

机载双天线干涉 SAR 非线性近似自配准成像算法

陈立福^{①②} 韦立登^② 向茂生^② 韩松涛^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 为了提高机载双天线干涉 SAR 系统的干涉处理速度而又不损失配准精度, 该文提出了非线性距离向 ECS 自配准成像算法。该算法通过对两天线视角不同引起的路径差的非线性近似, 在成像处理阶段实现了干涉图像对在距离向的高精度自配准。该算法在产生干涉相位时较传统算法在保持较高配准精度的情况下显著提高了运算速度。本文通过对仿真数据、实际数据的处理以及系统参数对算法配准精度影响的仿真分析, 证明了该算法的有效性。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 成像算法; ECS; 配准; 非线性

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2208-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01162

Auto-registration Imaging Algorithm of Non-linear Approximation for Airborne Dual-antenna InSAR

Chen Li-fu^{①②} Wei Li-deng^② Xiang Mao-sheng^② Han Song-tao^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to improve the speed of interferometric processing for the airborne dual-antenna interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) system and also remain the accuracy of the registration, the non-linear approximation in the range Extended Chirp Scaling (ECS) auto-registration imaging algorithm is presented in the paper. This algorithm realizes the accurate auto-registration in the range in course of the imaging processing by the non-linear approximation to the path difference caused by the different visual angles of the two antennas. It increases the speed of generating the interferometric phase largely and preserves the higher accuracy of the registration meanwhile. Through the processing of the simulation data and the real interferometric data and the analysis of the impact of the systemic parameters on the accuracy of registration, the validity of the algorithm presented in the paper is proved.

Key words: InSAR; Imaging algorithm; ECS (Extended Chirp Scaling); Registration; Non-linear

1 引言

干涉合成孔径雷达(InSAR)技术是在合成孔径雷达技术基础上发展起来的, 是射电天文学干涉测量技术与合成孔径雷达技术的结合。它采用两副天线同时对地观测(单轨模式)或一副天线两次近似平行观测(重轨模式)方式, 来对观测场景分别成像并利用两副图像产生干涉相位, 最后利用两天线几何关系及干涉相位来提取地表数字高程模型(DEM)。

要获得高精度 DEM, 精确的干涉相位的产生至关重要。而在实际的干涉系统中, 系统热噪声、图像失配以及时间去相关等都会造成干涉相位误差。而其中的图像失配更是一个重要的影响因素, 因此

图像配准是一个重要的干涉处理环节。现有的配准算法主要从两个方面进行配准^[1,2]: 一种是从得到的两幅 SAR 图像的相关性上去配准, 该配准方法是通过一种准则来判断两幅图像的相关程度进行配准, 如相关函数法、最大干涉频谱法、相位差影像平均波动函数法等; 另一种是从几何特征上去配准, 首先采用一些准则从图像中提取特征点, 进而找出在主辅图像中该点的对应坐标来进行配准。前一种方法的稳定性和准确性较好, 但计算量巨大; 后一种方法的计算量较前一种小些, 但该类方法在提取特征点时往往会有度量准则的平滑连贯性不好以及配准的鲁棒性不好的问题^[1]。还有些方法将一些辅助信息(如外部 DEM)加入传统配准算法中来进行更高精度的配准^[3]。这些配准算法都是基于得到 SAR 图像后的配准, 计算量均较大。文献[4]中曾提到距离向变标原理可用于干涉图像对的距离向配准, 但并

2009-09-03 收到, 2010-01-27 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: 陈立福 lifu_chen@139.com

未深入分析;文献[5]中给出了线性近似的 ECS 自配准算法,该算法运算量较小,但配准精度不高。

为满足高精度 DEM 和实时干涉,本文采用非线性近似 ECS 自配准成像算法,在 SAR 成像处理过程中实现高精度距离向自配准。而仿真结果证明了该算法在配准精度上较线性自配准有很大提高,且基本没增加计算量,非常适于实时干涉处理。

2 干涉 SAR 信号回波模型

图 1 给出了系统干涉几何关系图, H 为载机高度, B_y 和 B_h 是基线在垂直飞行方向的水平和竖直分量, B 为基线长度, α 为基线倾角, β 为地面坡度。 $P(x, y, z)$ 为观测区域内一目标点, θ_1 为天线 A_1 到该点视角, r_0 为目标到天线 A_1 航迹垂直距离, h 为目标相对高度, y 为目标距离天线 A_1 的水平距离。

