

一种机载双天线 InSAR 基线动态测量方法

王海亮^{①②} 刘忠胜^① 向茂生^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级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 机载双天线 InSAR 系统两个天线非刚性连接时, 为保证高程测量精度和成像质量, 必须对干涉基线进行动态精密的测量。该文研究了一种基于单相机和激光测距仪组合的动态基线测量方法, 通过分别测量两个天线的中心位置和姿态, 得到干涉基线长度和基线角。论文对该方法进行了原理性研究和地面验证实验, 实验通过可精确控制轨迹的运动平台模拟天线运动, 实验结果表明该方法在 8 m 摄影距离处位置测量精度优于 0.2 mm, 姿态角精度优于 70", 是动态测量干涉基线的有效方法。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 基线测量; 近景摄影测量; 单像空间后方交会

中图分类号: TN958; P234.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)12-2825-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00006

The Dynamic Measurement for the Baseline of Airborne Dual-antenna InSAR

Wang Hai-liang^{①②} Liu Zhong-sheng^① Xiang Mao-sheng^① Wei Li-deng^①

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, a method for dynamic measurement of non-rigid baseline of dual-antenna InSAR is presented and discussed. In this scheme, the position and orientation of the antenna is obtained by using a CCD camera and a laser range finder together. In this paper, the research of principle and experiments are carried out. In the experiments, the movement of the antenna is created by some equipments, the tracks of which can be controlled accurately. The results of experiments show that the errors of position and attitude are less than 0.2mm and 70 arcseconds. The method is applicable to determine the baseline of dual-antenna dynamically.

Key words: InSAR; Baseline measurement; Close range photogrammetry; Single image space resection

1 引言

机载双天线干涉合成孔径雷达系统可以获取地面的高程信息。基线矢量越长、越精确, 获取的高程精度越高, 一般基线长度约 4 m~5 m 时, 两个干涉天线会呈非刚性连接。载机在飞行过程中, 由于大气湍流使机身或机翼的震动, 会造成干涉系统两个天线的位置和姿态动态变化, 对双天线 InSAR 系统主要有以下 3 个方面的影响: (1)使天线的波束指向发生偏移, 改变测绘带和降低干涉的相干性; (2)天线的运动轨迹动态变化, 降低成像质量; (3)基线侧滚角和基线长度等参数的动态变化, 影响干涉 SAR 高程测量的精度。虽然干涉定标技术可以反演

基线, 改善高程测量精度, 但是定标的地面控制点数量是有限的, 难以动态地反映干涉基线的实时变化。因此双天线 InSAR 系统要实现高精度的高程测量, 必需对两个天线的姿态和中心位置 6 个自由度信息动态精密地测量(这里的天线中心位置是指天线的几何中心, 天线的相位中心与几何中心的偏差可以通过定标技术得到)。因为载机机翼的震动频率一般在几十赫兹以上, 传统的测量方法无法满足要求, 所以这里采用单像数字摄影测量的方法测量天线的姿态和中心位置, 但是由于单相机测量在相机视线方向位置精度较低, 所以引入激光测距仪测量基线的长度。

2 基线测量系统组成和误差分析

2.1 基线测量系统组成

如图 1 所示为机载干涉 SAR 基线示意图^[1], 两个 SAR 天线分别置于两个机翼下方, 两个天线相位

2010-01-08 收到, 2010-06-02 改回

国家 863 计划项目(2007AA120302)和 973 计划项目(2009CB724003)

资助课题

通信作者: 王海亮 yirilong@163.com

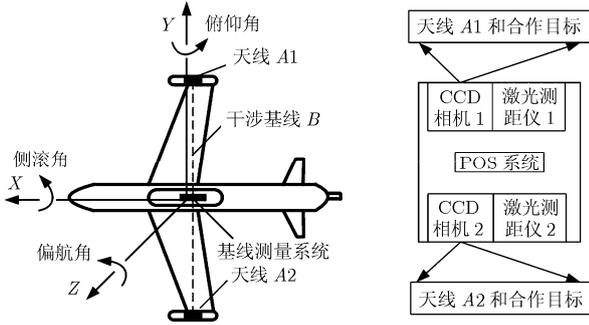


图 1 机载干涉基线和基线测量系统示意图

中心的连接矢量为干涉基线。根据图 1 所示，整个基线测量系统包括以下 3 部分：(1)两套 CCD 相机和激光测距仪组合光电测量设备，分别用于测量两侧天线的相对中心位置和姿态；(2)POS(Position and Orientation System)，包括 GPS 和惯导单元，与两套光电测量设备刚性连接，记录光电测量设备的绝对位置和姿态；(3)合作目标，每个天线安装 3 个 LED 控制点和一块平面反光板分别作为相机和激光测距仪的合作目标。

