

# 基于星载光学和 SAR 影像的多视立体定位误差分析

李莹莹<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 常学立<sup>2,3</sup>, 程宇峰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>北京市遥感信息研究所, 北京 100192;

<sup>2</sup>武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 410083;

<sup>3</sup>地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079;

<sup>4</sup>武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072

**摘要** 推导了星载合成孔径雷达严密几何成像模型与有理多项式模型的等效关系, 通过对全链路误差传播特性进行建模, 仿真评估了定位精度与图像源夹角、同名点匹配精度等影响因素的定量关系, 分析了异源立体定位所能达到的理论精度及其优越性, 并推导出一套明确的数据选择策略。通过在轨数据实验充分验证了所提理论的正确性, 并详细分析了不同数据组合下的误差规律, 为异源立体定位的实际应用提供了可靠依据。

**关键词** 遥感; 立体定位; 合成孔径雷达; 异源多视; 有理多项式模型; 误差传播

中图分类号 P236; P237.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0528003

## Multi-View Stereo Positioning Error Analysis Based on Spaceborne Optics and SAR Images

Li Yingying<sup>1</sup>, Wu Hao<sup>1</sup>, Chang Xueli<sup>2,3</sup>, Cheng Yufeng<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China;

<sup>2</sup>School of Resource and Environment Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 410083, China;

<sup>3</sup>Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan, Hubei 430079, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

**Abstract** The equivalent relationship between the spaceborne synthetic aperture radar strict geometry imaging model and the rational polynomial model is derived. By modeling the error propagation characteristics of the whole link, we simulate and evaluate the quantitative relationship among positioning accuracy, image source angle and corresponding point matching accuracy. The theoretical accuracy which heterogeneous stereoscopic positioning can achieve and its superiority are analyzed, and a set of explicit data selection strategies is derived. Correctness of the proposed theory is fully verified by the in-orbit data test, and the error rules under different data combinations are analyzed in detail, which provides a reliable basis for the practical applications of heterogeneous stereoscopic positioning.

**Key words** remote sensing; stereo positioning; synthetic aperture radar; heterologous multi-view; rational polynomial model; error propagation

**OCIS codes** 280.4750; 280.6730; 200.3050

## 1 引 言

随着高分辨率对地观测卫星平台上定位、导航、姿态测量、时间测量等关键技术的突破<sup>[1-3]</sup>, 立体定位已成为遥感领域的重要发展趋势。当前大量高分辨率在轨卫星能在短时间内获取重复拍摄的全球区

域的海量影像。然而, 不同遥感器立体定位的潜力还远未被充分挖掘出来。传统的立体测图选择卫星、同传感器的影像, 但获取数据的条件非常苛刻且成本很高, 常需要利用三线阵立体相机和 InSAR 卫星等, 对卫星设计、平台机动性的要求都比较高, 难以实现大范围应用。随着卫星影像资源不断丰富,

收稿日期: 2017-11-13; 收到修改稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61501036)、中国科学院太空应用重点实验室开放基金(LSU-2016-06-01)

作者简介: 李莹莹(1980—), 女, 博士, 工程师, 主要从事遥感数据地面处理方面的研究。E-mail: 110836315@qq.com

通常在一个地区覆盖多星、多传感器的影像,利用异源卫星影像进行联合定位的方法引起了国内外学者的广泛兴趣<sup>[4-6]</sup>。这些联合定位的影像来自不同的卫星传感器,但仅限于光学/光学和合成孔径雷达(SAR)/SAR影像之间的联合定位。

光学影像和 SAR 影像作为当前立体测图的两大影像源,各有优缺点。光学影像的信噪比高,解译直观,但近似下视获取,在参与立体定位的光学影像交会角较小的情况下,直接进行区域网平差所得的定位结果无法满足精度要求<sup>[7]</sup>。与光学影像相比,SAR 影像噪声较多,但随着星载 SAR 影像分辨率的大幅度提高,SAR 成像具有全天时、全天候的独特优势,且其距离成像方式与光学中心投影方式截然不同,其特有的侧视特点对高度敏感。光学影像和 SAR 影像的结合可有效改善立体观测结构,因此探索 SAR 影像和光学影像的联合定位对提高基于遥感影像的立体定位精度具有重要的意义。与两视立体定位相比,多视立体定位可以大大提高立体构像的可能性。Li 等<sup>[8-9]</sup>提出了一套异源主被动多视立体定位方案,该方案将成像机理完全不同、任意数目比例、具有共同重叠区域的多幅光学影像和 SAR 遥感影像纳入统一的立体定位体系,且实验证明该方案可达到传统同源光学立体定位的效果。

