

## 基于扩展波数域的机载双天线干涉 SAR 自配准成像算法

李银伟<sup>\*①②</sup> 向茂生<sup>①</sup> 毛永飞<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 为减少机载双天线干涉 SAR 繁杂的图像配准处理过程, 该文提出了基于扩展波数域( $\omega K$ ) 的距离向自配准成像算法。该算法针对双天线因路径差引起的失配问题, 在成像处理阶段通过采用高阶多项式拟合的手段, 利用变标原理实现了图像对在距离向的精确配准。通过对仿真数据和 X 波段实际数据的处理, 获得了较好的干涉条纹图, 验证了算法的有效性。

**关键词:** 干涉合成孔径雷达; 扩展波数域( $\omega K$ ); 自配准; 变标; 成像算法

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)07-1630-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01189

## Auto-registration Imaging Algorithm Based on Extended Wavenumber Domain for Airborne Dual-antenna InSAR

Li Yin-wei<sup>①②</sup> Xiang Mao-sheng<sup>①</sup> Mao Yong-fei<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to reduce the complex image registration processing for the airborne dual-antenna interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) system, the extended wavenumber domain ( $\omega K$ ) auto-registration imaging algorithm in the range is presented. For the mismatch caused by the path difference of two antennas, this algorithm realizes the precision registration of interferometric image in the range by means of high degree polynomial approximation using scaling principle in course of the imaging processing. Finally, through the processing of the simulation data and the X band's real interferometric data, better interferograms are obtained and the validity of the algorithm presented in the paper is proved.

**Key words:** InSAR; Extended wavenumber domain ( $\omega K$ ); Auto-registration; Scaling; Imaging algorithm

### 1 引言

干涉合成孔径雷达(InSAR)测量技术是以合成孔径雷达复数据提取的相位信息为信息源获取地表数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的一项技术。它通过采用两副天线在一次飞行中同时观测, 或一副天线在两次近平行的飞行中分别观测, 来获取地面同一场景的复图像对。由于两天线位置与目标的几何关系, 复图像对之间存在相位差, 形成干涉相位。干涉相位中包含了场景中目标点与两天线位置之差的精确信息, 因此利用两天线与目标点的几何关系, 可以精确地从干涉相位中提取目标点的 3 维位置信息。

干涉 SAR 处理流程一般包括: SAR 成像、复图像对配准、相位解缠、干涉定标及反演 DEM。复图像对的精确配准是获得高质量干涉相位的基础和前提。传统的 InSAR 图像配准<sup>[1-3]</sup> 按原理可以分两类: 一类是按照传统的图像配准思路, 利用统计相关函数或图像的几何特征实现配准, 典型方法是复相关函数法, 其缺点是配准效果严重依赖于图像相干性; 第二类是根据配准过程中干涉相位所表现出来的特性实现配准, 典型方法是最大干涉频谱法, 其受相干性影响小, 结果精确, 缺点是计算量较大。这些配准算法都是基于 SAR 成像后进行的, 计算量较大, 效率较低。对机载双天线 InSAR 系统在成像处理阶段进行粗配准可有效减少后续精配准的计算量。文献[4]提到利用变标原理对干涉图像对在 SAR 成像时进行距离向配准, 但并未给出具体的成像步骤; 文献[5,6]分别提出了线性近似和非线性近似的

2011-11-14 收到, 2012-02-23 改回

国家 973 计划项目(2009CB724003)和国家 863 计划项目(2007AA120302)资助课题

\*通信作者: 李银伟 liyinwei19@163.com

ECS(Extended Chirp Scaling)自配准算法。但由于 ECS所作的近似在大孔径、大斜视角或宽带的条件下不再成立<sup>[7]</sup>, 自配准算法适用范围有限, 即使在适用范围内其成像精度也满足不了高分辨率成像要求。文献[8]在分析了主辅天线的转移函数基础上给出波数域的线性自配准算法, 但精度不高, 同时没有加入运动补偿。

为减少机载双天线 InSAR 繁杂的图像配准处理过程, 本文采用融合初、次两级运动补偿的高精度成像算法——扩展波数域( $\omega K$ ), 根据系统参数来选择多项式拟合路径差的阶数, 利用变标原理推导出其更精确的自配准成像算法, 在成像过程中实现距离向的精确配准。通过对仿真数据和实际数据处理, 获得了较好的干涉条纹图, 与没有自配准的扩展 $\omega K$ 成像算法相比基本上没增加运算量。

