

波数域算法在机载双天线干涉 SAR 成像中的应用

袁永照^{①②} 向茂生^① 吴一戎^① 韦立登^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文针对机载双天线干涉 SAR 成像, 分析了主、副两天线的波数域成像算法特点。通过在距离向引入距离平移因子和距离缩放因子, 得到在成像过程中完成配准的波数域成像算法。通过计算机仿真和处理实际数据, 验证了这种方法能够在机载双天线干涉 SAR 原始回波数据的成像处理中, 完成复图像对的配准。

关键词: 机载双天线干涉合成孔径雷达; 波数域成像算法; 配准

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2379-05

The Application of Wavenumber Domain Algorithm in Airborne Dual-Antenna InSAR Imaging

Yuan Yong-zhao^{①②} Xiang Mao-sheng^① Wu Yi-rong^① Wei Li-deng^①

^①(National Key Lab of Microwave Imaging Technology,

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

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

Abstract: Aiming at airborne dual-antenna InSAR imaging, the characteristics of wavenumber domain imaging algorithms for master and slave antennas are analyzed. By introducing a range shift factor and a range scaling factor in range direction, a wavenumber domain imaging algorithm with completing registration during the course of imaging is presented. By means of computer simulation and processing practical InSAR data, the algorithm is demonstrated in completing registration between a pair of complex images during the course of processing original echoes data for airborne dual-antenna InSAR imaging.

Key words: Airborne dual-antenna InSAR; Wavenumber domain imaging algorithm; Registration

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种主动发射电磁波进行目标探测的传感器, 凭借其全天时、全天候、高分辨率的成像能力越来越成为各国获取遥感数据的重要手段。干涉 SAR (InSAR)技术是在 SAR 基础上发展起来的新型遥感技术, 它以其具有快速、大面积、高精度获取数字高程模型(DEM)数据等特点, 迅速成为遥感领域的一个研究热点。

机载双天线 InSAR 系统是利用主天线和副天线与地面目标之间的立体几何关系, 通过干涉相位图上的相位差、雷达的辐射波长、双天线对目标的几何视角、双天线之间的基线长度和与水平线的倾角、主天线距地面的高度等来推导出被观测地区的各点地形高度。

高精度的DEM^[1]要求有高质量的干涉相位^[2], 这就要求采用保相度好的成像算法对原始回波数据成像。在常规的成像算法中, 保相度好的算法有Chirp Scaling算法^[3,4]和波数域算法^[5,6]。另外, 传统的配准方法是在对原始回波数据成像后, 进行复图像对的配准^[7,8]。本文实现了在对原始回波数据成像

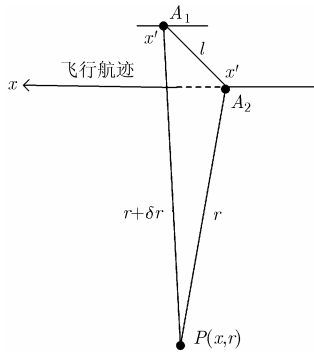
的同时, 完成了复图像对的配准。

本文从 InSAR 点目标回波信号出发, 得到主天线和副天线的转移函数, 在转移函数的基础上, 得到适合主天线和副天线的波数域成像算法。然后找到两天线的波数域成像算法的区别, 在副天线的成像中进行配准, 通过在距离向上引入距离平移因子和不同于主天线的波数域成像算法的距离缩放因子, 得到配准后的副天线的复图像, 从而与主天线成像后的复图像经过复共轭相乘运算, 产生干涉相位条纹图。

2 原理

2.1 转移函数

在正侧视下, 主天线和副天线的摆放位置与成像目标 P 之间的几何关系如图 1 所示。在图 1 中, x 轴表示飞机飞行的航迹, 即方位向。 A_1 表示主天线, A_2 表示副天线。连接主、副天线的基线 l 与方位向垂直, 即交轨干涉。 r 和 $r + \delta r$ 分别表示目标点 P 与主、副双天线的最近斜距, 以最近斜距的方向和方位向这两个方向构成了目标成像的二维平面。 x 是目标点 P 的方位向位置, x' 表示天线在方位向上的位置。在交轨干涉下, 双天线在方位向的位置相同。在正侧视下,