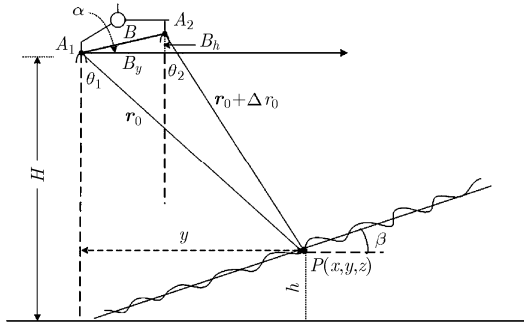


图 1 干涉几何图

在实际系统中,为了降低采样率,经过混频和正交通道分离把接收信号变为复基带信号。设接收到的回波经解调后点散射体的时域响应为

$$\begin{aligned} S(\tau, t; \mathbf{r}_0) = & a(t, \mathbf{r}_0) \mathbf{S}_0(\tau - 2\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0)/c) \\ & \cdot \exp\{-j4\pi\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0)/\lambda\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $a(t, \mathbf{r}_0)$ 为天线加权, \mathbf{S}_0 为接收的信号包络, t 为平台飞行时间, λ 为波长, τ 是接收回波的距离向延迟时间, c 为光速, $\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0)$ 为信号从发射到接收过程中 A_2 到散射体距离(正侧视),其表达式如下:

$$\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0) = \mathbf{R}_1(t; \mathbf{r}_0) + m\Delta r_0 \quad (2)$$

其中 $\mathbf{R}_1(t; \mathbf{r}_0) = \sqrt{r_0^2 + \mathbf{V}_r^2 t^2}$ 为天线 A_1 到散射体的距离, Δr_0 为两天线到目标的路径差; m 为与系统工作模式有关的常数(当系统以标准模式工作时 $m = 0.5$; 当系统以乒乓模式工作时 $m = 1$); \mathbf{V}_r 为雷达和散射体之间相对速度,对窄波束系统等效于雷达速度。 $\mathbf{R}_1(t; \mathbf{r}_0)$ 及 $\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0)$ 是和距离向及方位向都有关的向量,且影响信号脉冲响应的包络位置和相位。

设 SAR 一般发射的线性调频信号为

$$p(t) = \text{rect}(t/T) \exp(j2\pi f_c t) \cdot \exp(j\pi K_r t^2) \quad (3)$$

其中 T 为持续时间, f_c 是中心频率(在接收信号时已

经被调制到基带), K_r 为调频率。

将线性调频信号考虑进回波模型,则式(1)变为

$$\begin{aligned} S(\tau, t; \mathbf{r}_0) = & \mathbf{A}(t) \mathbf{S}_0(\tau - 2\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0)/c) \\ & \cdot \exp\{j\pi K_r (\tau - 2\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0)/c)^2\} \\ & \cdot \exp\{-j4\pi\mathbf{R}_2(t; \mathbf{r}_0)/\lambda\} \end{aligned} \quad (4)$$

由参考文献[4,6]可得式(4)距离多普勒域信号为

$$\begin{aligned} S(\tau, f_t; \mathbf{r}_0) = & \mathbf{A}(\tau, f_t; \mathbf{r}_0) \mathbf{S}_0(\tau, f_t; \mathbf{r}_0) \\ & \cdot \exp\{j\pi K_S(f_t; r_{\text{ref}})(\tau - 2\mathbf{R}_2(f_t; \mathbf{r}_0)/c)^2\} \\ & \cdot \exp\{-j4\pi\mathbf{r}_0\beta(f_t)/\lambda\} \\ & \cdot \exp(-j4\pi m\Delta r/\lambda) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 f_t 为方位向频率, $\mathbf{A}(\tau, f_t; \mathbf{r}_0)$ 和 $\mathbf{S}_0(\tau, f_t; \mathbf{r}_0)$ 为距离多普勒域天线加权和信号包络, r_{ref} 为参考位置(一般为场景中心)到 A_1 的距离,弯曲因子为 $\beta(f_t) = \sqrt{1 - (\lambda f_t / (2\mathbf{V}_r))^2}$, K_S 为参考距离处的有效调频率 $1/K_S(f_t; r_{\text{ref}}) = 1/K_r - 2\lambda r_0 [\beta^2(f_t) - 1] / (c^2 \beta^3(f_t))$ (6)