## 2 干涉 SAR 信号回波模型

双天线干涉 SAR 的几何关系如图 1 所示,  $H$  为雷达高度, 主天线  $A_1$  和副天线  $A_2$  之间的基线与雷达飞行方向  $x$  垂直, 其长度为  $B$ , 与水平方向夹角为  $\alpha$ 。  $P(x, y, z)$  为观测区域内一目标点,  $h$  为目标高度,  $\beta$  为地面平均坡度,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为两天线到该点的下视角。

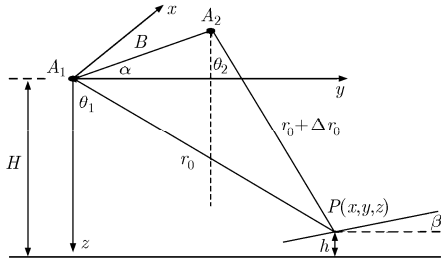


图 1 干涉 SAR 几何关系图

以主天线的理想飞行航迹为参考轨迹, 对于与两天线的最近距离分别为  $r_0$  和  $r_0 + \Delta r_0$ , 方位时间为  $t = 0$  处的点目标, 两天线在载机运动过程中与目标点的距离分别为

$$\mathbf{R}_1(t; r_0) = \sqrt{r_0^2 + \mathbf{v}^2 t^2} \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_2(t; r_0) = \sqrt{r_0^2 + \mathbf{v}^2 t^2} + m\Delta r_0 \quad (2)$$

式中  $t$  为方位时间变量,  $\mathbf{v}$  为载机的平均速度;  $m$  为一个与系统工作模式有关的常量, 当系统工作在标准模式时,  $m = 0.5$ , 工作在乒乓模式时,  $m = 1$ 。

设雷达系统天线发射的是中心频率为  $f_c$ , 脉冲持续时间为  $T$ , 调频斜率为  $K_r$  的线性调频信号。对于副天线, 点目标回波信号经过混频解调后可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_0(\tau, t; r_0) &= w_a(t) w_r \left( \tau - 2\mathbf{R}_2(t; r_0)/c \right) \\ &\cdot \exp \left\{ -j 4\pi m \Delta r_0 / \lambda \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ -j 4\pi \mathbf{R}_1(t; r_0) / \lambda \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left( \tau - 2(\mathbf{R}_1(t; r_0) + m\Delta r_0)/c \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $c$  为光速,  $\lambda$  为发射信号的载波波长,  $w_r$  和  $w_a$  分别为距离向和方位向天线方向图。

两天线的相位中心分别为  $\tau_1 = 2\mathbf{R}_1(t; r_0)/c$  和  $\tau_2 = 2(\mathbf{R}_1(t; r_0) + m\Delta r_0)/c$ , 使得成像后两天线的同一点目标压缩在不同像素位置, 这造成对应像素间存在由路径差引起的干涉相位误差。因此要将副天线  $A_2$  的相位中心相对主天线  $A_1$  移动  $2m\Delta r_0/c$  来对路径差进行校正, 使得两天线成像后同一点目标压缩在同一像素位置。

由图 1 中两天线和目标之间的几何关系, 可得

$$\begin{aligned} \Delta r_0 &= \sqrt{r_0^2 + B^2 - 2Br_0 \sin(\theta_1 - \alpha)} - r_0 \\ &\approx \Delta r_{\text{ref}} + \sum_{n=1}^N \frac{f^{(n)}(r_0)}{n!} \bigg|_{r_0=r_{\text{ref}}} (r_0 - r_{\text{ref}})^n \\ &= \Delta r_{\text{ref}} + \sum_{n=1}^N k_n (r_0 - r_{\text{ref}})^n \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\Delta r_{\text{ref}}$  为成像场景中心  $r_{\text{ref}}$  处的路径差,  $k_n$  为待定系数。对于待定系数  $k_n$  的求解, 一方面可以直接根据式(4)进行推导得到<sup>[9]</sup>, 另一方面在系统参数给定情况下可以采用最小二乘拟合的方法确定。本文选择采用后一种方法。

## 3 扩展 $\omega K$ 自配准成像算法

$\omega K$ <sup>[10]</sup>成像算法没有引入任何近似, 是一种精确的 SAR 成像算法, 可适用于任何斜视角、任何孔径的高分辨 SAR 成像。具体过程为: 先将距离压缩后的 2 维频域信号和参考函数式(5)相乘来完成参考距离处的距离徙动校正(RCMC)和方位压缩。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{RFM}}(f_r, f_t) &= \exp \left\{ j 4\pi r_{\text{ref}} / c \cdot \left[ \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - (cf_t/2v)^2} - f_r \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

