

一种 FMCW InSAR 系统时变基线估计方法

付希凯^{*①②③} 向茂生^{①②} 汪丙南^{①②} 蒋帅^{①②③} 杨玉^{①②③}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: FMCW InSAR 系统由于载机平台高度低, 气流扰动严重, 位置和姿态变化大, 且微机电系统惯性测量单元(MEMS IMU)测量精度低, 导致系统出现较大的时变基线, 严重影响数字高程模型(DEM)精度。针对这一问题, 该文提出了一种 FMCW InSAR 系统的时变基线估计方法。首先利用双通道单视复图像数据, 估计出各个距离门内的时变基线导数, 然后建立时变基线的距离向空变模型, 利用随机抽样一致性检验的方法对模型进行求解, 解得水平和垂直向的时变基线导数值, 对其积分得到时变基线值。最后通过 FMCW InSAR 实际数据对时变基线进行估计, 并与高精度位置和姿态测量系统(POS)记录的数据进行对比, 验证了所提方法的有效性。

关键词: FMCW InSAR; 轻小型载机平台; 时变基线; 微机电系统; 惯性测量单元

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1024-06

DOI: 10.11999/JEIT160763

Time-varying Baseline Estimation Method for FMCW InSAR

FU Xikai^{①②③} XIANG Maosheng^{①②} WANG Bingnan^{①②} JIANG Shuai^{①②③} YANG Yu^{①②③}

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

^②(Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For airborne dual-antenna FMCW InSAR systems, the time-varying baseline can be considerably high due to its low flight height, atmospheric turbulence, location and attitude errors and low accuracy of MEMS IMU, seriously affecting the DEM accuracy. To deal with this problem, a time-varying baseline estimation method for FMCW InSAR system is proposed. Firstly, the time-varying baseline derivative for each range gate using single look complex image data is established, and the space-variant model in range direction is established. Then the horizontal and vertical time-varying baseline derivative obtained using random sample consistent method is integrated. Finally, the proposed method is implemented on real experimental FMCW InSAR data, the effectiveness of proposed method is validated by comparing estimated results with high accuracy POS information.

Key words: FMCW InSAR; Small platforms; Time-varying baseline; Micro ElectroMechanical System (MEMS); Inertial Measurement Unit (IMU)

1 引言

伴随着轻小型载机平台的出现和发展, 小型化、轻量化、低成本成为机载 InSAR 技术发展的一个重要方向, FMCW 技术与 InSAR 技术的结合是目前实现这一目标的最佳途径^[1-10]。由于载机平台轻小, 飞行高度较低, 载机运动状态受气流扰动严重, 从而出现较大的位置和姿态误差, 而且由于载机平台承载能力的限制, 无法使用传统的体积大、重量重、功耗高、高精度的惯性测量器件。随着制造工业的

不断发展, 微机电技术不断进步, 发展出了一种微机电系统(Micro ElectroMechanical System, MEMS)惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU), MEMS IMU 具有体积小, 成本低、功耗低等优点, 较好地满足了轻小型 InSAR 系统对惯性测量器件的要求, 因此, 基于小体积、轻量化、低成本 MEMS IMU 的运动补偿是其中的一个关键技术^[11-15]。然而 MEMS IMU 的位置和姿态测量精度较低, 难以满足高精度的运动补偿要求, 在姿态角误差比较大的情况下, 双天线 InSAR 相对残余运动, 即时变基线误差较大, 严重影响 DEM 的反演精度。因此, 利用干涉数据对时变基线进行估计非常必要。