基线测量系统主要涉及以下坐标系：

PCS(POS Coordinate System): POS 系统坐标系，一般选用东北天坐标系或北东地坐标系；

CCS1(Camera Coordinate System 1): 相机 1 的坐标系，相机 1 用于测量标志装置 1；

CCS2: 与 CCS1 类似，相机 2 用于测量标志装置 2；

TCS1(Targets Coordinate System 1): 安装在天线 A1 上的标志装置坐标系 1，标志装置作为合作目标测量天线 A1 的位置和姿态；

TCS2(Targets Coordinate System 2): 安装在天线 A2 上的标志装置坐标系 2，标志装置作为合作目标测量天线 A2 的位置和姿态；

ACS1(Antenna Coordinate System 1): 天线 A1 坐标系；

ACS2(Antenna Coordinate System 2): 天线 A2 坐标系；

坐标系间的关系如表 1 所示，通过坐标转换关系可以得到基于 POS 系统的绝对基线参数和天线姿态。由表 1 所示的转换关系得

$$l_P^{A1} = l_P^{C1} + R^{C1-P} \cdot (l_{C1}^{T1} + R_1 \cdot l_{T1}^{A1}) \quad (1)$$

$$l_P^{A2} = l_P^{C2} + R^{C2-P} \cdot (l_{C2}^{T2} + R_2 \cdot l_{T2}^{A2}) \quad (2)$$

$$R^{A1-P} = R^{C1-P} \cdot R_1 \cdot R^{A1-T1} \quad (3)$$

$$R^{A2-P} = R^{C2-P} \cdot R_2 \cdot R^{A2-T2} \quad (4)$$

则绝对基线矢量为

$$B = l_P^{A2} - l_P^{A1} \quad (5)$$

表 1 坐标系间转换关系

坐标系	转换关系
CCS1 和 PCS	l_P^{C1} : 在 PCS 中表示的 PCS 到 CCS1 的平移矢量;
	R^{C1-P} : CCS1 到 PCS 的角度(旋转)变换;
CCS2 和 PCS	l_P^{C2} : 在 PCS 中表示的 PCS 到 CCS2 的平移矢量;
	R^{C2-P} : CCS2 到 PCS 的角度(旋转)变换;
ACS1 和 TCS1	l_{T1}^{A1} : 在 TCS1 中表示的 TCS1 到 ACS1 的平移矢量;
	R^{A1-T1} : ACS1 到 TCS1 的角度(旋转)变换;
ACS2 和 TCS2	l_{T2}^{A2} : 在 TCS2 中表示的 TCS2 到 ACS2 的平移矢量;
	R^{A2-T2} : ACS2 到 TCS2 的角度(旋转)变换;
CCS1 和 TCS1	l_{C1}^{T1} : 在 CCS1 中表示的 CCS1 到 TCS1 的平移矢量;
	R_1 : TCS1 到 CCS1 的角度(旋转)变换;
CCS2 和 TCS2	l_{C2}^{T2} : 在 CCS2 中表示的 CCS2 到 TCS2 的平移矢量;
	R_2 : TCS2 到 CCS2 的角度(旋转)变换;
ACS1 和 PCS	l_P^{A1} : 表示天线 A1 在 PCS 中的位置矢量;
	R^{A1-P} : ACS1 到 PCS 的角度(旋转)变换;
ACS2 和 PCS	l_P^{A2} : 表示天线 A2 在 PCS 中的位置矢量;
	R^{A2-P} : ACS2 到 PCS 的角度(旋转)变换。