再按式(6)做 Stolt 变换, 实现残余 RCMC 和残余方位压缩:

$$\sqrt{(f_0 + f_r)^2 - (cf_t/2v)^2} \rightarrow f'_r + f_0 \quad (6)$$

最后经 2 维 IFFT 可得聚焦的 SAR 图像, 此即为  $\omega K$  成像算法。很明显, 为了在上述算法中进行次级运动补偿, 需在 Stolt 变换后再进行方位逆压缩, 这极

大地增加了计算复杂度。

在扩展  $\omega K$  [11] 成像算法中, 为了克服上述缺点, 首先将距离压缩后的 2 维频域信号与改进的参考函数式(7)相乘实现参考距离处的 RCMC。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{RFM}}(f_r, f_t) &= \exp \left\{ j 4 \pi r_{\text{ref}} / c \cdot \left[ \sqrt{(f_0 + f_r)^2 - (cf_t/2v)^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sqrt{f_0^2 - (cf_t/2v)^2} - f_r \right] \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

再采用改进的映射关系式(8)进行 Stolt 变换。

$$\sqrt{(f_0 + f_r)^2 - (cf_t/2v)^2} - \sqrt{f_0^2 - (cf_t/2v)^2} \rightarrow f'_r \quad (8)$$

新的 Stolt 变换只实现残余 RCMC, 未进行方位压缩, 这样次级运动补偿就可在 Stolt 变换后方位压缩前进行。与  $\omega K$  相比, 这大大提高了计算效率, 因此本文采用扩展  $\omega K$  成像算法。

为了在成像阶段实现两幅图像的距离向配准, 需要把副天线的相位中心相对主天线移动  $2m\Delta r_0/c$  来对路径差进行校正。这可以先在时域通过对回波信号进行变标处理将副天线的相位中心移到  $\tau_0 = 2(\mathbf{R}_1(t; r_0) + m\Delta r_{\text{ref}})/c$ , 然后在距离频域将相位中心平移  $2m\Delta r_{\text{ref}}/c$ , 得到与主天线相同的相位中心  $\tau_1 = 2\mathbf{R}_1(t; r_0)/c$ , 以此来实现距离向配准。

由于对副天线的回波信号进行时域变标处理, 因此扩展  $\omega K$  成像算法中的某些因子会发生变化, 下面对该自配准成像算法进行简要推导。

(1) 距离向时域变标处理 设  $N$  阶变标相位因子为

$$\mathbf{h}(\tau) = \prod_{n=1}^N \exp \left\{ j \pi K_r \alpha_n \left[ \tau - 2(m\Delta r_{\text{ref}} + r_{\text{ref}})/c \right]^{n+1} \right\} \quad (9)$$

其中  $\alpha_n$  为待定的变标因子。

将式(9)与回波信号式(3)相乘可得

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(\tau, t) &= w_r \left( \tau - \frac{2\mathbf{R}_2(t; r_0)}{c} \right) w_a(t) \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0 \mathbf{R}_1(t; r_0)}{c} \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} m\Delta r_0 \right\} \exp \{ j\mathbf{\Psi} \} \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{\Psi} &= \pi K_r \left[ \tau - 2\mathbf{R}_2(t; r_0)/c \right]^2 \\ &\quad + \sum_{n=1}^N \pi K_r \alpha_n \left[ \tau - 2(m\Delta r_{\text{ref}} + r_{\text{ref}})/c \right]^{n+1} \quad (11) \end{aligned}$$

将式(11)在  $\tau = \tau_0$  处进行泰勒级数展开, 省略三阶以上的高阶项, 可得  $\mathbf{\Psi} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$ , 其中  $\phi_1, \phi_2$  和  $\phi_3$  如下表示:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \pi K_r \left[ \left( \frac{2}{c} \sum_{n=1}^N k_n (r_0 - r_{\text{ref}})^n \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^N \alpha_n \left[ 2(r_0 - r_{\text{ref}})/c \right]^{n+1} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_2 &= 2\pi K_r \left[ \sum_{n=1}^N (r_0 - r_{\text{ref}})^n \left( \left( \frac{2}{c} \right)^n \frac{n+1}{2} \alpha_n - 2k_n/c \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \left[ \tau - 2(\mathbf{R}_1(t; r_0) + m\Delta r_{\text{ref}})/c \right] \right] \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_3 &= \pi K_r \left[ \left( 1 + \alpha_1 + \sum_{n=2}^N \frac{1}{2} n(n+1) \alpha_n \left[ 2(r_0 - r_{\text{ref}})/c \right]^{n-1} \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \left[ \tau - 2(\mathbf{R}_1(t; r_0) + m\Delta r_{\text{ref}})/c \right]^2 \right] \quad (14) \end{aligned}$$