多斜视方法(MultiSquint, MS)是一种应用广泛的时变基线估计方法,最早被用于双天线 InSAR 系统的横滚角估计^[16],德国 DLR 的研究人员针对此方法在重轨干涉 SAR 的时变基线估计方面发表了很多研究论文^[17-20],提出了精度更高、鲁棒性更强的改进算法^[21],并利用 E-SAR 系统数据进行了大量实验。Mancon 等人^[22,23]把多斜视方法用于星载 InSAR 系统 Sentinel-1 进行轨迹误差估计。通过对多斜视方法估计精度的分析,我们发现估计精度受图像信噪比的影响较大,在信噪比较低的条件下,用最小二乘法对距离向空变模型的求解结果精度不高,稳定性较低。针对这一问题,本文采用了随机抽样一致性检验的方法,改进了对距离向空变模型的求解方法,使得水平和垂直向时变基线导数的估计结果更加精确和稳健;并且对时变基线方法的估计精度进行了定量分析;最后通过实验数据验证了所提方法的有效性。

本文的结构安排如下:第2节对时变基线估计的原理进行了介绍,并对距离向空变模型求解方法的改进做了详细的介绍,第3节对时变基线估计方法的精度进行了理论分析,第4节利用实际数据验证了所提方法的有效性。

2 高阶时变基线估计原理

2.1 高阶时变基线导数与子视图像差分干涉相位的关系

高阶残余运动估计的基本思想是:对同一目标而言,不同方位时刻对应的残余运动是不同的,通过一定的方法测量这种差异性,可以获得残余运动的导数,然后对导数进行变上限积分即可得到高阶残余运动。将 InSAR 系统双通道单视复图像数据在方位频域划分为多个子视,根据方位向频谱同雷达波束角之间的对应关系,从不同子视图像的差分干涉相位中获得时变的方位向配准误差,然后根据配准误差与时变基线的关系获取时变基线的导数,再通过积分得到高阶时变基线。

如果划分为 K 个子视图像,通过计算相邻子视图像的差分干涉相位,可以得到 $K-1$ 个差分干涉相位,对 $K-1$ 个差分干涉相位进行加权平均就可得到时变基线的一阶导数^[24]:

$$\frac{\partial B_n}{\partial t} = \frac{v^2}{2\pi\Delta f_{\text{sub}}R_0} \arg \left\{ \sum_{i=1}^{K-1} G_i \left(|\gamma_i| \exp(j\Phi_{i,\text{diff}}) \right) \right\} \quad (1)$$

其中, v 为载机速度, R_0 为最近斜距, Δf_{sub} 为子视图像频谱间隔, G_i 表示方位位移的算子,它将由第 i 个子视图像和第 $i+1$ 个子视图像差分干涉图估计出的残余运动的导数在时间域上移动 $(R_0/v) \cdot \tan((\theta_i$

$+\theta_{i+1})/2$), θ_i 和 θ_{i+1} 分别为对应子视图像的中心斜视角, γ_i 表示第 i 个子视图像和第 $i+1$ 个子视图像差分干涉图的相干系数, $\Phi_{i,\text{diff}} = \arg \left\{ (S_i^1 S_i^{2*}) (S_{i+1}^1 S_{i+1}^{2*})^* \right\}$ 表示第 i 个子视图像和第 $i+1$ 个子视图像的差分干涉相位。

2.2 距离向空变模型

时变基线具有距离空变性,为了消除这种特性的影响,虽然可以针对各个距离门分别进行时变基线估计,但是干涉图像对之间的去相关可能会导致很多距离门内的信号不可用,一种更为可行的方法是根据 3 维基线在多个距离门上投影的结果来估计水平基线和垂直基线,然后将获得的基线在不同的距离门上投影即可。

利用式(1)获得的是不同距离门内时变基线的导数,考虑时变基线的距离空变性,建立其随距离变化的空变模型:

$$\frac{dB_n}{dt} = \pm \frac{dB_y}{dt} \sin \theta_n + \frac{dB_z}{dt} \cos \theta_n \quad (2)$$

其中, dB_n/dt 为第 n 个距离门内的时变基线导数, θ_n 为该距离门的下视角, dB_y/dt 表示水平时变基线导数, dB_z/dt 表示垂直时变基线导数。