目前,对同源光学立体图像的误差分析理论已非常成熟,关于工程应用中的图像源选择、定位精度的提升等问题都有明确的结论来指导。SAR 影像和光学影像的成像机理完全不同,导致传统的光学立体定位的误差理论完全不适用于异源立体,因此必须进行全链路误差传播规律分析,定量描述异源立体精度与各种可能影响因素的依赖关系,才能为其转入实际应用提供可靠理论依据,比如如何在不同拍摄角度、精度水平、载荷类型等大量数据中折衷选择参与立体定位的影像才能对定位精度贡献最大等,这些问题必须有明确的答案。目前,关于结合主被动遥感的立体定位方面的研究较少<sup>[10-13]</sup>,局限于对实际数据的实验验证分析,这些研究并未从源头上进行误差理论分析,影像选择完全是随机的。有关 SAR 定位误差的文献<sup>[14-16]</sup>也主要集中在平面定位精度评估、光学几何模型的等效等方面,暂无相关研究涉及异源立体定位误差规律这一问题。

基于此,本文从推导 SAR 严密几何模型与有理多项式模型(RPC)的等效关系入手,得出 SAR 真实侧视角与等效 RPC 入射角之间的对应关系;通过对全链路误差传播特性进行建模,评估定位精度与图

像源夹角、同名点匹配精度等影响因素的定量关系,分析了异源立体定位所能达到的理论精度,推导出一套明确的数据选取策略,即如何在大量同区域重复拍摄图像中选取有效数据源以用于立体定位,从而最优化最终目标区域的定位精度;通过若干在轨获取数据的实验充分验证了上述理论分析的正确性,并详细分析了不同数据组合下的误差规律,为异源立体转入实际应用提供了可靠的实践依据。

## 2 SAR 的 RPC 等效入射角推导

文献<sup>[8-9]</sup>给出了基于 CCD 和 SAR 异源多视影像立体定位的详细原理,简述如下:1)从源头即严密几何模型中通过定标等手段补偿系统性误差,在河南定标场进行 CCD 图像的高精度内外方位元素标定,用外部定标设备(如角反射器)进行 SAR 图像的时延系统误差标定;2)借助 RFM 模型的通用优势,对成像机理完全不同的 CCD 和 SAR 两种图像几何模型进行统一等效化,以构建任意同源或异源、两视或多视立体定位模型,降低求解计算量并克服迭代不收敛的问题;3)采用基于像方补偿的 RFM 立体平差方法,通过影像自身的连接点约束关系和一定数量的控制点,在 RFM 的基础上建立影像面上的仿射变换模型,纠正行列方向的系统误差,进一步提高 RFM 的定位精度,在少量控制点甚至无控制点的情况下建立较精确的三维模型;4)基于求解出的仿射变换参数和每张图像的 RPC 参数,利用同名点匹配获得同名像点坐标,采用空间前方交会确定对应地面点的物方空间坐标。

异源立体定位将多幅 CCD 和 SAR 图像纳入统一的立体定位中,如果以各自的成像几何模型为基础,在多影像输入条件下,将会带来包括图像间同名点匹配、异源立体定位模型构建解算等一系列难题。因此,对所有输入图像源进行统一等效模型化是后续多视处理的前提。RPC 模型是拟合程度很高的几何模型,对多源图像处理具有通用优势。已知中心投影 CCD 图像观测角与其等效 RPC 光线是基本重合的,如果推导出 SAR 侧视角与其等效 RPC 光线的关系,就可以完全套用传统光学立体定位的误差结论。

文献<sup>[17-18]</sup>详细分析了 RPC 模型替代星载 SAR 严密几何成像模型后的定位精度(优于1/1000像元),RPC 模型原则上与 SAR 几何方程是等价的,这里不再赘述。下面推导用 RPC 拟合 SAR 的等效入射角。RPC 本质上代表一束光线指向,其求

解的基本步骤是:由严格成像模型计算规则格网上的任意像点在多个高程面的投影点地面坐标,将这些地面坐标和像坐标拟合 RPC 的光束指向。具体而言,高程为  $h$  的一点  $P$ ,其像坐标为  $x_2$ ,卫星高度为  $H$ ,距离向分辨率为  $m_x$ ,近地点斜距为  $R_0$ ,则  $P$  点的几何方程为  $(R_0 + x_2 m_x)^2 = (X_P - X_S)^2 + (H - h)^2$ ,在高程方向上以间隔  $\Delta l$  均匀分层上下高程面。设  $H - h = L$ ,以 SAR 载荷为圆心、斜距  $R_0 +$

$x_2 m_x$  为半径的圆弧与上下高程面的交点  $P_1$  和  $P_2$  就是  $P$  的同名像点在高程面上的投影点。交点  $P_1$  和  $P_2$  处分别满足

$$\begin{cases} X_{P_1} = X_S + \sqrt{(R_0 + x_2 m_x)^2 - (L - \Delta l)^2} \\ X_{P_2} = X_S + \sqrt{(R_0 + x_2 m_x)^2 - (L + \Delta l)^2} \end{cases} \quad (1)$$