若式(14)满足式(15)[12]:

$$\pi K_r \sum_{n=2}^N \frac{1}{2} n(n+1) \alpha_n \left[ 2(r_0 - r_{\text{ref}})/c \right]^{n-1} \cdot T^2/4 < \pi/4 \quad (15)$$

则可忽略式(14)中的第 3 项。此时式(15)可化简为

$$\phi_3 = \pi K_r (1 + \alpha_1) \left[ \tau - 2(\mathbf{R}_1(t; r_0) + m\Delta r_{\text{ref}})/c \right]^2 \quad (16)$$

只有  $\phi_2 \equiv 0$  才能使得天线  $A_2$  变标后的相位中心为  $\tau_0$ 。因此, 变标因子  $\alpha_n$  需满足:

$$\alpha_n = \frac{2k_n}{n+1} (c/2)^{n-1} \quad (17)$$

把式(16)和式(17)代入式(10)得

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(\tau, t) &= w_r \left( \tau - 2\mathbf{R}_2(t; r_0)/c \right) w_a(t) \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j 4\pi f_0 \mathbf{R}_1(t; r_0)/c \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j 4\pi f_0 m\Delta r_0/c \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ j \pi K_r (1 + k_1) \left[ \tau - 2(\mathbf{R}_1(t; r_0) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + m\Delta r_{\text{ref}})/c \right]^2 \right\} \cdot \exp \{ j\phi_1 \} \quad (18) \end{aligned}$$

可见与变标因子相乘后, 两天线的相位中心只差常数值, 这可通过频域平移来完成校正。

(2) 距离压缩 对变标后的信号式(18)进行距离 FFT 变换到距离频域方位时域, 再通过与式(19)相乘完成距离压缩, 固定距离平移和残余相位校正:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_r(f_r) &= \exp \left\{ j \pi f_r^2 / (K_r(1 + k_1)) \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ j 4\pi m\Delta r_{\text{ref}} f_r / c \right\} \cdot \exp \{ -j\phi_1 \} \quad (19) \end{aligned}$$

其中相位项中第 1 项实现距离向聚焦, 第 2 项完成恒定的距离向平移, 第 3 项消除原始信号与变标因子相乘后产生的残余相位项。此时信号变为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(f_r, t) &= W_r(f_r) w_a(t) \cdot \exp \left[ -j 4\pi (f_0 + f_r) \mathbf{R}_1(t; r_0)/c \right] \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j 4\pi m\Delta r_0/\lambda \right\} \quad (20) \end{aligned}$$

(3) 参考函数和 Stolt 映射 对式(20)进行方位向 FFT 变换到 2 维频域, 然后与式(7)所示的参考

函数相乘，再按照式(8)所示进行 Stolt 变换得

$$S_{\text{REF}}(f'_\tau, f_t) = W_r(f'_\tau)W_a(f_t) \cdot \exp\{-j4\pi m\Delta r_0/\lambda\} \cdot \exp\{-j4\pi r_0 f'_\tau/c\} \cdot \exp\left\{-j4\pi r_{\text{ref}}/c \cdot \sqrt{f_0^2 - (cf_t/2v)^2}\right\} \quad (21)$$

最后对式(21)进行距离向 IFFT 使得目标被聚焦到与  $A_1$  相同的距离位置  $2r_0/c$ 。此时信号变为

$$S_2(\tau, f_t) = p_r(\tau - 2r_0/c)W_a(f_t) \cdot \exp\{-j4\pi m\Delta r_0/\lambda\} \cdot \exp\left\{-j4\pi r_{\text{ref}}/c \cdot \sqrt{f_0^2 - (cf_t/2v)^2}\right\} \quad (22)$$

至此式(22)只剩下方位向未压缩。

(4)方位压缩 对经过次级运动补偿后的信号再通过与式(23)相乘进行方位压缩处理

$$H_a(\tau, f_t) = \exp\left\{j4\pi r_{\text{ref}}/c \cdot \sqrt{f_0^2 - (cf_t/2v)^2}\right\} \cdot \exp\{-j4\pi r_0/\lambda\} \quad (23)$$

其中第 1 项是方位向压缩，第 2 项是用来恢复在处理中被补偿掉的目标相位。最后经过方位向 IFFT，可得包含目标实际相位的完全聚焦的 SAR 图像。

$$S_3(\tau, t) = p_r(\tau - 2r_0/c)p_a(t) \cdot \exp\{-j4\pi r_0/\lambda\} \cdot \exp\{-j4\pi m\Delta r_0/\lambda\} \quad (24)$$