2.3 距离向空变模型求解方法的改进

在某一方位位置上,可以利用 N 个不同距离门内的时变基线导数来求解水平和垂直向时变基线导数。即求解如式(3)所示线性方程组:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{e}_{\text{yz}}(t) = \mathbf{e}_{\text{los}}(t) \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{e}_{\text{los}}(t) = \begin{bmatrix} \frac{dB_1(t)}{dt} & \frac{dB_2(t)}{dt} & \dots & \frac{dB_N(t)}{dt} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \pm \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ \pm \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \pm \sin \theta_N & \cos \theta_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_{\text{yz}}(t) = \begin{bmatrix} \frac{dB_y(t)}{dt} & \frac{dB_z(t)}{dt} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

考虑到不同距离门内时变基线估计的方差不同,为了对不同估计值加以区别,可以取其加权最小二乘解:

$$\mathbf{e}_{\text{yz}}(t) = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{e}_{\text{los}}(t) \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{W} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_N^2} \right\} \quad (8)$$

σ_n 为第 n 个距离门内干涉相位的标准差,其与该距

离门内各个子视信号的相干系数均值 γ ，多视视数 L 有式(9)所示关系：

$$\sigma_n = \sqrt{(1-|\gamma|^2)/(2L|\gamma|^2)} \quad (9)$$

距离向空变模型求解的精度和稳健性受到信噪比、复杂地形等因素的影响，尤其受信噪比的影响比较大，信噪比较小时，同一方位时刻，不同距离门内估计的时变基线导数误差较大，可用信号过少，而最小二乘法只适用于可用信号足够多、误差较小的情况，这时采用最小二乘法解距离向空变模型得到的结果误差较大。

针对这一问题，利用随机抽样一致性检验的方法对距离向空变模型进行求解，求解方法如下所述：

步骤 1 选取所有距离门估计的时变基线导数中的一组随机子集，并把这组随机子集假设为有效数据集；

步骤 2 用步骤 1 中选取的随机子集求解式(2)距离向空变模型的参数；

步骤 3 用步骤 2 中求解得到的距离向空变模型去测试其他距离门的时变基线导数，如果某个距离门适合于此模型，则把这个距离门归到有效数据集中；

步骤 4 如果有足够多的距离门被归到有效数据集中，那么估计的模型就足够合理，用更新后的有效数据集重新求解距离向空变模型参数；

步骤 5 最后通过估计有效数据集的数据个数与模型的错误率来评估距离向空变模型参数的合理性。

上述步骤重复固定的次数，每次产生的模型要么因为有效数据集太小而被舍弃，要么因为比现有模型更好而被选为最优模型，即可得到最优的水平垂直基线导数值。

2.4 时变基线估计流程图

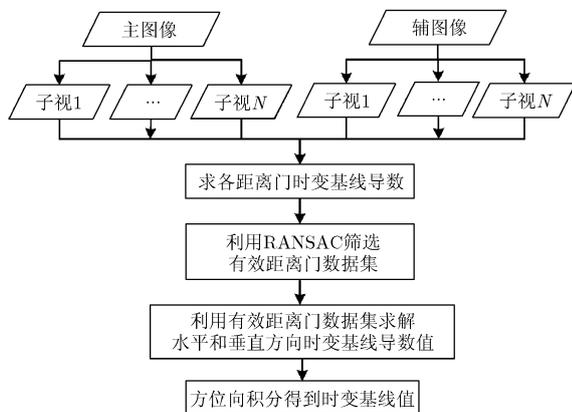


图1 时变基线估计流程图

2.5 迭代估计提高精度

为了进一步提高估计精度，在得到初步估计结果后，把估计出的时变基线误差补偿到辅图像中，先对单视复图像数据进行方位解压缩，补偿方法与基于 IMU/DGPS 的运动误差补偿方法相同，此处不再详细讨论，然后再对时变基线进行估计，通过循环迭代多次可以进一步优化估计结果。

3 时变基线估计精度分析

由式(1)可知，时变基线导数的估计精度由差分干涉相位 $\Phi_{i,\text{diff}}$ 和子视图图像频谱间隔 Δf_{sub} 决定，在此对这两方面影响分别进行系统性分析。