连接  $P_1$  和  $P_2$ ,连线的倾角近似为等效 RPC 的光束指向  $\gamma$ ,得出

$$\tan \gamma = \frac{|X_{P_1} - X_{P_2}|}{2\Delta l} = \frac{\sqrt{(R_0 + x_2 m_x)^2 - (L - \Delta l)^2} - \sqrt{(R_0 + x_2 m_x)^2 - (L + \Delta l)^2}}{2\Delta l} \quad (2)$$

一般 SAR 卫星高度相对于拍摄幅宽非常大,即地面点  $P$  处的斜距  $R_0 + x_2 m_x \approx L / \tan \beta$ ,  $\beta$  为 SAR 载荷侧视角,则(2)式变为

$$\tan \gamma = \frac{\sqrt{(L / \tan \beta)^2 - (L - \Delta l)^2} - \sqrt{(L / \tan \beta)^2 - (L + \Delta l)^2}}{2\Delta l} \quad (3)$$

根据(3)式画出  $\gamma$  与  $\beta$  的关系,如图 1 所示,得出 SAR 的 RPC 等效入射角垂直于其侧视角的结论,即  $\gamma \approx \pi/2 - \beta$ ,这与传统 CCD 的 RPC 等效视角与侧摆角相近是不一样的。根据 SAR 的 RPC 等效入射角

可计算出异源图像的等效立体交会角,而等效交会角的大小直接决定了立体定位的高程精度,交会角合适,则高程精度较高。这一结论对于有 SAR 参与立体定位的图像源选择和定位精度预估非常重要。

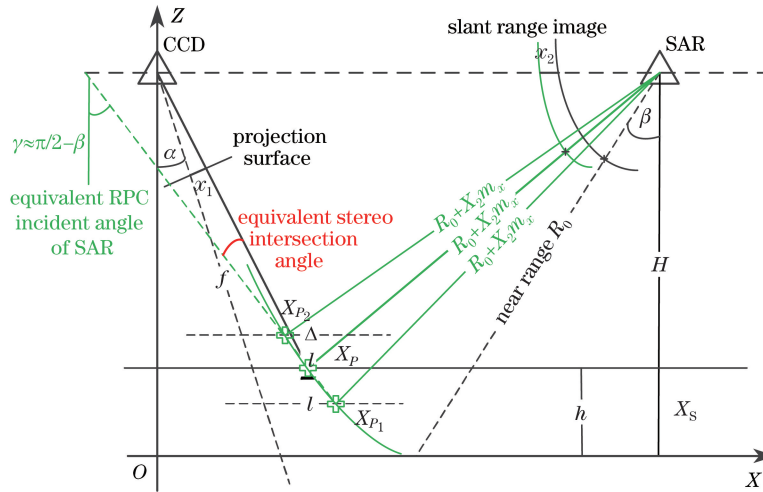


图 1 SAR 的 RPC 求解及其与 CCD 的等效立体交会

Fig. 1 RPC solution of SAR and its equivalent stereo intersection with CCD

### 3 异源立体定位误差理论推导

#### 3.1 误差特性建模

SAR 和 CCD 的严密成像几何模型均为非线性解析式,无法直接进行位置解算和误差分析。为不失一般性,如图 1 所示,建立简化平面坐标系  $XOZ$ ,  $Y$  方向分量均视为 0,后续分析均在此平面内进行。设高程为  $h$  的地平面上一点  $P(X_P, 0, h)$ ,在焦距为  $f$  的中心投影 CCD 图像上的像点坐标为  $x_1$ 。为简化计算,假定 SAR 卫星和 CCD 卫星高度均为  $H$ ,

CCD 卫星降轨左侧摆  $\alpha$  角观测地面点  $P$ ,同时 SAR 卫星侧视  $\beta$  角观测  $P$  点,CCD 位置为  $(0, 0, H)$ ,SAR 位置为  $(X_S, 0, H)$ 。忽略卫星本身的俯仰、偏航等姿态变化对成像几何的影响,则 CCD 的严密共线方程变为

$$X_P = (h - H)A/B, \quad (4)$$

式中  $A = x_1 \cos \alpha + f \sin \alpha$ ,  $B = x_1 \sin \alpha - f \cos \alpha$ 。令  $C = H / \cos \beta + x_2 m_x$ ,SAR 的严密距离多普勒模型变为  $(R_P + x_2 m_x)^2 = C^2 = (X_P - X_S)^2 + (h - H)^2$ ,当 SAR 与 CCD 为异侧时,推导出

$$X_P = X_S - \sqrt{C^2 - (h - H)^2}。 \quad (5)$$

联立(4)、(5)式得出  $X_S - \sqrt{C^2 - (h - H)^2} = (h - H)A/B$ , 则  $(h - H)^2(x_1^2 + f^2)/B^2 - 2X_S(h - H)A/B + X_S^2 - C^2 = 0$ , 求解得到

$$h - H = \frac{ABX_S \pm B\sqrt{A^2X_S^2 - (x_1^2 + f^2)(X_S^2 - C^2)}}{x_1^2 + f^2}。 \quad (6)$$