表 1 中坐标系 CCS1 到 TCS1 和 CCS2 到 TCS2 的坐标转换关系是通过动态测量得到，其它坐标系间的转换关系通过刚性连接保持不变，相关误差一般认为是系统误差，可通过地面安装标定和干涉定标技术消除。论文主要研究 l_{C1}^{T1} , l_{C2}^{T2} , R_1 和 R_2 的动态测量方法及伴随的随机误差。因为两侧天线的测量方法完全相同，所以论文后面以测量天线 A1 为例，讨论单侧的测量方法。

2.2 误差分析

如图 2 所示是 InSAR 高程测量几何示意图，A1 和 A2 表示两个天线的相位中心， α 为基线侧滚角， θ 为雷达视角， B 为干涉基线， r 和 r' 分别为两个天线的作用距离， H 为载机飞行高度， h 为地面高程信息。其中

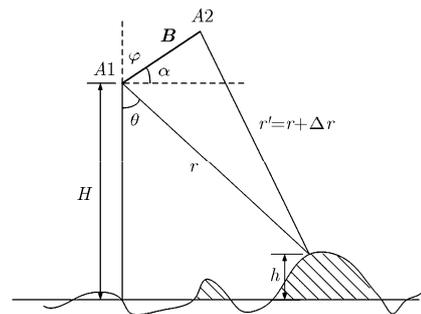


图 2 双天线 InSAR 测量高程几何示意图

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\Phi \quad (6)$$

其中 λ 为微波波长, $\Delta\Phi$ 为干涉相位。由图中的几何关系有如下关系式:

$$\alpha + \frac{\pi}{2} - \theta = \arccos\left[\frac{B^2 + r^2 - (r + \Delta r)^2}{2Br}\right] \quad (7)$$

$$h = H - r \cos(\theta) \quad (8)$$

由式(6)-式(8)可知影响高程测量精度的因素有 5 个: 载机飞行高度、雷达作用距离、基线侧滚角、基线长度和干涉相位, 由式(7)和式(8)可得到高程对各个误差分量的敏感度。文中感兴趣的是基线长度误差和基线角误差对高程精度的影响, 基线角误差引入的高程误差公式为^[2]

$$\sigma_{h1} \approx r \cdot \sin(\theta) \cdot \sigma_\alpha \quad (9)$$

基线长度误差引入的高程误差公式为

$$\sigma_{h2} \approx \frac{r}{B} \cdot \tan(\theta - \alpha) \cdot \sin(\theta) \cdot \sigma_B \quad (10)$$

设双天线 InSAR 系统以一发双收模式工作在 C 波段($\lambda=5.6$ cm), 要获取 0.25 m 的高程精度, 需要基线长度约 14 m~18 m。一般载机水平飞行, 所以基线角 α 可以认为是零。当雷达视角 θ 为 45° , 载机飞行高度 H 为 5 km, 基线长度 B 为 16 m 时, 由式(9), 式(10)可知, 需要基线长度的测量精度约为 0.3 mm~0.4 mm, 基线角精度约为 $4''$, 如表 2 所示, 表 2 中的其它误差项数值根据经验给出。

表 2 高程误差分配

误差项	基线角 误差	基线长 度误差	干涉 相位	飞行 高度	作用 距离
	$4''$	0.3 mm	2°	0.1 m	0.1 m
高程误差	0.1 m	0.1 m	0.14 m	0.1 m	0.07 m
总误差	0.23 m				

双侧 16 m 长基线实现 0.3 mm~0.4 mm 的测量精度, 需要单侧 8 m 距离测量精度达到 0.21 mm~0.28 mm。基线角误差主要是由两个天线中心位置在 Z 方向的测量误差引起, 即 $\Delta\alpha = \tan^{-1}(\Delta Z/Y)$ 。相对于 16 m 的基线, $4''$ 的基线角误差需要两个天线中心位置在 Z 方向的合成精度达到 0.31 mm, 需要单侧的测量精度约为 0.22 mm。式(1)中括号内表达式表示天线 A1 在 CCS1 中的位置矢量, 记为

$$l_{C1}^{A1} = l_{C1}^{T1} + R_1 \cdot l_{T1}^{A1} \quad (11)$$

因为 R_1 为旋转矩阵, 则有

$$\Delta l_{C1}^{A1} = \Delta l_{C1}^{T1} - \Delta R_1 \cdot R_1 \cdot l_{T1}^{A1} \quad (12)$$