其中 $\mathbf{R}_2(f_t; \mathbf{r}_0)$ 为距离弯曲因子 $\mathbf{R}_2(f_t; \mathbf{r}_0) = r_0[1 + \alpha(f_t)] + m\Delta r_0$; $\alpha(f_t) = 1/\beta(f_t) - 1$ 对 f_t 依赖较强,一般 $\alpha(f_t)$ 较小,使得 $K_S(f_t; r_{\text{ref}})$ 与 K_r 相差较小,但这已经足够引起散焦。

经变标两天线相位中心分别为 $2(\mathbf{r}_0 + r_{\text{ref}}\alpha(f_t))/c$ 和 $2(\mathbf{r}_0 + r_{\text{ref}}\alpha(f_t) + m\Delta r_0)/c$ [4],使两个天线成像处理后相位中心不一致,对应像素间存在由路径差引起的失配造成干涉相位误差。因此要对路径差进行校正,将 A_2 的相位中心相对 A_1 移动 $2m\Delta r_0/c$ 。

文献[7]在系统参数下对非线性近似造成的配准误差以及干涉相位误差进行了分析,在该参数下对距离差采用二次近似即可满足高精度的距离向配准,则 Δr_0 可近似为

$$\Delta r_0 \approx \Delta r_{\text{ref}} + k_{s1}(\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}}) + k_{s2}(\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})^2 \quad (7)$$

其中 k_{s1} , k_{s2} 为待定系数, $\Delta r_{\text{ref}} \approx -B \sin(\theta_{\text{ref}} - \alpha)$ 为参考位置处路径差, B 为基线长度, θ_{ref} 为天线参考位置的视角。经过推导可得系数为(详细推导略)

$$k_{s1} = -B \cos(\theta_{\text{ref}} - \alpha) \text{ctg}(\theta_{\text{ref}} - \beta) / r_{\text{ref}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} k_{s2} = & B \cos(\theta_{\text{ref}} - \alpha) \text{ctg}(\theta_{\text{ref}} - \beta) \\ & \cdot [1 + g(\theta_{\text{ref}}, \beta)] / 2r_{\text{ref}}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $g(\theta_{\text{ref}}, \beta) = (2 \sin \theta_{\text{ref}} + \text{ctg}(\theta_{\text{ref}} - \beta)(\cos \theta_{\text{ref}} + 2 \sin \beta / \sin(\theta_{\text{ref}} - \beta))) / \sin \theta_{\text{ref}}$ 。

由文献[7]分析可知,在系统参数给定情况下采用最小二乘拟合两个系数比按式(8)和式(9)计算配准精度更高,因此系数采用最小二乘算法计算得出。

3 非线性近似 ECS 自配准成像算法

为了补偿由于天线 A_2 和天线 A_1 路径差造成的

SAR 图像的相位中心不一致, 需要将天线 A_2 的相位中心相对于天线 A_1 移动如式(7)所示的 Δr_0 。可以先通过变标处理将天线 A_2 的相位中心移到 $\tau_0' = 2(\mathbf{r}_0 + r_{\text{ref}}\alpha(f_t) + m\Delta r_{\text{ref}})/c$, 再在距离向频域将相位中心平移 $2m\Delta r_{\text{ref}}/c$ 后使得两个天线的相位中心一致 $\tau_0 = 2(\mathbf{r}_0 + r_{\text{ref}}\alpha(f_t))/c$, 完成距离向自配准。

由于引入了距离差的非线性近似, 因此 ECS 算法中的原有各相位因子都发生了变化, 下面给出了该改进算法的简要推导。

(1) 距离向变标处理 变标相位因子设为^[6]

$$\begin{aligned} \Phi_1(\tau, f_t; r_{\text{ref}}) = & \exp\left\{j\pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})\alpha_{\text{scl1}}(f_t)\right. \\ & \cdot (\tau - 2(m\Delta r_{\text{ref}} + \mathbf{R}_1(f_t; r_{\text{ref}}))/c)^2 \\ & \cdot \exp\left\{j\pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})\alpha_{\text{scl2}}(f_t)(\tau - 2)\right. \\ & \left. \left. \cdot (m\Delta r_{\text{ref}} + \mathbf{R}_1(f_t; r_{\text{ref}}))/c\right)^3\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\alpha_{\text{scl1}}(f_t)$ 和 $\alpha_{\text{scl2}}(f_t)$ 为待定变标因子。