3.1 子视图图像频谱间隔

对式(1)关于 Δf_{sub} 求偏导：

$$\frac{\partial}{\partial \Delta f_{\text{sub}}} \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right) = - \frac{v^2}{2\pi \Delta f_{\text{sub}}^2 R_0} \arg \left\{ \sum_{i=1}^{K-1} G_i \left(|\gamma_i| \exp(j\Phi_{i,\text{diff}}) \right) \right\} \quad (10)$$

显然，频谱间隔越大，越有利于提高时变基线导数的估计精度。然而，频谱间隔过大，会导致划分的子孔径带宽偏小，会使干涉相位图中的噪声标准差变大。两者相互矛盾。因此，设置频谱间隔时需要折中考虑。

3.2 差分干涉相位

单视干涉相位的概率密度函数可以表示为相干系数的函数：

$$\text{PDF}(\phi) = \frac{1-\gamma^2}{2\pi} \cdot \frac{1}{1-\gamma^2 \cos^2 \phi} \cdot \left[1 + \frac{\gamma \cdot \cos \phi \cdot \arccos(-\gamma \cdot \cos \phi)}{\sqrt{1-\gamma^2 \cdot \cos^2 \phi}} \right], \quad \phi \in [-\pi, \pi] \quad (11)$$

其干涉相位噪声标准差为

$$\sigma_\phi = (1/\sqrt{2}) \sqrt{1-\gamma^2} / \gamma \quad (12)$$

差分干涉相位噪声标准差为

$$\sigma_{\phi_{\text{diff}}} = \sqrt{2} \sigma_\phi = \sqrt{1-\gamma^2} / \gamma \quad (13)$$

在多斜视算法中采用 K 个子视图图像进行时变基线导数估计，所以差分干涉相位 $\phi_{m,\text{diff}}$ = $\arg \left\{ \sum_{i=1}^{K-1} G_i \left(|\gamma_i| \exp(j\Phi_{i,\text{diff}}) \right) \right\}$ 的噪声标准差为

$$\sigma_{\phi_{m,\text{diff}}} = (1/\sqrt{K-1}) \left(\sqrt{1-\gamma^2} / \gamma \right) \quad (14)$$

可以看出，划分子视图图像数量越多，越有利于提高时变基线导数估计精度。然而划分数量过多，会导致图像信噪比变低，相干系数变低，从而使得差分干涉相位噪声标准差增大。

3.3 时变基线导数估计精度

由式(1)和式(14)可得，时变基线导数估计误差的标准差为

$$\begin{aligned}\sigma_{db} &= \frac{v^2}{2\pi\Delta f_{\text{sub}}R_0}\sigma_{\phi_{m,\text{diff}}} \\ &= \frac{v^2}{2\pi\Delta f_{\text{sub}}R_0}\frac{1}{\sqrt{K-1}}\frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}\end{aligned}\quad (15)$$

4 实验数据验证与分析

利用中国科学院电子学研究所研制的 Ku 波段机载双天线 FMCW InSAR 系统获取的数据，验证所提方法的有效性。此系统本次飞行试验同时装配有高精度 POS AV610 和自主研发的低精度 POS。

用低精度 POS 记录的位置和姿态信息对双通道回波数据进行聚焦成像，然后对其进行时变基线误差估计，最后以 POS610 记录的信息作为真值与估计结果进行比较，评估本文方法的估计效果。

4.1 高阶时变基线初步估计结果

用本文方法对高阶时变基线进行了估计，并与传统的距离向空变模型求解方法得到的结果进行了对比分析，实验结果见图 2。水平和垂直方向时变基线如图 2 所示。

图 2(a)、图 2(b)分别为水平和垂直向时变基线估计结果，蓝色线为利用高精度 POS 与低精度 POS 做差得到的实际误差，图例中标识为 LS 的绿色线表示采用传统的距离向空变模型求解得到的估计结果，图例中标识为 RANSAC 的红色线表示采用本文所提基于随机抽样一致性检验思想求解得到的估计结果，可以看出，本文所提改进方法更符合 POS 记录的数据，估计结果优于传统方法估计结果。

