足时，对从 2.2 节步骤 2)的第二阶段到步骤 5)进行循环运算。由于改进型频移相关算法从步骤 2)的第二阶段开始迭代，步骤 1)和步骤 2)的第一阶段虽然计算量较大，但是由于其被跳过，同时改进后的算法选用了峰值能量比作为加权因子，使得算法本身具有较好的收敛性，因此改进后的算法运算增量并不大。

假设大小为  $N_a \times N_r$  的实际数据， $N_p$  表示距离复平均跨度， $N_d$  表示检测平均跨度， $N_w$  表示检测窗宽。表 1 所示为迭代频移相关算法迭代和非迭代部分的加法次数和乘法次数(除以  $N_r$ )。

表 1 迭代频移相关算法计算量

| 操作    | 加法次数  | 乘法次数  |
|-------|---|---|
| 迭代部分  | $\frac{N_a}{N_p} \left[ 1 + 3 \left( 1 + \frac{1}{N_d} \right) \log_2 N_a \right] + \frac{2N_w}{N_p}$ | $\frac{N_a}{N_p} \left[ 2 + 2 \left( 1 + \frac{1}{N_d} \right) \log_2 N_a \right] + \frac{2N_w}{N_p}$ |
| 非迭代部分 | $2N_a$  | $2N_a$  |

##### 4.1.2 PGA 算法计算量

PGA 算法的计算量如表 2 所示，选取方位向  $N$  为 24 576， $M$  为 16，从距离多普勒域开始计算。

表 2 PGA 算法计算量

| 操作       | 加法次数      | 乘法次数      |
|----------|-----------|-----------|
| 方位压缩     | 1 155 076 | 1 155 076 |
| 获得线性调频信号 | 2 261 000 | 1 622 040 |
| 相位误差估计   | 2 261 000 | 1 622 040 |

一次 PGA 算法的计算量大约是改进型 SAC 算法的 5 倍左右。组合实时算法只需做一次 PGA 估计，3 次 ISAC 估计，而一般的 PGA 算法至少需要 3~4 次迭代，甚至更多次迭代。所以这说明了组合实时自聚焦算法的优势，其比较适合应用于实时成像。

##### 4.2 实际数据

为了进一步说明实时自聚焦算法方法的有效性，分别选用了未用自聚焦算法处理直接成像，PGA 算法，及本文的实时自聚焦算法对实际回波数据进行成像处理，得到雷达图像如图 3 所示。

为了更清晰地观察图像分别选取图 3(b)成像区域中部的一块数据图像进行对比，如图 4 所示。

实际数据成像结果表明，组合实时自聚焦算法的成像效果好于 PGA 算法的成像效果。组合实时自聚焦算法与高精度惯导系统的成像结果相当，因此使实时 SAR 系统

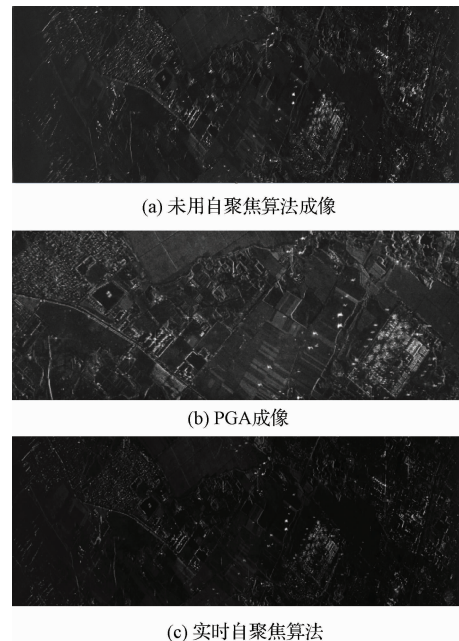


图 3 不同算法下回波数据成像

的设计难度得到很大程度上的降低，这使得高分辨率雷达图像在没有高精度导航系统的情况下获取成为可能。在组合实时自聚焦算法成像系统中，ISAC 自聚焦耗时为 PGA 耗时间的 20% 左右，组合实时自聚焦算法的运算量与 PGA 迭代 3 次的运算量相比大大减少。从运算量和成像效果看，该组合实时自聚焦方法适合于实时成像。