则将式(5)与式(10)相乘可得

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1(\tau, f_t; \mathbf{r}_0) = & \mathbf{A}(\tau, f_t; \mathbf{r}_0)\mathbf{S}_0(\tau, f_t; \mathbf{r}_0) \cdot \exp\{j\Phi\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi(m\Delta r_0 + \mathbf{r}_0\beta(f_t))}{\lambda}\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 Φ 是与变标因子有关的 3 项相位

$$\begin{aligned} \Phi = & \pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})\left[\left(\tau - 2\mathbf{R}_2(f_t; \mathbf{r}_0)/c\right)^2 + \alpha_{\text{scl1}}(f_t)\right. \\ & \left. \cdot (\tau - 2(m\Delta r_{\text{ref}} + \mathbf{R}_1(f_t; r_{\text{ref}}))/c)^2\right] + \pi K_s(f_t; r_{\text{ref}}) \\ & \cdot \alpha_{\text{scl2}}(f_t)\left(\tau - 2(m\Delta r_{\text{ref}} + \mathbf{R}_1(f_t; r_{\text{ref}}))/c\right)^3 \end{aligned} \quad (12)$$

将该式在 $\tau = \tau_0'$ 处泰勒级数展开可得 $\Phi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3$, 其中 ψ_1 , ψ_2 和 ψ_3 如下所示:

$$\begin{aligned} \psi_1 = & 4\pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})\left((\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})(mk_{s1} + \alpha(f_t))\right. \\ & \left. + mk_{s2}(\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})^2\right)^2/c^2 + 4\pi K_s(f_t; r_{\text{ref}}) \\ & \cdot (\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})^2\left[\alpha_{\text{scl1}}(f_t) + 2\alpha_{\text{scl2}}(f_t)(\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})\right. \\ & \left. /c\right]/c^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \psi_2 = & 4\pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})(\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})^2(3\alpha_{\text{scl2}}(f_t)/c - mk_{s2}) \\ & \cdot (\tau - \tau_0')/c^2 + 4\pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})(\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}}) \\ & \cdot (\alpha_{\text{scl1}}(f_t) - mk_{s1} - \alpha(f_t))(\tau - \tau_0')/c^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \psi_3 = & \pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})\left[1 + \alpha_{\text{scl1}}(f_t) + 3\alpha_{\text{scl2}}(f_t)\right. \\ & \left. \cdot (\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})/c\right](\tau - \tau_0')^2 \end{aligned} \quad (15)$$

对于式(15)若满足下式^[8]

$$3\pi T_r^2 K_s(f_t; r_{\text{ref}})\alpha_{\text{scl2}}(f_t)(\mathbf{r}_0 - r_{\text{ref}})/4/c < \pi/4 \quad (16)$$

则式(15)中的第 2 项可忽略, 测绘带 \mathbf{W} 需满足

$$\mathbf{W} < 2c/(3K_s(f_t; r_{\text{ref}})\alpha_{\text{scl2}}(f_t)T_r^2) \quad (17)$$

此时式(15)变为

$$\psi_3 \approx \pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})[1 + \alpha_{\text{scl1}}(f_t)](\tau - \tau_0')^2 \quad (18)$$

若要使得天线 A_2 变标后的相位中心为 τ_0' , 则要使 $\psi_2 \equiv 0$, 可推导出变标因子

$$\alpha_{\text{scl1}}(f_t) = mk_{s1} + \alpha(f_t), \quad \alpha_{\text{scl2}}(f_t) = cmk_{s2}/3 \quad (19)$$

因此变标因子相乘后的信号式(11)变为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1(\tau, f_t; \mathbf{r}_0) = & C_1 \mathbf{S}_0(\tau, f_t; \mathbf{r}_0) \cdot \exp(-j \cdot 4\pi m\Delta r_0/\lambda) \\ & \cdot \exp\left\{j\pi K_s(f_t; r_{\text{ref}})(1 + \alpha_{\text{scl1}}(f_t))(\tau - \tau_0')^2\right\} \\ & \cdot \exp\{j\Delta\varphi\} \cdot \exp\{-j4\pi\mathbf{r}_0\beta(f_t)/\lambda\} \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $\Delta\varphi = \psi_1$ 如式(13)所示, C_1 为复常数。

可见通过该变标因子相乘, 使得每个距离 Chirp 相位结构都产生了一个依赖于距离/多普勒的变形, 使得所有信号的相位中心都遵从相同的参考弯曲轨迹, 相位中心都搬移到 τ_0' 的位置。