图1 双天线与成像目标 P 之间的几何关系

天线的 3dB 波束宽度照射到目标点 P 的范围是: $|x' - x| \leq L_s/2$, 其中 L_s 是合成孔径长度。针对目标点 P 而言, 在这个照射范围内, r 和 $r + \delta r$ 是不变的, x 是不变的, 但是 x' 随着天线在方位向上的运动而变化。在图 1 中所示的情况恰好是: $x' = x$, 即双天线运动到与目标点 P 相同的方位向位置上。

从图 1 中, 可以得到主、副两部天线在方位向的运动过程中与目标的距离:

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (x' - x)^2} \quad (1)$$

$$R_2 = \sqrt{(r + \delta r)^2 + (x' - x)^2} \quad (2)$$

其中 R_1 表示一个合成孔径内, 主天线与目标的距离; R_2 表示一个合成孔径内, 副天线与目标的距离。它们都随主、副天线在方位向上的位置的变化而变化。

近似式(2), 得到 $R_2 \approx \sqrt{r^2 + (x' - x)^2} + \delta r$, 引入一个系数 n , 区别乒乓模式和标准模式下的 R_2 表达式:

$$R_2 = \sqrt{r^2 + (x' - x)^2} + n\delta r \quad (3)$$

在乒乓模式下, $n = 1$; 在标准模式下, $n = 0.5$ 。对于 (x, r) 处的点目标 P , 设雷达天线发射线性调频信号, 则两部天线接收的点目标回波信号经过混频解调后, 可表示为

$$\begin{aligned} & s_{1,2}(x', r'; x, r) \\ &= \exp\left[j\pi K_r \left(\frac{2}{c}\right)^2 (r' - R_{1,2})^2\right] \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{1,2}\right] \text{rect}\left[\frac{2(r' - R_{1,2})}{(cT_r)}\right] w^2[x' - x, r] \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)中, 下标 1 和下标 2 分别表示主天线和副天线接收的信号。其中 K_r 为线性调频率, T_r 是发射信号的脉冲宽度, λ 是发射信号的波长, r' 和 r 为距离向空间变量, x' 和 x 为方位向空间变量, c 为光速, $\text{rect}[\cdot]$ 为矩形函数, $w[\cdot]$ 为方位向天线方向图。

在交轨干涉下, 通过对 InSAR 点目标回波信号式(4)进行二维傅里叶变换, 分别得到主天线和副天线的转移函数。

(1) 主天线的转移函数

$$G_1(\xi_x, \eta_r, r) = \text{rect}\left[\frac{\eta_r}{\left(\frac{2}{c}\right)(K_r T_r)}\right] W^2\left[\frac{\xi_x}{\left(\frac{2}{L}\right)}\right] \exp[-j\psi(\xi_x, \eta_r, r)] \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} & \psi(\xi_x, \eta_r, r) \\ &= \frac{\pi}{K_r (2/c)^2} \eta_r^2 - 2\pi\eta_r r + 2\pi r \sqrt{\left(\frac{2}{\lambda} + \eta_r\right)^2 - \xi_x^2} \quad (6) \end{aligned}$$

ξ_x 和 η_r 分别为方位向和距离向的空间频率, L 为天线方位向的长度。

(2) 副天线的转移函数

$$G_2(\xi_x, \eta_r, r) = G_1(\xi_x, \eta_r, r) \exp(j\Delta\phi) \quad (7)$$

式(7)体现了副天线的转移函数是在主天线的转移函数的基础上增加一项 $\exp(j\Delta\phi)$ 而得到的。其中

$$\Delta\phi = \left[-2\pi n \delta r \sqrt{\left(\frac{2}{\lambda} + \eta_r\right)^2 - \xi_x^2}\right] \approx \left[-2\pi n \delta r \left(\frac{2}{\lambda} + \eta_r\right)\right] \quad (8)$$