根据式(12), 单侧测量实现约 0.2 mm 的基线长度精度和 0.2 mm 的 Z 方向位置精度, 需要单侧 CCD 相机的位置测量精度约为 0.1 mm, 姿态测量精度约为 $100''$ 。

3 测量原理

如图 3 所示是单像空间后方交会的几何模型^[3], 在这个模型中有两个 3 维坐标系和一个 2 维正交坐标系: 相机坐标系(Camera Coordinate System, CCS), 控制点坐标系(Target points Coordinante System, TCS)和像平面坐标系(Image plane Coordinate System, ICS)。CCS 坐标系的原点位于相机的摄影中心点 C , Y 轴与相机的主光轴重合且方向一致。相机的主光轴(即 CY 轴)垂直像平面 $O-XZ$ 于点 O , 点 C 到点 O 的距离称为相机的主距, 记为 f 。点 O 在像平面 $O-XZ$ 中的坐标记为 $[x_0, z_0]$, f 和 $[x_0, z_0]$ 称为相机内方位元素, 经过精确标定, 在测量过程认为是常数。摄影测量的目的是获得控制点坐标系相对相机坐标系的位置矢量和转角关系, 又称为像片的 6 个外方位元素^[3], 即双天线 InSAR 系统中 l_{C1}^{T1} , l_{C2}^{T2} , R_1 和 R_2 。

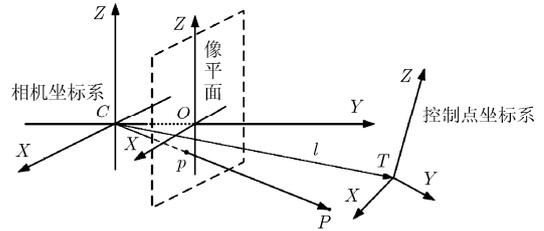


图 3 单像空间后方交会几何模型

如图 3 所示, 点 P 是一个物方控制点, 其对应的像点是像平面中的像点 p 。由中心投影原理, 点 O , P 和 p 位于同一条直线上, 可以得到如下共线条件方程式^[4-7]:

$$\begin{aligned} u &= \frac{x_p - x_0}{f} = \frac{l_x^{TAR}}{l_y^{TAR}} \\ v &= \frac{z_p - z_0}{f} = \frac{l_z^{TAR}}{l_y^{TAR}} \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $[x_p, z_p]^T$ 是像点 p 在像平面坐标系中的坐标; $l^{TAR} = [l_x^{TAR}, l_y^{TAR}, l_z^{TAR}]^T$ 表示控制点在 CCS 中的坐标, 根据图 3 所示几何关系和坐标在不同坐标系下转换关系, 可以得到^[5]

$$l^{TAR} = l + R^T l^P \quad (14)$$

其中 l 为在 CCS 中表示的原点 C 到原点 T 的向量, 记为 $l = [l_x, l_y, l_z]^T$; $l^P = [X, Y, Z]^T$ 是物方控制点 P 在 TCS 中的坐标。 R 是 CCS 到 TCS 的旋转矩阵,

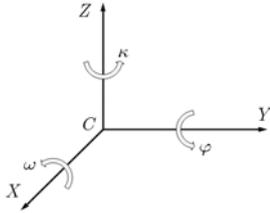


图 4 相机坐标系定义

是关于 3 个姿态角 ω , φ , κ 的函数, 3 个姿态角的定义如图 4 所示。旋转矩阵如下:

$$R = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega} \quad (15)$$

其中 R_{κ} , R_{φ} 和 R_{ω} 分别是各个方位角的旋转矩阵, 具体参考文献[5]。获取天线的中心位置和天线姿态就转化为, 利用单像空间后方交会方法求解向量 l 和旋转矩阵 R 。

由式(13)对 u 和 v 求有关 l_x 、 l_y 、 l_z 、 ω 、 φ 和 κ 的偏导, 得如下设计阵:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial l_x} & \frac{\partial u}{\partial l_y} & \frac{\partial u}{\partial l_z} & \frac{\partial u}{\partial \omega} & \frac{\partial u}{\partial \varphi} & \frac{\partial u}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial v}{\partial l_x} & \frac{\partial v}{\partial l_y} & \frac{\partial v}{\partial l_z} & \frac{\partial v}{\partial \omega} & \frac{\partial v}{\partial \varphi} & \frac{\partial v}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \quad (16)$$