将实际数据代入, 得出(6)式取加号时是有意义的。

SAR 视角范围内的有效幅宽一般为 10~20 km, 而卫星高度一般在 500 km 以上, SAR 侧视角一般按  $20^\circ \sim 60^\circ$  计算, 其近距点和卫星星下点之间的距离至少为 180 km, 幅宽可以忽略,  $X_S$  可近似为

$$X_S \approx X_P + H \tan \beta = -\frac{A}{B}H + H \tan \beta。 \quad (7)$$

对于事先指定参与立体定位的卫星对象, (6)式中的  $f, \alpha, \beta, m_x, X_S$  均为已知参数, 那么任意点处  $h$  的精度主要由其同名像点  $x_1$  和  $x_2$  的匹配误差决定, 如果  $x_1$  和  $x_2$  为真实同名点, 计算出的  $h$  即为真实目标高度。根据误差传播定律, 可知高程误差为

$$m_h^2 = (\partial h / \partial x_1)^2 m_{x_1}^2 + (\partial h / \partial x_2)^2 m_{x_2}^2。 \quad (8)$$

由(6)式对  $x_2$  求偏导, 得到 SAR 图像匹配误差带来的高程误差分量为

$$\frac{\partial h}{\partial x_2} = \frac{BCm_x}{\sqrt{X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2)[X_S^2 - C^2]}}。 \quad (9)$$

由(6)式对  $x_1$  求偏导, 得到 CCD 图像匹配误差带来的高程误差分量为

$$\begin{aligned} & (x_1^2 + f^2) \left[ X_S(x_1 \sin 2\alpha - f \cos 2\alpha) + \right. \\ & \left. \frac{X_S^2(x_1 \sin 2\alpha - f \cos 2\alpha)A - (2x_1^2 \sin \alpha + f^2 \sin \alpha - f x_1 \cos \alpha)(X_S^2 - C^2)}{\sqrt{X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2)(X_S^2 - C^2)}} \right] - \frac{\partial h}{\partial x_1} = \\ & \frac{2x_1[X_S A B + B\sqrt{X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2)(X_S^2 - C^2)}]}{(x_1^2 + f^2)^2}。 \end{aligned} \quad (10)$$

将(7)式代入(5)式得出目标点平面坐标的表达式为

$$X_P = \frac{X_S A^2 + A\sqrt{X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2)(X_S^2 - C^2)}}{(x_1^2 + f^2)}, \quad (11)$$

同理可知平面误差为

$$m_{X_P}^2 = (\partial X_P / \partial x_1)^2 m_{x_1}^2 + (\partial X_P / \partial x_2)^2 m_{x_2}^2。 \quad (12)$$

分别对  $x_1$  和  $x_2$  求偏导, 可以得出

$$\frac{\partial X_P}{\partial x_2} = \frac{ACm_x}{\sqrt{X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2)(X_S^2 - C^2)}}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & (x_1^2 + f^2) \left[ 2X_S A \cos \alpha + \frac{2\cos \alpha X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2 + x_1^2 \cos \alpha + x_1 f \sin \alpha)(X_S^2 - C^2)}{\sqrt{X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2)(X_S^2 - C^2)}} \right] - \frac{\partial X_P}{\partial x_1} = \\ & \frac{2x_1[X_S A^2 + A\sqrt{X_S^2 A^2 - (x_1^2 + f^2)(X_S^2 - C^2)}]}{(x_1^2 + f^2)^2}。 \end{aligned} \quad (14)$$

### 3.2 图像源夹角

图 2 为高程误差和平面误差随图像源夹角的变化情况, 图 2(a)为  $\alpha$  分别为  $5^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ,  $\Delta x_1 = 1$  pixel 时的高程误差分量随  $\beta$  的变化曲线。设 SAR 与 CCD 同侧时  $\beta$  为负, 异侧时  $\beta$  为正。最小值出现在  $\beta = 0^\circ$ , 这是不存在的, 通常  $\beta$  在  $20^\circ \sim 60^\circ$  范围内时 SAR 图像有效, 即若仅考虑 CCD 匹配误差, 选择入射角较小的 SAR 图像组成的立体图像较好, 实际上入射角小的 SAR 图像距离向分辨率较差, 影响匹配精度, 带来较大的  $\Delta x_2$ , 导致较大的高程误差, 因此这两