(2) 距离单元徙动校正(RCMC)、距离向聚焦和固定距离移动 对变标后的信号进行距离向 FFT 变到 2 维频域, 再通过与式(21)相乘来完成距离向聚焦(包括用多普勒依赖变量的 2 次距离压缩和在调频率中变标的补偿)、距离单元徙动校正和平移:

$$\begin{aligned} \Phi_2(f_r, f_t; r_{\text{ref}}) = & \exp\left\{j\pi\left(f_r^2 / \left(K_s(f_t; r_{\text{ref}})[1 + \alpha_{\text{scl1}}(f_t)]\right)\right.\right. \\ & \left. \left. + 4f_r(r_{\text{ref}}\alpha(f_t) + m\Delta r_{\text{ref}})/c\right)\right\} \end{aligned} \quad (21)$$

其中 f_r 为距离向频率, 相位项中第 1 项是距离向聚焦包括 2 次距离压缩, 第 2 项实现了 RCMC 和固定的距离向平移。在对式(20)的信号与式(21)的相位函数相乘后, 再进行距离向 IFFT 处理使得包络被聚焦到正确的距离位置 $2\mathbf{r}_0/c$ 处, 则此时信号变为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_2(\tau, f_t) = & C_1 \mathbf{S}_0(\tau - 2\mathbf{r}_0/c, f_t) \\ & \cdot \exp\{-j4\pi\mathbf{r}_0\beta(f_t)/\lambda + j\Delta\varphi\} \\ & \cdot \exp(-j4\pi m\Delta r_0/\lambda) \end{aligned} \quad (22)$$

(3) 残余相位校正 式(22)的第 1 个相位项是一个正常的多普勒调制, 这一项必须在方位向被匹配来对信号聚焦; 第 2 个相位项是原始变标相位相乘产生的残余相位如式(13)所示, 需与式(23)的残余相位校正项相乘来消除掉

$$\Phi_3(\tau, f_t; r_{\text{ref}}) = \exp\{-j\psi_1\} \quad (23)$$

(4) 方位向压缩 对残余相位校正后的信号再通过式(24)的相位函数相乘进行方位向压缩处理

$$\Phi_4(\tau, f_t) = \exp\{j4\pi\mathbf{r}_{0\text{scl}}(\beta(f_t) - 1)/\lambda\} \quad (24)$$