式(24)中相位项的第 1 项是目标在两天线中的共同相位，第 2 项是两天线的相位差，也即是 InSAR 所要得到的干涉相位。此时两幅 SAR 图像的相位中心已完全相同，实现了距离向的配准。

因此可得融合初、次两级运动补偿的扩展  $\omega K$  自配准成像算法，其流程图如图 2 所示。与未配准扩展  $\omega K$  相比，该算法除对副天线成像时增加变标处理外，其它只是在距离压缩时做了改进(如图 2 中虚线框所示)，各步骤的相位表达式在文中已给出。可见该算法较未配准扩展  $\omega K$  基本没增加计算量。

### 4 仿真与实际数据处理

(1)P 波段场景的仿真处理 为分析该算法在双

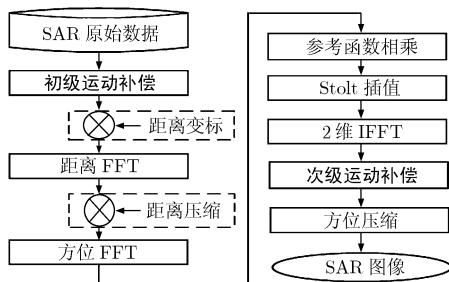


图 2 扩展  $\omega K$  自配准成像算法流程图

天线干涉 SAR 中的效果，对位于测绘区域中间，高度为 200 m 的锥体进行仿真，具体参数如表 1 所示。

表 1 场景仿真参数

中心频率	620 MHz
带宽	250 MHz
脉宽	2 $\mu$ s
距离向波束宽度	20°
距离分辨率	0.6 m
采样率	300 MHz
高度	5000 m
基线长度	10 m
倾角	0°
视角	45°
方位向波束宽度	24°
方位分辨率	0.6 m
PRF	200 Hz
速度	100 m/s

首先根据基线长度、基线倾角、中心视角、场景宽度等系统参数计算两天线与目标的路径差，然后对路径差进行不同阶数的多项式拟合。图 3 和图 4 分别给出线性和二阶配准下未配准失配量(理论误差)、配准失配量(校正的误差)和配准后残余失配量(剩余误差)随距离变化的理论值。图 5 给出了两种配准情况下的残余失配量。从图 3，图 4 可看出，线性配准后的剩余误差在 1 个像素以内，二阶配准后的剩余误差已经接近 0。从图 5 更可看出二阶配准后的失配量绝大部分限制在 0.1 个像素以内，因此在自配准成像算法中选择二阶配准即可。

下面对两天线各自接收的回波数据分别进行未配准，线性配准和二阶配准成像处理，其幅度图如图 6 所示，分别计算其干涉相位和相干系数，如图 7-图 12 所示。表 2 给出了对 3 种情况下失配量和相干系数的统计信息(其中  $\gamma$  为相干系数)。

由以上仿真及统计结果可知，10 m 基线造成两天线失配量达到 11.5 个像素，使未配准时没干涉条纹，相干系数均值只有 0.25。线性配准后失配量控制在 0.5 个像素以内，出现明显的干涉条纹；相干性有很大提高，但仍有噪声。而二阶配准后失配量已在 0.14 个像素以内，但由于其他噪声影响使得干涉相位和相干性较线性配准没多大提高。这也正好验证了根据拟合结果确定使用二阶配准的正确性。