对主天线和副天线接收的原始回波数据分别进行波数域成像处理, 副天线在主天线的基础上增加平移因子和缩放因子, 补偿 $\Delta\phi$ 中的 $(-j2\pi n \delta r \eta_r)$, 完成距离向的自动配准。在完成成像和自配准后, 剩下的一项 $(-2\pi n \delta r \frac{2}{\lambda})$ 正是需要获得的干涉相位。

2.2 波数域自动配准算法

波数域算法需要在原始回波数据的二维频域中进行。

通过比较两部天线的波数域成像算法的区别, 可以在副天线的波数域成像算法中加入配准的要素, 产生距离向的距离平移和距离缩放效应, 得到波数域自动配准算法。

(1) 主天线的波数域成像算法 接收的分布目标的原始回波数据在二维空域中的表达式是

$$h_1(x', r') = \iint dx dr \gamma_0(x, r) s_1(x' - x, r' - r) \quad (9)$$

其中 $\gamma_0(x, r)$ 是目标的绝对散射系数。

波数域成像算法 需要在原始回波数据的二维频域中进行, 对式(9)做二维傅里叶变换, 得到

$$\begin{aligned} H_1(\xi_x, \eta_r) &= \iint dx' dr' h_1(x', r') \\ & \cdot \exp(-j2\pi\xi_x x') \exp(-j2\pi\eta_r r') \\ &= \iint dx dr \gamma_0(x, r) \exp(-j2\pi\xi_x x) \\ & \cdot \exp(-j2\pi\eta_r r) G_1(\xi_x, \eta_r, r) \quad (10) \end{aligned}$$

将 $G_1(\xi_x, \eta_r, r)$ 分解为两个相位因子相乘的形式:

$$G_1(\xi_x, \eta_r, r) = G_1(\xi_x, \eta_r, r_0) \nabla(\xi_x, \eta_r, r) \quad (11)$$

其中 r_0 是选取的成像区域中心处的参考距离, $G_1(\xi_x, \eta_r, r_0)$ 是参考距离处的二维频域函数, 它是在 $G_1(\xi_x, \eta_r, r)$ 中的 r 取为 r_0 后的结果。

$$\nabla(\xi_x, \eta_r, r)$$

$$= \exp\left\{-j2\pi(r - r_0) \left[-\eta_r + \sqrt{\left(\frac{2}{\lambda} + \eta_r\right)^2 - \xi_x^2}\right]\right\} \quad (12)$$

在正侧视下, 式(12)中带根号的式子可以近似

$$\sqrt{\left(\frac{2}{\lambda} + \eta_r\right)^2 - \xi_x^2} \approx \left(\frac{2}{\lambda} + \eta_r\right) - \frac{1}{2} \frac{\xi_x^2}{(2/\lambda)} \left[1 - \left(\frac{\eta_r}{2/\lambda}\right)\right] \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)中,可以得到

$$\begin{aligned} \nabla(\xi_x, \eta_r, r) \\ = \exp\left\{-j2\pi(r-r_0)\left[\frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2} \frac{\xi_x^2}{(2/\lambda)} + \frac{1}{2} \frac{\xi_x^2}{(2/\lambda)^2} \eta_r\right]\right\} \end{aligned} \quad (14)$$

令 $\hat{r} = r - r_0$, 将式(11)和式(14)代入式(10)中, 得到:

$$\begin{aligned} H_1(\xi_x, \eta_r) = G_1(\xi_x, \eta_r, r_0) \exp(-j2\pi\eta_r r_0) \\ \cdot \iint \gamma_0(x, \hat{r} + r_0) \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \hat{r}\right] \exp\left[j\pi \frac{\xi_x^2}{(2/\lambda)} \hat{r}\right] \\ \cdot \exp(-j2\pi\xi_x x) \exp\left\{-j2\pi\eta_r \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\xi_x^2}{(2/\lambda)^2}\right] \hat{r}\right\} dx d\hat{r} \end{aligned} \quad (15)$$