者之间存在一个平衡。图 2(b)为  $\Delta x_2 = 1$  pixel 时的高程误差分量随  $\beta$  的变化曲线。当 SAR 侧视角与 CCD 垂直时, SAR 匹配误差带来的高程误差最大; 当 SAR 侧视角与 CCD 重合时, SAR 匹配误差带来的高程误差最小, 例如当  $\alpha = 30^\circ$  时, 选择同样位置入射  $30^\circ$  的 SAR 图像组成的立体图像的精度最高。图 2(c)、(d)分别为  $\Delta x_1$  和  $\Delta x_2$  为 1 pixel 时平面误差分量随  $\beta$  的变化曲线。与高程误差相比, 同样的匹配误差带来的平面误差较小。当 CCD 与 SAR 入射角垂直时平面误差最大, 在异侧范围内固定 CCD

图像,平面误差随 $\beta$ 的变化平缓。CCD侧摆角越小(接近下视时),平面误差受SAR的影响越小。

以上所述是从严密几何模型进行误差传播建模推导出的误差规律。从立体定位理论而言,当SAR侧视角与CCD光线重合时,由第2节可知,SAR的等效RPC视角与CCD光线垂直,目标点处的等效

立体交会角达到 $90^\circ$ 。根据传统立体图像对理论,此时高程误差最小,反之SAR与CCD垂直即弱交会时高程误差越大,这与图2(a)、(b)一致。改善的立体观测结构会提高平面定位精度,但平面定位精度本身受立体交会角的影响较小,基本由接近垂直摄影的影像决定,这与图2(c)、(d)一致。

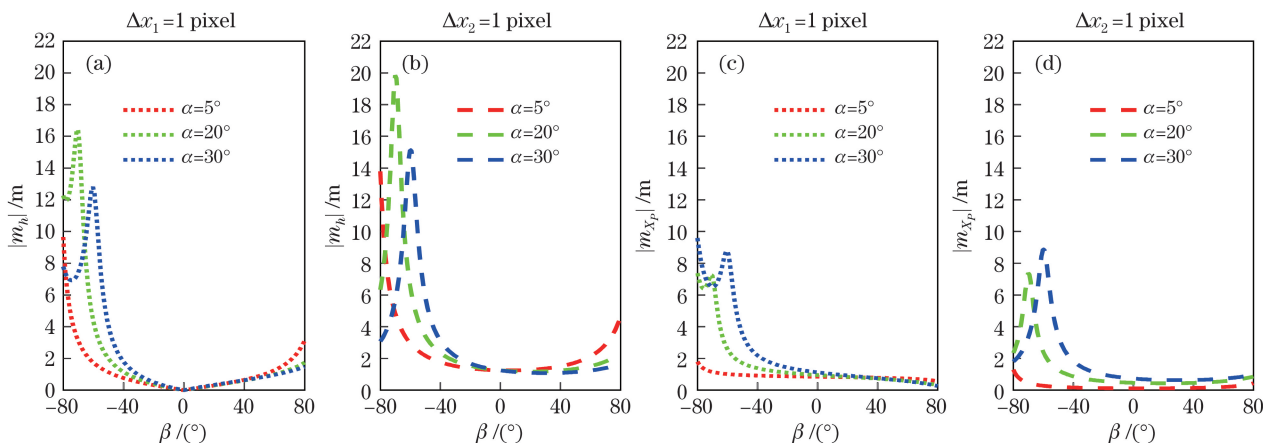


图2 (a)(b)高程误差和(c)(d)平面误差随图像源夹角的变化

Fig. 2 Variations in (a)(b) elevation error and (c)(d) plane error with image source intersection angle

### 3.3 同名点匹配误差

人眼看立体存在左右视差,因此同名像点的量测精度对立体定位高程精度影响较大,需要着重考虑。图3为CCD侧摆角 $\alpha$ 固定为 $10^\circ$ ,在不同的SAR侧视角 $\beta$ 下, $\Delta h$ 分别随CCD同名点匹配误差 $\Delta x_1$ 和SAR同名点匹配误差 $\Delta x_2$ 的变化趋势。由图3可以得出以下几个结论:

- 1) 高程误差随同名点匹配误差的增加而增加。
- 2) 相对于 $\Delta x_1$ ,相同的 $\Delta x_2$ 带来的高程误差更大。当 $\beta = -45^\circ$ 、 $\Delta x_2 = 2$ 时, $\Delta h = 5$  m;当 $\Delta x_1 = 2$ 时, $\Delta h \approx 2$  m。因此提高SAR图像的匹配精度非常重要。

3) 理论上, $\beta = 0^\circ$ 时,同样的 $\Delta x_1$ 带来的误差最小; $|\beta|$ 越大,同样的 $\Delta x_1$ 带来的误差越大。另外,当SAR与CCD同侧时, $\Delta x_1 > 0$ 使得 $\Delta h > 0$ ,即计算高程比真实高程偏大,异侧时 $\Delta h < 0$ ,即计算高程偏小。