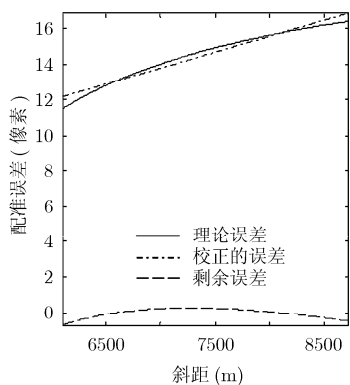


图3 线性配准后配准误差变化曲线

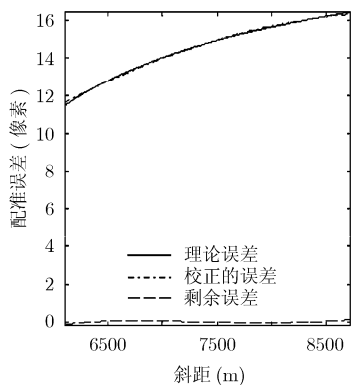


图4 二阶配准后配准误差变化曲线

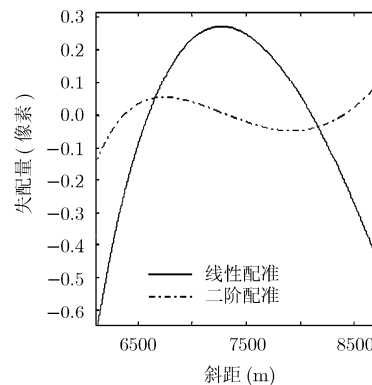


图5 不同阶数配准后失配量变化曲线

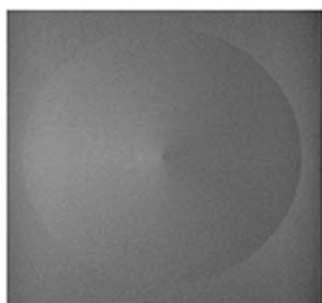


图6 场景幅度图



图7 未配准时干涉相位图

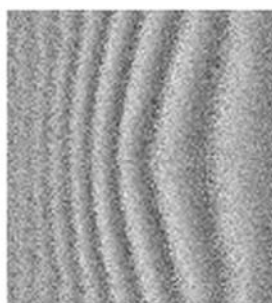


图8 线性配准时干涉相位图

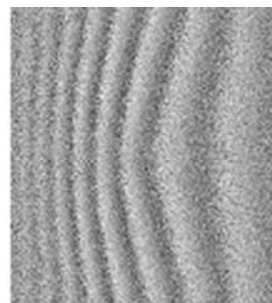


图9 二阶配准时干涉相位图

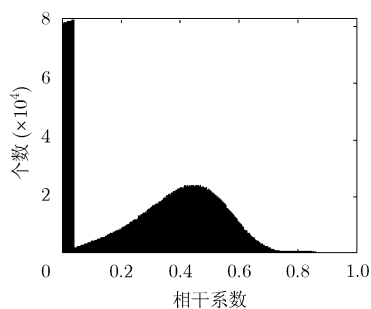


图10 未配准时相干系数图

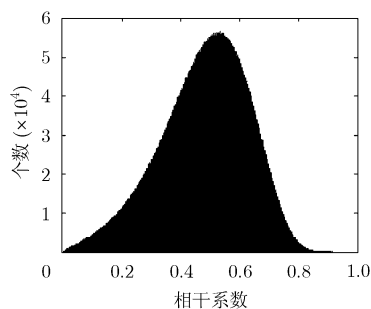


图11 线性配准时相干系数图

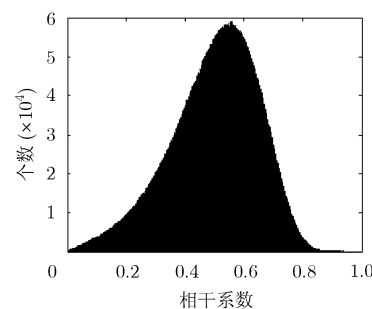


图12 二阶配准时相干系数图

表2 不同阶数配准后失配量及相干系数统计

	失配量 (像素)	相干系数 $\gamma$ 的统计比例(%)			相干 系数 $\gamma$ 均值
		$\gamma$ 大于 0.5	$\gamma$ 大于 0.6	$\gamma$ 大于 0.7	
未 配准	11.48~16.39	27.56	7.84	0.57	0.2550
线性 配准	-0.69~0.27	49.95	23.60	5.62	0.4609
二阶 配准	-0.14~0.09	54.86	27.03	6.44	0.4992

(2)X 波段实际数据处理 利用实际 InSAR 数据验证算法的有效性是必不可少的, 在此利用中科院电子所 X 波段机载双天线 InSAR 数据进行处理。其基线长度 2.1889 m, 基线倾角为 0.50°, 中心视角

45°。在此先根据基线长度、基线倾角、中心视角等系统参数计算两天线与目标的路径差, 再对其进行不同阶数的多项式拟合, 图 13-图 15 分别给出线性、二阶、三阶配准后的配准误差变化曲线。图 16 给出了 3 种配准后的残余失配量。从图 13-图 15 可看出, 拟合阶数的提高使得校正误差越接近理论误差。图 16 表明三阶配准后的残余失配量已在 0.14 个像素以内。因此在自配准成像算法中选择三阶配准即可。

下面对两天线各自接收回波数据分别进行未配准, 线性、二阶及三阶配准成像处理, 其幅度图如图 17 所示, 然后分别计算干涉相位和相干系数, 结果如图 18-图 25 所示。表 3 给出了 4 种情况下失配量和相干系数的统计信息(其中  $\gamma$  为相干系数)。