其中 $\mathbf{r}_{0\text{scl}} = \mathbf{r}_0 + m\Delta r_0$ 为信号接收时真实路径。

对方位向压缩后信号做方位向 IFFT, 则可得完全聚焦的 SAR 图像。此时得到两个天线的 SAR 图像

7 和图 8 分别给出了线性和非线性配准后失配量随距离变化的理论值, 每个图均给出了未配准失配量(理论误差)、配准失配量(校正误差)和配准后残余失

配量(剩余误差), 其中场景失配量处于图中竖线左侧。对两天线各自接收回波数据进行成像处理并计算干涉相位和相干系数, 结果如图 9-图 14 所示。

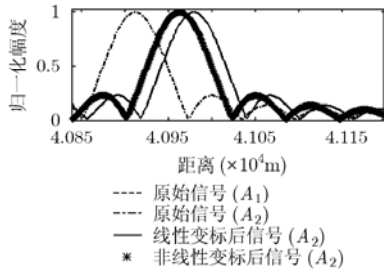


图 3 两天线接收回波压缩后的结果

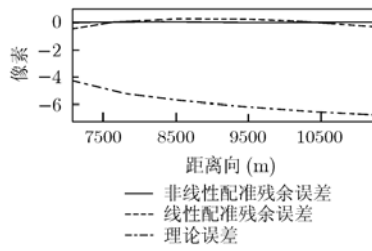


图 4 配准误差随着距离的变化

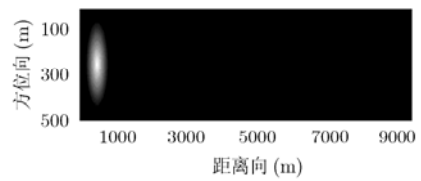


图 5 场景设置

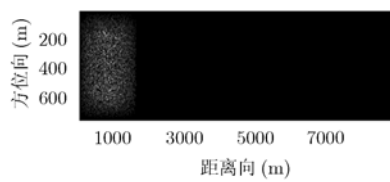


图 6 天线接收回波

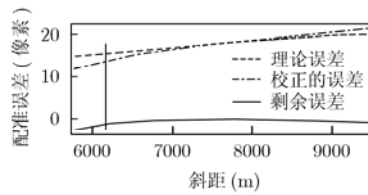


图 7 线性配准后失配量变化曲线

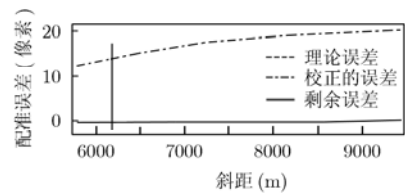


图 8 非线性配准后失配量变化曲线

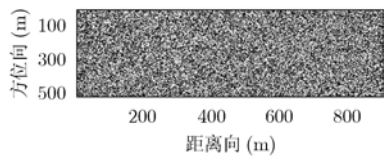


图 9 未配准的干涉相位

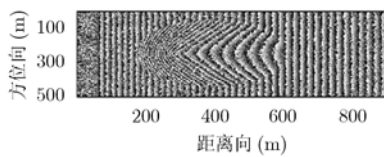


图 11 线性自配准后的干涉相位

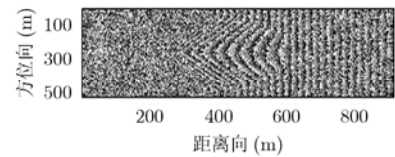


图 13 非线性自配准后干涉相位

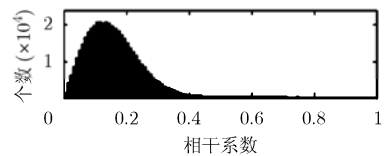


图 10 未配准的相干系数图

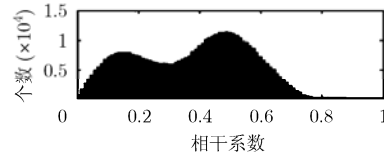


图 12 线性自配准后的相干系数

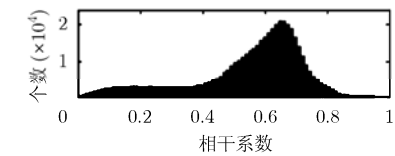


图 14 非线性自配准后的相干系数

表 4 给出了对 3 种情况下仿真结果的统计信息(其中 γ 为相干系数)。

由上面仿真及统计结果可知, 由于基线为 10 m 造成两天线失配量很大, 使未配准时看不到干涉条纹, 相干系数很低。线性配准后失配量大大减小, 但失配量较大区域仍看不到干涉条纹; 相干系数有

很大提高, 但仍有不小噪声。而非线性配准后失配量比线性配准后减小很多, 能看到清晰的干涉条纹; 相干系数有了显著提高, 干涉相位噪声大大较低。

(3) 实测数据验证 为了对该算法更好验证, 下面利用中国科学院电子学研究所的 X 波段机载双天线干涉 SAR 数据进行处理分析。图 15 和图 16 分别给出了实际数据线性和非线性配准后的配准误差。

图 17 给出了进行实际数据处理分析的场景幅度图像, 图 18, 图 20 和图 22 分别给出了该段数据在 3 种情况下的干涉相位图, 而图 19, 图 21 和图 23 分别给出了相应的相干系数统计图。

由于干涉处理结果及表 5 的统计信息可知, 经过非线性自配准处理, 相干系数较线性自配准有提高。

表 4 失配量及相干系数统计

	失配量 (像素)	γ 集中 分布	γ 在 0.5 以上	γ 在 0.6 以上	γ 的 均值
未配准	12.02~13.97	0.05~0.25	0.017%	0.002%	0.1538
线性配 准后	-1.72~-0.53	0.05~0.65	32.76%	11.36%	0.3917
非线性 配准后	-0.50~0.02	0.45~0.75	77.25%	51.69%	0.5694