4.2 迭代时变基线估计

为了进一步提高估计精度，把初次估计的结果补偿到辅图像中，再次采用本文所提方法进行时变基线估计，如此循环迭代，本次试验迭代 5 次，迭代结果如图 3 所示。

图 3(a)、图 3(b)分别为水平方向和垂直方向时变基线迭代估计结果，可以看出，迭代 3 次估计结果已经趋于收敛；图 3(c)、图 3(d)分别为水平和垂直向 5 次迭代结果的总和，估计结果比 1 次估计更加符合 POS 记录的结果，证明了迭代估计的有效性。

从图 3(c)、图 3(d)可以看出，时变基线估计值与 POS 值之间还有微小差值，在 0.1 mm 量级，此原因在于 POS 记录的数据精度是有限的，本次试验高精度 POS 采用 POS AV610，其水平姿态误差为 0.0025°，航向姿态误差为 0.005°，基线长度为 1.3 m，导致基线测量误差为 0.1 mm 量级。

4.3 相干系数图

为了充分证明本文所提时变基线估计方法的有效性，本节从两通道相干系数图的角度来进行说明。如图 4 所示为两通道相干系数图，其中图 4(a)为原始相干系数图，图 4(b)为经过时变基线补偿后的相干系数图。接下来通过对时变基线补偿前后的相干系数图的统计直方图进行比较，观察两通道相干系数的提升。如图 5 所示为时变基线补偿前后相干系数图的统计直方图比较，可以看出，经过时变基线补偿后，两通道的相干系数得到了提升，从而证明了本文所提时变基线估计方法的有效性。

5 结束语

机载 FMCW InSAR 系统在轻小型平台、低精度 POS 条件下存在较大的位置和姿态误差，导致系统出现较大的时变基线，严重影响 DEM 反演精度。本文针对这一问题提出了一种改进的高阶时变基线估计方法，并利用实验数据验证了本文方法的有效性。线性时变基线和常数基线误差同样对 DEM 反演精度有很大的影响，且由于线性和常数基线误差对干涉相位的影响同样具有距离空变性，因此在以后的工作中很有必要对线性和常数基线误差估计方法进行研究。