由处理结果及统计信息可知，未配准时失配量很大(远大于 1 个像素)使得没干涉条纹；相干系数很小。线性配准后失配量大大降低，大部分失配量在 1 个像素以内，相干性均值达到 0.79，出现较明显的干涉条纹；但相干性仍不强(干涉条纹上存在噪声)，相干系数大于 0.9 的不到 1/3。二阶配准后大部分失配量在 0.4 以内，干涉条纹清晰，相干性大于 0.9 的达到 58.56%。三阶配准后失配量大部分在 0.14 以内(图 16 星线所示)，但从干涉图和相干系数统计来看，配准效果较二阶配准改善不大。这正好验证了根据拟合结果确定用三阶配准的正确性。

表 3 不同阶数配准后失配量及相干系数统计

	失配量 (像素)	相干系数 $\gamma$ 的统计比例(%)			相干 系数 $\gamma$ 均值
		$\gamma$ 大于 0.7	$\gamma$ 大于 0.8	$\gamma$ 大 于 0.9	
未配准	2.52~7.86	2.02	0.29	0.07	0.2145
线性 配准	-1.63~0.66	84.05	74.72	32.18	0.7895
二阶 配准	-0.55~0.46	83.51	77.52	58.56	0.8223
三阶 配准	-0.25~0.26	84.76	80.80	62.71	0.8326