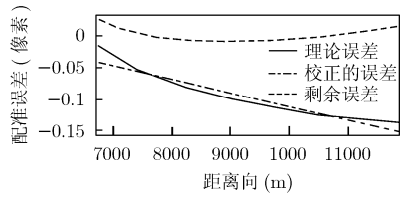


图 15 线性配准后配准误差变化曲线

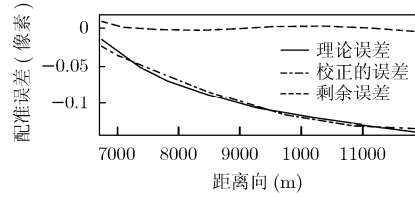


图 16 非线性配准后配准误差变化曲线

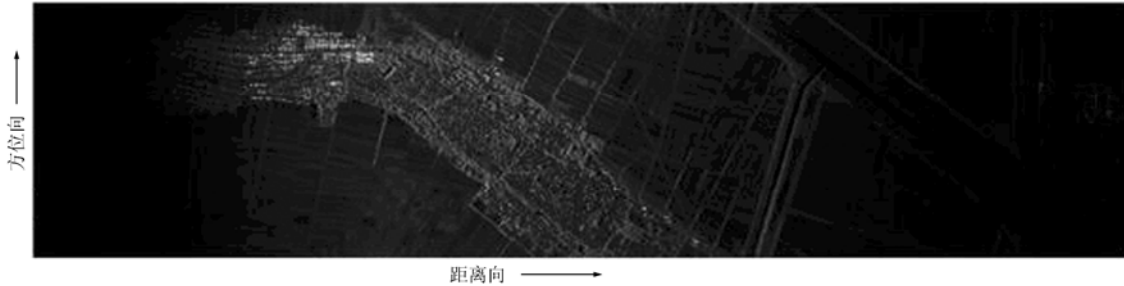


图 17 实际数据对应的场景幅度图

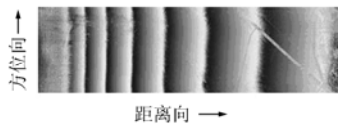


图 18 没有配准的场景干涉相位图

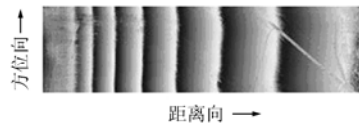


图 20 线性自配准后场景干涉相位图

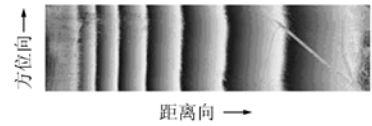


图 22 非线性自配准后场景的干涉相位图

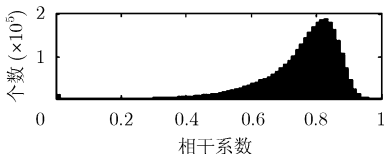


图 19 没有配准的相干系数统计图

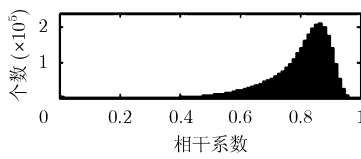


图 21 线性自配准后相干系数统计图

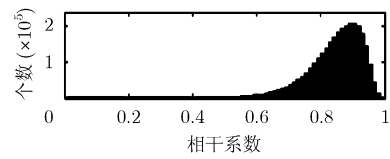


图 23 非线性自配准后相干系数统计图

表 5 实际数据的失配量及相干系数统计

	失配量(像素)	γ 集中分布	γ 0.8 以上	γ 0.9 以上	γ 均值
未配准时	-0.1382~-0.0147	0.60-0.90	40.92%	2.84%	0.7456
线性配准后	-0.0090~ 0.0270	0.70-0.92	60.03%	10.40%	0.7874
非线性配准后	-0.0043~ 0.0089	0.70-0.93	61.80%	11.26%	0.7960

两种方法效果不很明显是由于系统基线太短(只有 0.5568 m)造成系统失配量太小的缘故。

在系统配置为 Intel(R)Core (TM) 2 CPU, 6300 @ 1.86 GHz 1.86 GHz, 6.00 GB 的情况下, 对每个天线方位向 16384 点、距离向 4096 点的数据进行了处理。传统算法产生高质量干涉条纹需约 460 s, 而本文提出算法产生高干涉条纹需要约 370 s, 可见处理速度有了显著提高并且具有较高的配准精度。

5 非线性自配准的精度影响分析

本文提出的非线性近似的自配准算法的配准精度取决于式(7)中两天线路径差的近似精度。一般干

涉系统的飞行高度在 6000 m 左右, 天线的下视角在 45° 左右, 因此在表 6 参数下进行了系统参量对配准精度影响的仿真分析。

表 6 各个变量对配准精度影响的仿真参数

	飞机高度(m)	下视角(°)	基线(m)	基线倾角(°)	测绘带宽(m)
基线长度影响仿真参数	6000	45	0.5-20	0	4000
基线倾角影响仿真参数	6000	45	5	0-70	4000
测绘带宽影响仿真参数	6000	45	5	0	4000-7000