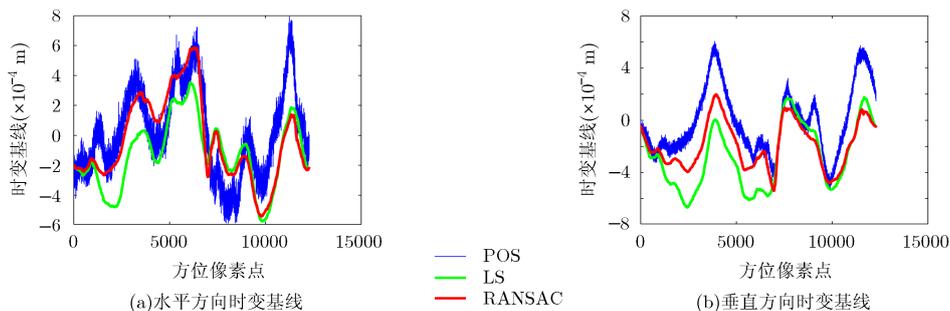


图 2 水平和垂直方向时变基线

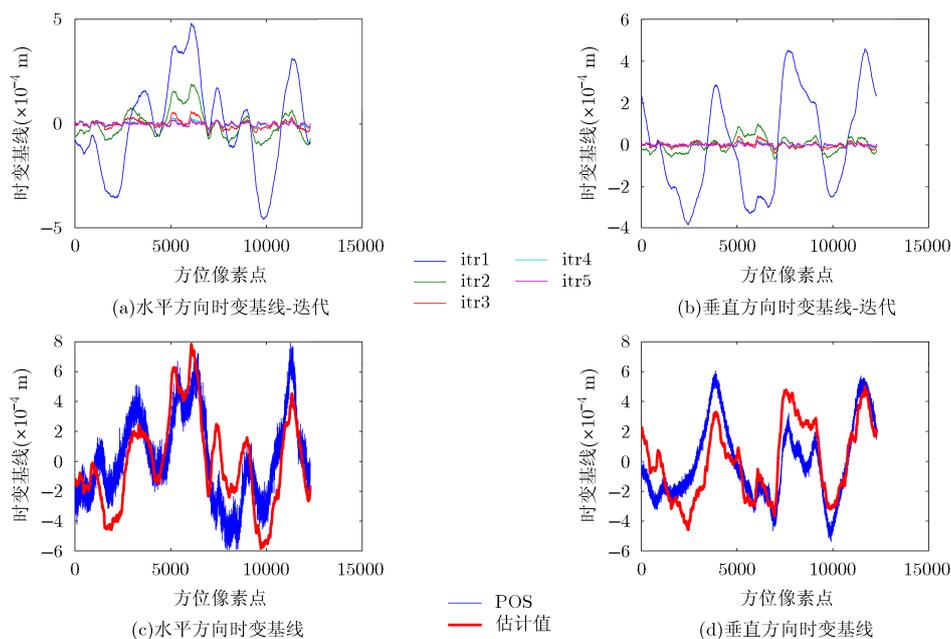


图3 时变基线迭代估计结果

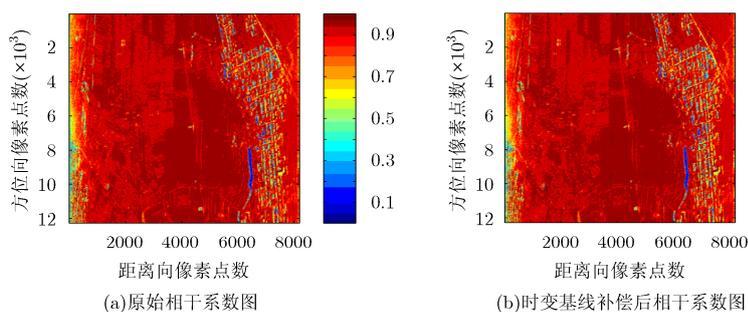


图4 两通道相干系数图

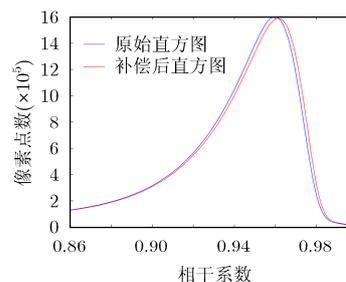


图5 相干系数直方图对比

参考文献

- [1] ZAUGG E C, HUDSON D L, and LONG D G. The BYU SAR: A small, student-built SAR for UAV operation[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Colorado, USA, 2006: 411-414.
- [2] META A, HOOGEBOOM P, and LIGTHART L P. Signal Processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532. doi: 10.1109/TGRS.2007.906140.
- [3] SIQUEIRA P, SCHROCK R, MILLETTE T, et al. An airborne 35 GHz radar interferometer in development at the university of Massachusetts[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 2933-2936.
- [4] AGUASCA A, ACEVO-HERRERA R, BROQUETAS A, et al. ARBRES: light-weight CW/FM SAR sensors for small UAVs[J]. *Journal of Sensors*, 2013, 13(3): 3204-3216. doi: 10.3390/s130303204.
- [5] FU K, SIQUEIRA P, and SCHROCK R. A university-developed 35 GHz airborne cross-track SAR interferometer: Motion compensation and ambiguity reduction[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec, Canada, 2014: 2241-2244.
- [6] SCANNAPIECO A F, RENGHA A, and MOCCIA A. Preliminary study of a millimeter wave FMCW InSAR for UAS indoor navigation[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 15(2): 2309-2335. doi: 10.3390/s150202309.
- [7] SCANNAPIECO A F, RENGHA A, and MOCCIA A. Compact millimeter wave FMCW InSAR for UAS indoor navigation[C]. IEEE AESS Workshop on Metrology for Aerospace, Benevento, Italy, 2015: 551-556.
- [8] SCANNAPIECO A F, RENGHA A, and MOCCIA A. Indoor operations by FMCW millimeter wave SAR onboard small UAS: A simulation approach[J]. *Journal of Sensors*, 2016, Article ID 4968476, 13 pages, doi: 10.1155/2016/4968476.
- [9] LIU W, FENG H, YEE A S, et al. Premier results of the multi-rotor based FMCW synthetic aperture radar system[C].

- IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2016: 1-4.
- [10] WANG Y, TANG K, ZHANG Y, *et al.* A Ku-band 260mW FMCW synthetic aperture radar TRX with 1.48 GHz BW in 65 nm CMOS for micro-UAVs[C]. IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 2016: 240-241.
- [11] 庄晋升. 基于MEMS IMU的机载SAR运动补偿方法研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院大学, 2015.
ZHUANG Jinsheng. Study on airborne SAR motion compensation method based on MEMS IMU[D]. [Master dissertation], The University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [12] JIA Gaowei, CHANG Wenge, LI Xiangyang, *et al.* A brief analysis of the motion compensation for FMCW SAR[C]. International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, Venice, Italy, 2013: 52-57.
- [13] CHANG Wenge, JIA Gaowei, LI Xiangyang, *et al.* A compact FMCW SAR real-time imaging system and its performance analysis[C]. IET International Radar Conference, Hangzhou, China, 2015: 1-4.
- [14] ZHENG Shichao, LI Xiangyang, WANG Hui, *et al.* Signal processing for Ka-band FMCW miniature SAR/GMTI system[C]. International Radar Symposium, Dresden, Germany, 2015: 541-546.
- [15] XING Mengdao, JIANG Xiwei, WU Renbiao, *et al.* Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870-2883. doi: 10.1109/TGRS.2009.2015657.
- [16] BULLOCK R J, VOLES R, CURRIE A, *et al.* Two-look method for correction of roll errors in aircraft-borne interferometric SAR[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(18): 1581-1583. doi: 10.1049/el:19971056.
- [17] SCHEIBER R and MOREIRA A. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2179-2191. doi: 10.1109/36.868876.
- [18] PRATS P and MALLORQUI J J. Estimation of azimuth phase undulations with multisquint processing in airborne interferometric SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1530-1533. doi: 10.1109/TGRS.2003.814140.
- [19] PRATS P, REIGBER A, MALLORQUI J J, *et al.* Efficient detection and correction of residual motion errors in airborne SAR interferometry[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, Alaska, 2004: 992-995.
- [20] PRATS P, REIGBER A, and MALLORQUI J J. Interpolation-free coregistration and phase-correction of airborne SAR interferograms[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2004, 36(2): 207-219. doi: 10.1109/LGRS.2004.828181
- [21] REIGBER A, PRATS P, and MALLORQUI J J. Refined Estimation of Time-Varying Baseline Errors in Airborne SAR Interferometry[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 145-149. doi: 10.1109/LGRS.2005.860482.
- [22] MANCON S, MONTI GUARNIERI A, TEBALDINI S, *et al.* Orbital error estimation through multi-squint analysis[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014: 1-4.
- [23] MANCON S, TEBALDINI S, GUARNIERI A M, *et al.* Orbit accuracy estimation by multi-squint phase: First Sentinel-1 results[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy, 2015: 1276-1279.
- [24] 李焱磊. 机载差分干涉SAR运动补偿技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院大学, 2013.
LI Yanlei. Research on motion compensation in airborne differential synthetic aperture radar interferometry[D]. [Ph.D dissertation], The University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- 付希凯: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为调频连续波InSAR信号处理理论和方法。
- 向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究双天线干涉、多基线干涉、极化干涉、阵列天线干涉等理论与方法, 以及干涉SAR面向高精度测绘、复杂地物定位与识别、组合导航等的应用技术。
- 汪丙南: 男, 1984年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为干涉合成孔径雷达信号仿真和处理方法。
- 蒋帅: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为InSAR/INS组合导航理论与方法。
- 杨玉: 女, 1990年生, 硕士生, 研究方向为连续波InSAR困难区域提取与处理。