求解目标物体的 3 维位置和 3 维方位角, 最少需要 3 个合理分布的控制点建立 3 对共线条件方程^[3], 从而可以得到有关 3 个控制点的设计阵 A , 设计阵 A 是一个 6×6 阶矩阵, 表示为如下的形式:

$$A = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由最小二乘方法迭代修正未知参数的初值, 得到目标的位置和姿态参数。修正值如下:

$$\begin{aligned} & [\Delta l_x, \Delta l_y, \Delta l_z, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa]^T \\ & = (A^T A)^{-1} A^T [\Delta u_1, \Delta v_1, \Delta u_2, \Delta v_2, \Delta u_3, \Delta v_3]^T \end{aligned} \quad (18)$$

为了保证测量姿态角的精度, 会根据测量目标的大小和运动范围, 将相机的视场角控制在一个较小的范围内。因为相机的视场较窄, 上述方法求解的相机视线(Y 轴)方向的位置元素精度较差, 可以

通过增加控制点的方法提高精度, 但是天线和吊舱没有足够的空间结构安装更多的控制点, 所以增加一个激光测距仪测量相机视线方向的距离。利用相机解算的 5 个外方位元素和激光测距仪的测量数据, 可以得到精确的视线方向位置精度, 具体方法参考文献[5]。

4 基线测量实验

根据前面的分析, 采用单相机和激光测距仪组合的测量方法测量天线的中心位置和姿态角。

4.1 实验平台

实验所用 CCD 相机型号为 SVS-VISTEK2020 参数如表 3 所示。激光测距仪型号为工业级 LRFS-0040-2, 利用高精度机床作为移动平台, 在约 11 m 距离处所作的激光测距仪精度评估实验, 结果显示动态相对测量精度优于 0.1 mm。如图 5 所示相机和激光测距仪安装在一个稳定的三脚架上。

表 3 相机参数

阵面大小	像元尺寸	焦距	中心像点坐标
1600×1200 像素	7.4μm×7.4μm	56.2mm	$x_0=874.32,$ $y_0=618.73$

一个由导轨和转台组成的运动平台模拟天线运动, 如图 6 所示, 导轨和转台可由计算机控制。导轨可二维直线平动, 标称精度 0.1 mm; 转台可二维转动, 标称精度为 0.0125°。实验中相机距离运动平台约 8 m, 接近正直摄影(即坐标系 CCS 和 TCS 的对应坐标轴近似平行)。

实验中由 3 个 LED 作为相机测量的控制点, 一块专用平面反光板作为激光测距仪的合作目标, 以保证激光测距仪的测量精度。根据上述的相机参数和实验条件, 相机在距离 8 m 处的视场约为 1.6 m × 1.2 m, 因此设定 3 个 LED 在 X (水平)方向的最大间距约 0.8 m, 根据安装位置确定 LED 在 TCS 中的坐标, 精度为 0.1 mm, 如图 7 所示是相机采集的一幅含有 3 个 LED 控制点的图像。



图 5 相机和激光测距仪

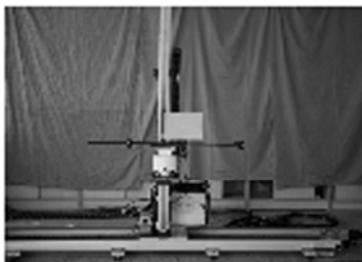


图 6 天线运动模拟平台



图 7 3 个 LED 的真实图像

4.2 姿态角精度评估实验

天线姿态角精度评估实验, 用转台模拟天线的转动, 因为没有绝对的角度真值, 所以将转台的相对转角作为参考真值, 进行误差分析。转动实验共两组, 分别是转台在水平方向(对应 CCS 转角 κ)和垂直方向(对应 CCS 的转角 ω)等间隔采集 21 幅图像, 步长为 0.25° 。采用亚像素技术, 定位图像中 LED 的中心坐标^[8]。处理结果如表 4 所示, 均方根误差小于 $100''$, 满足基线测量对姿态角精度的要求。