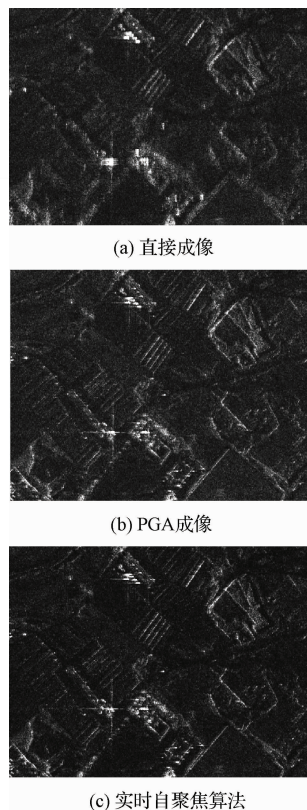


图4 不同算法下各算法局部成像结果

## 5 结 论

本文首先分析了 SAC 算法与 PGA 算法的优缺点, 然后又分析了将 SAC 算法与 PGA 算法相结合的可能性, 提出了一种将改进的 SAC 算法及 PGA 算法结合应用到 RD 成像算法中的组合实时自聚焦算法, 这种算法可在有较大速度误差的情况下获得更为准确的调频率估计结果。理论分析及实际回波数据结果表明, 改进的 SAC 算法可以以较小的运算量增量为代价获得更加精确的调频率估计结果, 然后再用 PGA 算法估计出机载 SAR 运动所产生的高次相位误差, 补偿方位向的相位误差, 成功地在实时系统中应用 PGA 这一稳健的估计算法。通过理论分析与实际回波数据的处理, 本文方法的有效性得到了验证, 改进的组合实时自聚焦算法具有一定的实用意义。

### 参 考 文 献

[1] 田雪, 梁兴东, 李焱磊, 等. 基于子孔径包络误差校正的 SAR 高精度运动补偿方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 583-590.  
[2] 折小强, 仇晓兰, 韩冰, 等. 一种基于变换域的滑动聚束 SAR 调频率估计方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(4): 419-427.  
[3] 吴铮, 张磊, 李宁. 基于 GPU 的机载高分 SAR 运动补偿和自聚焦[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 94-99.

[4] 陈霖, 周廷, 房建成, 等. 航空遥感运动补偿用 POS 高阶误差模型的建立与分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2436-2445.  
[5] 郭鹏, 王岩飞. 基于正则总体最小二乘的 SAR 系统运动误差估计方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 87-94.  
[6] 蒋锐, 朱岱寅, 朱兆达. 一种用于条带模式 SAR 成像的自聚焦算法[J]. 航空学报, 2010, 31(12): 2385-2392.  
[7] 竺红伟, 梁之勇. 一种通用无人机载 SAR 实时信号处理系统设计[J]. 航天电子对抗, 2013, 2(3): 29-31.  
[8] 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(5): 600-607.  
[9] ZHU D Y, JIANG R, MAO X H. MultiSubaperture PGA for SAR autofocusing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 468-488.  
[10] 刘碧丹, 韩松, 王岩飞. 图像幅度和值最小化自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 768-771.  
[11] 阚晓博, 宁宇. 逆合成孔径雷达相位补偿算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(9): 33-35.  
[12] 闫龙, 郑妍, 李颜超. 改进的机载 SAR 相位梯度自聚焦算法[J]. 应用科技, 2012, 39(1): 39-43.  
[13] 蒋锐, 朱岱寅, 朱兆达. 一种用于条带模式 SAR 成像的自聚焦算法[J]. 航空学报, 2010, 31(12): 2385-2392.  
[14] YAKE L, CHANG L, YANFEI W, et al. A robust motion error estimation method based on raw data[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2012, 50(7): 2780-2790.  
[15] MO S, WANG Y, LIU C, et al. A motion compensation method for airborne SAR imagery[J]. IEICE Electronics Express, 2015, 12(12): 20150143-20150143.  
[16] 严少石, 李悦丽, 安道祥, 等. 基于改进 PGA 算法的机载条带式 UWB SAR 运动误差精补偿[J]. 现代雷达, 2013, 35(10): 45-49.  
[17] 胡晓娥, 孙巍, 梁兴东. 一种高分辨率机载 SAR 实时运动补偿系统设计[J]. 电子测量技术, 2012(6): 41-44.  
[18] 杨磊, 刘亚波, 唐禹, 等. 高效机载 SAR 实时成像处理系统设计[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(1): 127-132.  
[19] 张利军, 张民, 刘勃, 等. 基于混和时频分析方法的 ISAR 成像研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 563-568.  
[20] 林格, 刘明敬, 郝明. 改进的相位梯度自聚焦加窗方法[J]. 信息化研究, 2010, 36(7): 25-28.  
[21] 杨秋, 张群, 王敏, 等. 基于机载窄带雷达的舰船目标多普勒特性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(12): 2733-2738.  
[22] ZHANG L, QIAO Z, XING M D, et al. A Robust Motion Compensation Approach for UAV SAR Imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2012, 50(8): 3202-3218.

(下转第 49 页)