在式(15)的积分内的最后一个指数相位项中, $\left[1 + \frac{1}{2} \frac{\xi_x^2}{(2/\lambda)^2}\right] \hat{r}$ 体现了关于 \hat{r} 的尺度变化, 通过式 (15), 可以这样理解如何从原始回波数据的二维频域 $H_1(\xi_x, \eta_r)$ 得到含有相位信息的分布目标 $\gamma_0(x, \hat{r} + r_0) \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \hat{r}\right]$: 首先从含有相位信息的分布目标 $\gamma_0(x, \hat{r}_0) \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} \hat{r}\right]$ 得到 $H_1(\xi_x, \eta_r)$, 在这个过程中, 会对距离向距离变量 \hat{r} 做缩放; 然后将这个过程逆转过来, 就得到所需要的成像过程, 在这个过程中, 就会对距离向频率变量 η_r 做缩放。波数域成像算法的核心就是在对距离向频率变量做缩放, 可以通过在二维频域中插值实现, 也可以采用文献[9]的第六章提出的缩放原理框图实现。主天线的波数域成像算法可以采用图2的流程框图来表示。

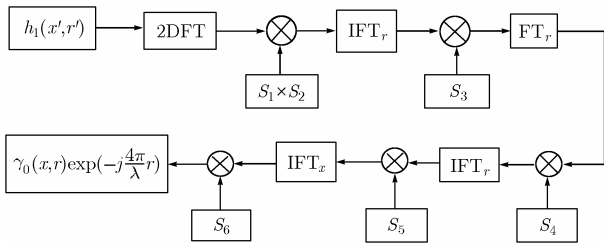


图2 主天线的波数域成像算法流程框图

其中 $h_1(x', r')$ 为主天线接收的原始回波数据, $\gamma_0(x, r)$ 为成像后的目标绝对散射系数。

$$\begin{aligned} S_1 &= G_{00}^*(\xi_x, \eta_r, r_0), \quad S_2 = \exp\left[-j\frac{\pi^2}{D} \eta_r^2\right] \\ S_3 &= \exp(-jC\hat{r}^2), \quad S_4 = \exp\left[-j\frac{\pi^2}{B} \eta_r^2\right] \\ S_5 &= \exp(-jA\hat{r}^2) \exp\left\{+j2\pi\hat{r} \left[\sqrt{\left(\frac{2}{\lambda}\right)^2 - \xi_x^2} - (2/\lambda)\right]\right\} \\ S_6 &= \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} r_0\right] \end{aligned}$$

S_1 中的 * 符号表示共轭操作。

$$G_{00}(\xi_x, \eta_r, r_0) = G_1(\xi_x, \eta_r, r_0) \exp(-j2\pi\eta_r r_0) \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= -D\Omega_1(\xi_x)(1 - \Omega_1(\xi_x)) \\ B &= -D\Omega_1(\xi_x) \\ C &= D(1 - \Omega_1(\xi_x)) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\Omega_1(\xi_x) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\xi_x}{2/\lambda}\right)^2}} \quad (18)$$

系数 D 可以根据实际要求进行选择, 一般选择为

$$D = \pi K_r (2/c)^2 \quad (19)$$

(2) 双天线对分布目标区域的几何关系 如图3所示,

S_1 是主天线, S_2 是副天线, Ω_t 是成像目标区域的平均坡度。 H 是主天线与地面之间的高度, θ 和 θ' 是天线波束中心线照射到目标区域的视角。 l 是主、副天线之间的基线的长度, β 是基线与水平方向的倾斜角。 Z 是成像目标区域的平均高度。

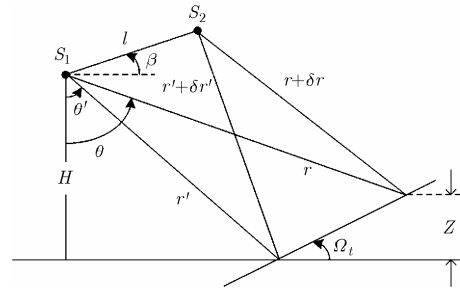


图3 双天线与成像地形的几何关系示意图

由参考文献[10]的第四章得到

$$\delta r - \delta r' = \frac{l \cos(\theta' - \beta) \cot(\theta' - \Omega_t)}{r'} (r' - r) \quad (20)$$