仿真结果如图 24, 图 25 和图 26 所示, 给出了各参数对应的配准误差的均值和均方根。

由仿真结果可知, 随着基线增大, 配准误差逐渐增大; 当基线长度增加 20 m 时配准误差平均增大 0.03 m, 均方误差增加 0.14 m。随着基线倾角增大, 配准误差有减小趋势; 倾角变化 70° 时配准误差的均值变化了不到 0.01 m, 均方误差变化约 0.02 m。随着测绘带宽增大, 配准误差逐渐增大; 当测绘带宽由 4000 m 增至 7000 m 时, 配准误差均值增大了约 0.02 m, 均方误差增大约 0.08 m。

可见基线长度、基线倾角和测绘带宽的大小对非线性配准精度影响很小, 它系统参数对配准精度没有影响。对于低于 0.3 m 分辨率的系统, 配准平均误差没有超过 0.1 个像素, 用非线性近似的自配准算法能较好地配准; 对于高于 0.3 m 的高分辨率系统, 还要考虑成像后的再配准。

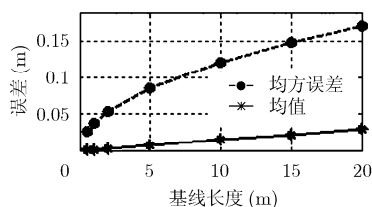


图 24 基线长度对精度影响

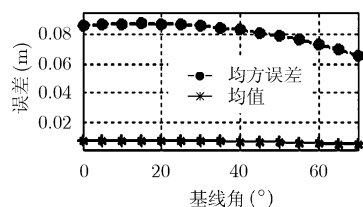


图 25 基线倾角对精度影响

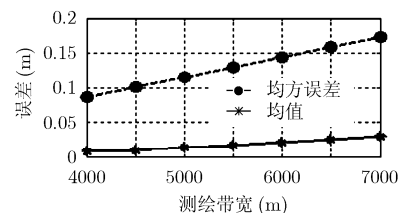


图 26 测绘带宽对精度影响

6 结束语

本文针对机载双天线干涉系统中出现的距离向失配问题, 提出了非线性近似的 ECS 自配准成像算法。该算法在成像处理阶段完成了距离向失配量的消除, 使得系统相干性得到了显著提高, 干涉相位的质量较线性自配准有了明显的改善。另外通过系统参数对配准精度的影响分析说明了该算法的实用性。该算法在提高干涉处理速度的同时具有较高配准精度, 适合干涉快视处理。但该算法也有不足之处, 当地形变化非常剧烈时, 配准精度会有较大的降低, 为了得到较高的配准精度还需要结合其它配准算法; 若地形的坡度变化不大则可以作为恒定坡度进行配准, 也能保持较高的配准精度。

参考文献

- [1] 吕金建, 文贡坚, 李德仁, 王继阳. 一种新的基于空间关系的特征匹配方法[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 367-373.
Lü Jin-jian, Wen Gong-jian, Li De-ren, and Wang Ji-yang. A new method based on spatial relations for feature matching[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 367-373.
- [2] 王建文, 李青. 基于点和边缘相结合特征提取的图像配准算法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(4): 928-930.
Wang Jian-wen and Li Qing. Image registration algorithm based on extraction of feature point and edge [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(4): 928-930.
- [3] 刘广, 郭华东, 范景辉. 基于外部 DEM 的 InSAR 图像配准方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1): 72-76.
Liu Guang, Guo Hua-dong, and Fan Jing-hui. DEM based SAR image registration method [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(1): 72-76.
- [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): 1123-1135.
- [5] 韦立登, 李绍恩, 向茂生, 吴一戎. 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, and Wu Yi-rong. A novel imaging algorithm with automatic registration for dual-antenna InSAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(Suppl.): 237-243.

- [6] Cumming I G, Wong F H 著. 洪文, 胡东辉等译. 合成孔径雷达成像—算法与实现[M]. 第 1 版, 北京: 电子工业出版社, 2007: 118-122 and 194-210.
- [7] Chen Li-fu, Xiang Mao-sheng, Wei Li-deng, and Han Song-tao. An Airborne interferometric quick-look processing algorithm. IET International Radar Conference 2009 [C], Guilin China, April 20-22, 2009: 669-673.
- [8] 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.

陈立福: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为 InSAR 信号处理.

韦立登: 男, 1973 年生, 副研究员, 从事信号与信息处理方面的研究工作.

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.