4) SAR与CCD夹角越大,等效立体交会角越小,同样的 $\Delta x_2$ 带来的 $\Delta h$ 越大;反之,等效立体交会角越小,同样的 $\Delta x_2$ 带来的 $\Delta h$ 越小。另外,任何情况下, $\Delta x_2 > 0$ 使得 $\Delta h < 0$ ,即计算高程比真实高程偏小。

以上是从误差传播建模推导出的规律,下面从成像原理进行分析。如图4(a)所示,SAR的侧视角分别为 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ ( $\beta_1 < \beta_2$ )时,等效RPC光线垂直于入射线,与CCD准确光线和带量测误差 $\Delta x_1$ 的光线分

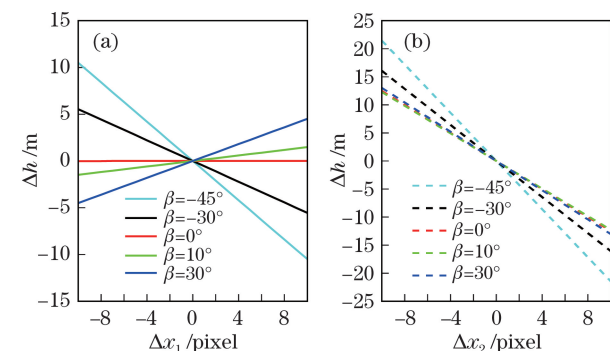


图3 高程误差随(a)  $\Delta x_1$ 和(b)  $\Delta x_2$ 的变化

Fig. 3 Variation in elevation error with (a)  $\Delta x_1$  and (b)  $\Delta x_2$

别相交得到高程误差 $\Delta h_1$ 和 $\Delta h_2$ ,由图可见 $\Delta h_2 > \Delta h_1$ 。如图4(b)所示,SAR侧视角为 $\beta_1$ 时,等效RPC光线与CCD光线的夹角大于SAR侧视角为 $\beta_2$ 时的夹角,当SAR存在量测误差 $\Delta x_2$ 时,CCD光线与SAR准确弧线和带量测误差的弧线分别相交得到高程误差 $\Delta h_1$ 和 $\Delta h_2$ ,由图可见 $\Delta h_2 > \Delta h_1$ ,与理论推导一致。

### 3.4 重叠图像数目

CCD和SAR载荷不集成在同一飞行器上,分别从不同高度、不同视角对地面进行拍摄。同一地面点可在多幅CCD和SAR图像上成像,其像点观测值数量将会比单独采用CCD或SAR影像平差时的像点观测值数量多,可提供更多的冗余观测数。根据测量平差理论,冗余观测数越大,越有利于粗差

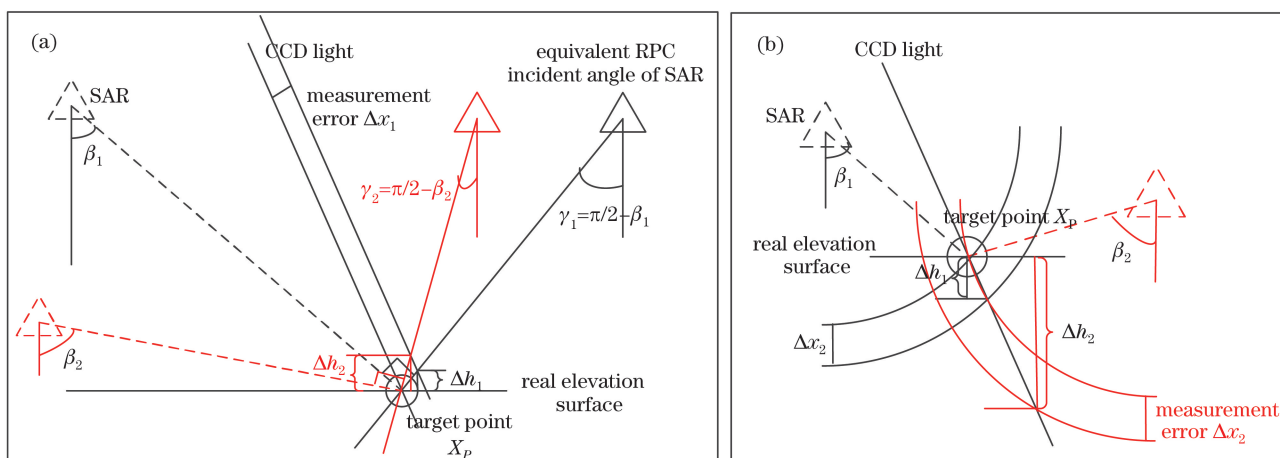


图 4 (a) CCD 的量测误差  $\Delta x_1$  带来的高程误差示意图; (b) SAR 的量测误差  $\Delta x_2$  带来的高程误差示意图