设 r' 为参考距离 r_0 , 那么

$$\delta r = \delta r_0 + k_s (r - r_0) \quad (21)$$

其中

$$\delta r_0 = -l \sin(\theta_0 - \beta) \quad (22)$$

θ_0 是天线波束中心线照射到参考距离 r_0 处的视角;

$$k_s = -\frac{l \cos(\theta_0 - \beta) \cot(\theta_0 - \Omega_t)}{r_0} \quad (23)$$

式(21)中的 δr_0 与距离向的距离平移因子有关, $k_s (r - r_0)$ 与距离向的距离缩放因子有关。

(3) 副天线的波数域成像算法 与主天线的波数域成像过程相比较, 副天线的波数域成像过程有两点不同。

(a) 考虑了配准要求的距离向距离平移因子, 参考距离的二维频域函数不同。

$$G_{00t}(\xi_x, \eta_r, r_0) = G_{00}(\xi_x, \eta_r, r_0) \exp(-j2\pi\eta_r n \delta r_0) \quad (24)$$

(b) 考虑了配准要求的距离向距离缩放因子, 对距离向距离 \hat{r}

的缩放因子不同。

$$\Omega_2(\xi_x) = \Omega_1(\xi_x) + nk_s \quad (25)$$

副天线的波数域成像算法可以采用图 4 的流程框图来表示。

可以看到：在成像的过程中完成配准后，产生了带有干涉相位信息的那一项因子，即

$$\Phi_F = \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}n\delta r\right) \quad (26)$$

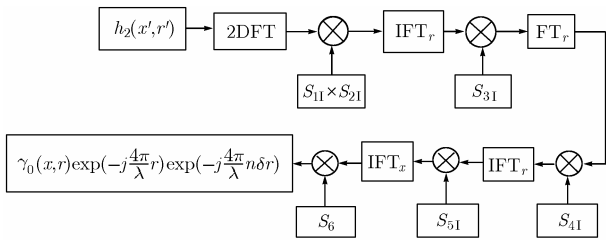


图 4 副天线的波数域成像算法流程框图

其中 $h_2(x', r')$ 为副天线接收的原始回波数据。下标符号 I 表示干涉(Interferometry)。

$$\begin{aligned} S_{11} &= G_{001}^*(\xi_x, \eta_r, r_0) = S_1 \exp(+j2\pi\eta_r n\delta r_0) \\ &= G_{00}^*(\xi_x, \eta_r, r_0) \exp(+j2\pi\eta_r n\delta r_0) \\ S_{21} &= S_2 = \exp\left(-j\frac{\pi^2}{D}\eta_r^2\right), \quad S_{31} = S_3 = \exp(-jCr^2) \\ S_{41} &= S_4 = \exp\left(-j\frac{\pi^2}{B}\eta_r^2\right) \\ S_{51} &= S_5 = \exp(-jAr^2) \exp(+j2\pi\hat{r}(\sqrt{[(2/\lambda)^2 - \xi_x^2]} \\ &\quad - (2/\lambda))) \end{aligned}$$

$$S_6 = \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}r_0\right)$$

A, B, C, D 4 个系数的关系同样满足主天线波数域成像算法中的式(17)，但是按照在副天线成像中同时完成配准的要求，还需要进行缩放因子的修改：用 $\Omega_2(\xi_x)$ 替换 $\Omega_1(\xi_x)$ 。