表 4 角度测量实验结果

ω 角间隔均值	ω 角均方差	κ 角间隔均值	κ 角均方差
0.2547°	$67.7''$	0.2513°	$70.0''$

4.3 位置精度评估实验

位置精度评估实验通过导轨的 1 维平动或 2 维平动模拟天线运动, 并将移动的距离作为真值, 分析文中测量方法的位置精度。平动实验共 3 组, 第 1 组导轨在 X (水平)方向等间距移动, 步长为 10 mm, 共采集 21 幅图像。由 21 幅图像对应的天线中心位置, 得到实测步长的均值和均方根误差, 实验结果如表 5 所示。在天线中心位置的计算中, 应用了激光测距仪的数据和天线的姿态角信息修正相机在视线方向的测量误差, 具体方法参考文献[5]。

表 5 位置精度静态实验结果

序号	实测步长均值(mm)	实测步长均根误差(mm)	步长标称真值(mm)
第 1 组	9.98	0.11	10.00
第 2 组	10.01	0.08	10.00
第 3 组	14.12	0.08	14.14

第 2 组实验导轨在 Z (垂直)方向等间隔平动, 步长为 10 mm, 共采集 21 幅图像。由 21 幅图像对应的天线中心位置, 得到实测步长的均值和均方根误差, 实验结果见表。第 3 组实验结合第 1 组和第 2 组的运动方式, 即每次图像采集间隔, 要求导轨分别在 X 方向和 Z 方向移动 10 mm, 模拟天线的 2 维空间耦合的直线运动, 共采集 21 幅图像。实测步长的均值和均方根误差分析结果见表。对 21 个天线中心位置进行直线度分析, 得直线度误差为 0.17 mm。

5 结束语

本文讨论了一种机载双天线 InSAR 系统的基线动态精密测量方法。文章分析了基线测量系统的

组成和测量模型, 并对单侧测量方法进行了原理性分析和实验研究, 结果显示该方法可以有效精确地测量天线的中心位置和姿态。在机载 InSAR 系统中, 可以根据天线的震动幅度选择更长焦距的镜头, 以缩小相机的视场角, 提高相机单位像元在空间的分辨率, 从而提高测量的精度。目前高速相机的帧频可以达到几百赫兹以上, 而且有相应的存储设备满足基线测量的动态需求。

参考文献

- [1] 吴一戎, 李广云, 王保丰等. 单台相机机载 InSAR 基线动态测量方法研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(6): 999-1001.
Wu Yi-rong, Li Guang-yun, Wang Bao-feng, et al. The dynamic measurement scheme based on single camera for the airborne InSAR baseline[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(6): 999-1001.
 - [2] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 221-229.
Yuan Xiao-kang. Introduce to the spaceborne synthetic aperture radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 221-229.
 - [3] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 9-10.
Feng Wen-hao. Close Range Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002: 9-10.
 - [4] Ghosh S K. Analytical Photogrammetry[M]. New York and Oxford: Pergamon Press, 1979: 62-69.
 - [5] Wang Hai-liang, Xiang Mao-sheng, and You Hong-jian, et al. Precision pose estimation at close range using single camera and laser range finder[C]. 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology, Beijing, November 2008, Proceedings of SPIE, 2008, Vol.7160: 71601A1-71601A8.
 - [6] Ababsa F and Mallem M. Robust camera pose estimation combining 2D/3D points and lines tracking[C]. ISIE 2008. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008. Cambridge, UK, June 30-July 2, 2008: 774-779.
 - [7] Burschka D and Mair E. Direct pose estimation with a monocular camera[C]. RobVis 2008, LNCS 4931, 2008: 440-453.
 - [8] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 81-91.
Yu Qi-feng and Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009: 81-91.
- 王海亮: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为近景摄影测量、计算机视觉和信号实时处理。
刘忠胜: 男, 1977 年生, 博士生, 助理研究员, 研究方向为干涉 SAR 成像处理。
向茂生: 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 研究方向为星载和机载干涉 SAR 系统、及其干涉 SAR 运动补偿技术和干涉 SAR 干涉处理技术等。
韦立登: 男, 1973 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为干涉 SAR 成像处理技术、干涉 SAR 运动补偿技术、干涉 SAR 自动配准技术、干涉 SAR 干涉处理技术等。