Fig. 4 (a) Schematic of elevation error caused by measurement error  $\Delta x_1$  of CCD;

(b) schematic of elevation error caused by measurement error  $\Delta x_2$  of SAR

剔除,平差结果可靠性越高。尤其是在无控或者稀少控制点条件下,参与组合的图像数目越多,越有利于最终立体定位精度的提升。

#### 4 多分辨率复杂组合下的异源立体定位实验

目前获得了河南登封区域 1:10000、1:2000 的高精度参考数据,区域内主要地貌类别齐全,包括山

地、丘陵、平原、湖泊。收集了参考数据范围内的多景 CCD 和 SAR 图像进行异源立体定位实验,精度评价包括 X、Y 方向的平面误差和高程误差。进行 A 和 B 两组实验,参与实验的卫星图像的基本参数如表 1 所示,实验需要若干连接点、控制点和检查点。为了能在同一基准上对比同源两视和异源多视实验结果,A 和 B 两组的对比实验采用同一批连接点、控制点和检查点。

表 1 参与实验的卫星图像基本参数

Table 1 Basic parameters of satellite images participating in tests

Group	Image	Load type	Acquisition time	Ascend or descend track	Direction of side view	Side view angle / (°)
A	1	CCD	2012-10	Descend track	Left	6.75
	2	CCD	2013-03	Descend track	Left	2.47
	3	SAR	2011-11	Ascend track	Right	36.41
B	4	CCD	2014-12	Descend track	Left	6.07
	5	CCD	2015-04	Descend track	Left	28.17
	6	CCD	2015-01	Descend track	Right	2.74
	7	SAR	2015-01	Ascend track	Right	37.57
	8	SAR	2015-01	Descend track	Right	35.97

基于 A 组图像进行了同源和异源立体定位实验。4 个连接点固定,控制点和检查点共 15 个,实验采用四角点布控方案,剩余 11 个点作为检查点。四角点布控方案下 A 组的各组合平面和高程误差如图 5 所示,由图 5 可以得到:

1) 由于 CCD 卫星均为降轨成像,对同一目标重复拍摄获取的图像夹角十分有限,如 A 组中 CCD 两视夹角仅为  $4.28^\circ$ ,立体条件较差,定位高程误差很大,四角点布控后平面误差被消除,但是高程误差没有得到改善。该结果证明:如果立体定位条件不

好,加入再多的控制点对高程也没有帮助。

2) 加入了 SAR 图像后,升降轨不同且视角差异很大,等效立体交会角由  $4^\circ$  增大至  $51^\circ$ ,高程误差由 29.017 m 降至 3.039 m,这充分证明了 SAR 图像对立体定位精度的贡献很大。另外,三视组合的平面定位精度最高,可达到 1.802 m,证明重叠影像数越多,平差的可靠性越高。

3) 在四角点布控方案下,通过求解仿射变换模型的参数,减小了由传感器位置和姿态变化引起的平移误差以及由星载 GPS 和惯导系统引起的

旋转和比例误差等,平面误差和高程误差分别达到1.802 m和3.039 m,完全满足1:50000地形图立体测量要求。

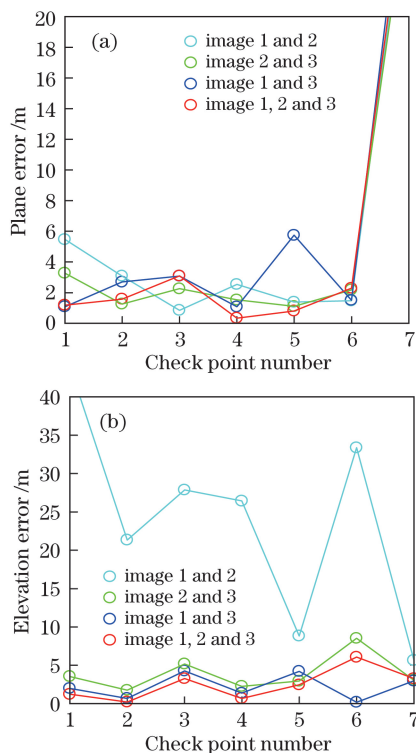


图5 四角点布控条件下A组各组合的 (a)平面误差和(b)高程误差

Fig. 5 (a) Plane error and (b) elevation error of group A under four-point control condition