3 实验结果

3.1 仿真数据处理结果

(1)采用本文提出的波数域成像算法对配准前后形成的干涉相位条纹图的对比如图 5 所示。

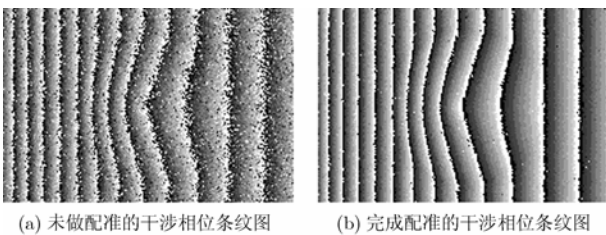


图 5 波数域成像算法的仿真数据处理结果

(2) 采用文献[11]提到的 CS 成像算法对配准前后形成的干涉相位条纹图的对比如图 6 所示。

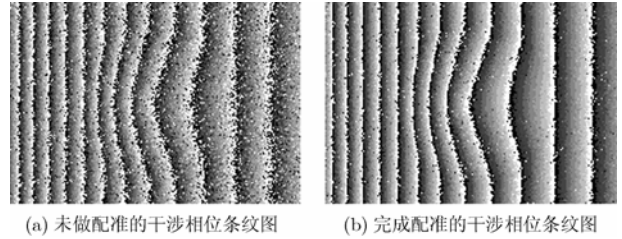


图 6 CS 成像算法的仿真数据处理结果

对比图 6(a)与 6(b)，可以看出：经过文献[11]提到的配准 CS 成像算法，形成了比较好的干涉相位条纹图。但是通过图 5(b)与图 6(b)的对比，可以看出：同样在成像中做配准，使用本文提出的配准波数域成像算法要好于文献[11]提到的配准 CS 成像算法。

从 SAR 成像原理上来说，CS 成像算法是在波数域成像算法的基础上，通过一定的近似处理得到的。InSAR 配准是一个非常精细的过程，本文提出的波数域成像算法不做近似，在成像过程中同时完成配准。与这种方法相比较，文献[11]采用的近似 CS 成像算法在成像过程中完成配准的方法，就会牺牲一定的处理精度。

3.2 实际数据处理结果

采用本文提出的配准波数域成像算法，对中国科学院电子学研究所研制的机载双天线 InSAR 系统在内蒙古地区获取的原始回波数据进行处理，得到了效果较好的干涉条纹图，如图 7 所示。其中图 7(a)的成像区域场景幅度值和图 7(b)的干涉相位值都是来自同一区域的。

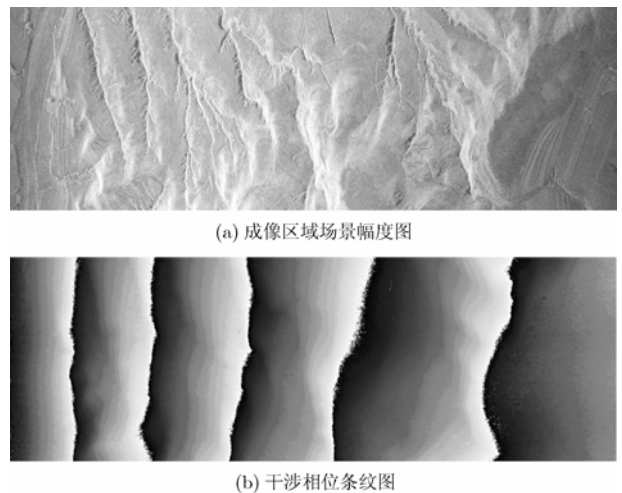


图 7 实际数据处理结果

4 结束语

通过在波数域成像算法中引入距离平移因子和距离缩放因子，可以实现成像和配准的一次完成。既获得了高质量的干涉条纹图，又省略了成像后的配准过程，提高了处理速度。

参 考 文 献

- [1] Zebker H A, Werner C H, Rosen P A, and Hensley S. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1994, 32(4): 823-836.
- [2] Zebker H A, and Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. On Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959.
- [3] Raney R K, Runge H, Bamler R, Cumming I G, and Wong Frank H. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
- [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. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123-1136.
- [5] Amler R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706-713.
- [6] Cafforio C, Prati C, and Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 1991, 27(2): 194-207.
- [7] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理. 武汉: 武汉大学出版社, 2003, 第三章.
- [8] 廖明生, 林琚. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京: 测绘出版社, 2003, 第四章.
- [9] Papoulis A. *Systems and Transforms with Application in Optics*. McGraw-Hill, 1968, Chap.4: 199-207.
- [10] Franceschetti G and Lanari R. *Synthetic Aperture Radar Processing*. New York: CRC Press, 1999, Chap.3: 128-136, chap.4: 180-185.
- [11] 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. *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. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(Suppl.): 237-243.
- 袁永照: 男, 1980年生, 硕士生, 从事信号与信息处理方面的研究.
- 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方面的研究.
- 吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事现代信息技术与应用方面的研究.
- 韦立登: 男, 1973年生, 助理研究员, 目前主要从事信号与信息处理方面的研究.