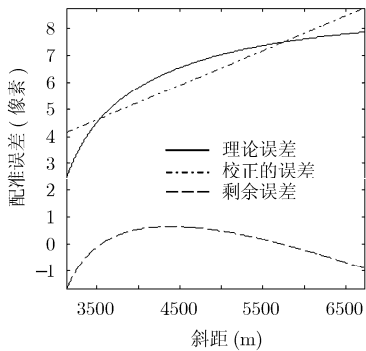


图 13 线性配准后配准误差变化曲线

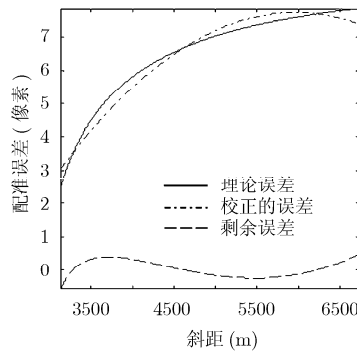


图 14 二阶配准后配准误差变化曲线

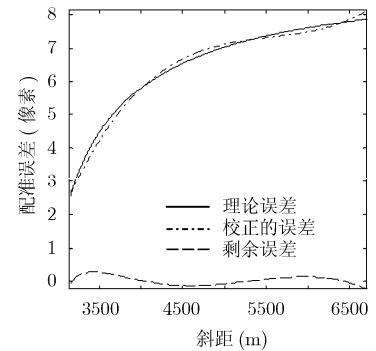


图 15 三阶配准后配准误差变化曲线

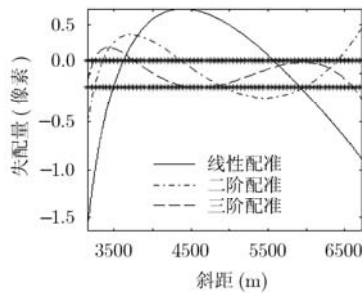


图 16 不同阶数配准后的失配量变化曲线



图 17 实际数据对应的场景幅度图

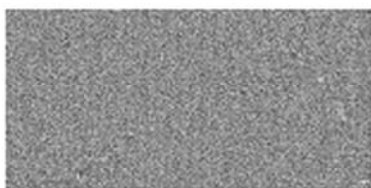


图 18 未配准时干涉相位图

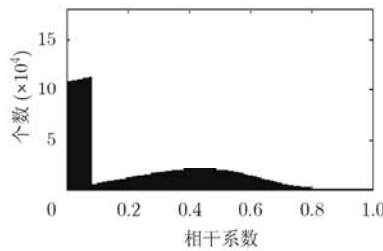


图 19 未配准时相干系数图

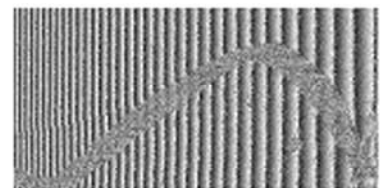


图 20 线性配准时干涉相位图

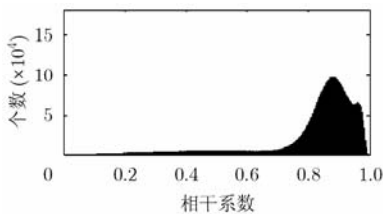


图 21 线性配准时相干系数图

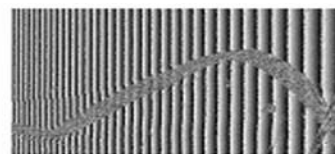


图 22 二阶配准时干涉相位图

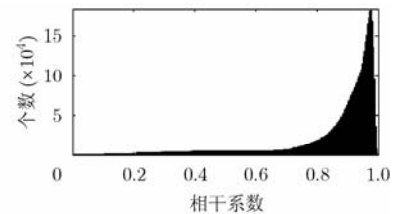


图 23 二阶配准时相干系数图

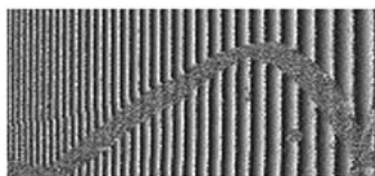


图 24 三阶配准时干涉相位图

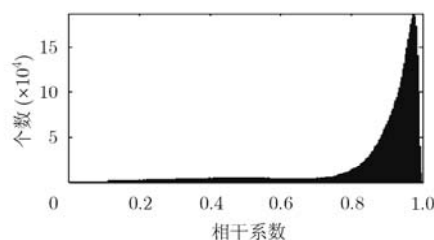


图 25 三阶配准时相干系数图

## 5 结束语

本文针对机载 InSAR 处理中存在图像配准过程繁杂的问题,提出了基于扩展  $\omega K$  的自配准成像算法。通过对仿真数据和实际数据处理获得了较好的干涉图,验证了算法的有效性。另外自配准时变标阶数越高,配准精度越高,干涉相位越精确,但影响干涉相位的因素还有很多,阶数的提高不会无限制地提高相干性。因此对于实际数据首先根据基线长度、基线倾角、中心视角等系统参数计算两天线与目标的路径差,然后对其进行不同阶数的多项式拟合,最后依据配准后的失配量来确定变标阶数。

### 参考文献

- [1] 孙中昶,郭华东,焦梦梅,等. 机载双天线InSAR复图像自动配准研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 83(1): 24-29.  
Sun Zhong-chang, Guo Hua-dong, Jiao Meng-mei, et al. The automatic registration of airborne dual-antenna interferometric SAR complex images [J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2010, 83(1): 24-29.
- [2] Giancaspro A, Candela L, Lopint E, et al. SAR images co-registration parallel implementation [C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Toronto, 2002: 1337-1339.
- [3] Scheiber R and Moreira A. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2179-2191.
- [4] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123-1136.
- [5] 韦立登,李绍恩,向茂生,等. 一种新的双天线干涉 SAR 自配准成像算法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(增刊): 237-243.  
Wei Li-deng, Li Shao-en, Xiang Mao-sheng, et al. A novel imaging algorithm with automatic registration for dual-antenna InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26 (Suppl.): 237-243.
- [6] 陈立福,韦立登,向茂生,等. 机载双天线干涉SAR非线性近似自配准成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9):

2208-2214.

- Chen Li-fu, Wei Li-deng, Xiang Mao-sheng, et al. Auto-registration imaging algorithm of non-linear approximation for airborne dual-antenna InSAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2208-2214.
- [7] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 157-158.  
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010: 157-158.
  - [8] 袁永照,向茂生,吴一戎,等. 波数域算法在机载双天线干涉 SAR 成像中的应用[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2379-2383.  
Yuan Yong-zhao, Xiang Mao-sheng, Wu Yi-rong, et al. The application of wavenumber domain algorithm in airborne dual-antenna InSAR imaging [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(10): 2379-2383.
  - [9] 陈立福. 机载双天线干涉 SAR 实时处理算法研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2011.  
Chen Li-fu. Research on airborne dual-antenna InSAR real-time processing algorithm [D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
  - [10] Cafforio C, Prati C, and Rocca E. SAR data focusing using seismic migration techniques [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1991, 27(2): 194-207.
  - [11] Reigber A, Alivizatos E, Potsis A, et al. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation [J]. *IEE Proceedings-Radar Sonar Navigation*, 2006, 153(3): 301-310.
  - [12] Qiu Xiao-lan, Hu Dong-hui, and Ding Chi-biao. Non-linear chirp scaling algorithm for one-stationary bistatic SAR [C]. 1st Asian and Pacific Conference, Huangshan China, Nov. 5-9, 2007: 111-114.

李银伟: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、InSAR及差分InSAR信号处理。

向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事干涉合成孔径雷达技术及方法的研究工作。

毛永飞: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像、干涉、定标技术。