为进一步验证更复杂的多分辨率组合立体精度,选取分辨率分别为0.8,1,3 m的CCD和SAR影像共5景(表1中B组),其图像相对位置示意图如图6所示。图7为各图像的等效RPC入射光线透视图,描绘了笛卡儿坐标系下5景图像拍摄时刻的卫星相机与目标图像的相对位置。不同颜色的实线代表每幅图像的真实入射角,虚线为基于RPC系数计算出的等效视角。由图可见,图像4,5,6为CCD图像,其侧摆角和等效RPC视角基本相同;图像7,8为SAR图像,其侧摆角和等效RPC视角基本垂直,该结果与第2节中的理论推导完全一致。

表2给出了三角点布控条件下几种典型组合的平面误差和高程误差对比。异源立体定位采用异源SAR,和CCD统一转化为RFM模型进行立体平差,表2中的等效立体交会角指将参与计算的所有影像进行相对定向,利用其RPC参数算出的真实交会角。

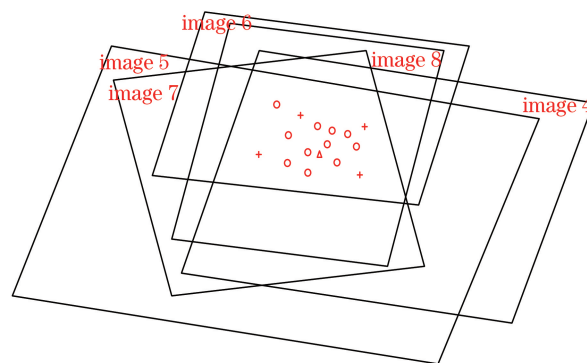


图6 B组图像的相对位置示意图

Fig. 6 Schematic of relative position of images in group B

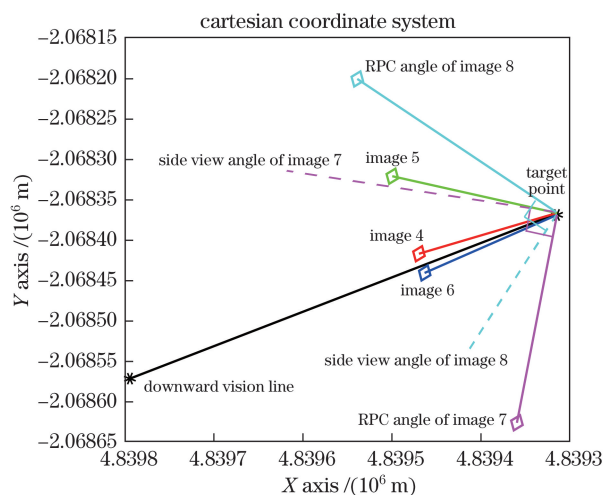


图7 各图像的等效RPC入射光线透视图

Fig. 7 Equivalent RPC incident light perspectives for each image

由表2可以得出:

1) 异源立体定位和同源立体定位的误差均随着等效立体交会角的增大而减小。

2) CCD成像为中心投影构像,其视角受限,立体成像效果不明显;根据SAR的侧视成像机理,成像视角越大,分辨率越高。通过对比B2和B8,可以发现加入SAR后,等效立体交会角由25°增至46°,高程误差由3.4 m降至2.5 m,该结果体现了在立体图像源中加入SAR影像的异源优势。

3) 通过对比B6~B9,可以发现即使最大交会角不增加,随着参与立体定位的影像数增多,立体定位误差逐步减小,该结果与之前的理论分析结果是一致的,体现了多视优势。

4) 受限于平台设计和成像机理,单景SAR几何精度与CCD相比偏低,多视立体定位后的平面精度主要由CCD决定,该结论与第3.2节的理论分析结果一致。

表 2 三角点布控条件下 B 组各组合的平面误差和高程误差  
Table 2 Plane error and elevation error for group B under three-point control condition

Group No.	Image composition	Equivalent maximum stereo intersection angle /( $^{\circ}$ )	Error at check points /m			
			X-direction	Y-direction	Plane	Elevation
B1	Homogenous and different side 4/6	7.16	1.533	2.179	2.664	18.227
B2	Homogenous and same side 4/5	25.50	1.962	2.436	3.128	3.311
B3	Homogenous and different side 5/6	32.60	1.711	3.166	3.598	3.621
B4	Homogenous 4/5/6	32.60	1.518	2.564	2.979	3.445
B5	Heterogenous and different side 5/8	20.80	5.286	3.020	6.088	5.643
B6	Heterogenous and different side 4/8	46.30	1.866	1.872	2.643	2.933
B7	Heterogenous and same side 6/8	53.40	1.682	2.500	3.013	2.945
B8	Heterogenous 4/5/8	46.30	2.207	2.243	3.146	2.569
B9	Heterogenous 4/5/6/8	53.40	1.595	2.358	2.847	2.416

## 5 结 论

基于前期提出的异源主被动多视立体定位方案,针对当前国内外相关研究缺乏深入的误差规律分析、实验影像选择完全随机、异源立体定位转入实际应用困难的现状,从误差理论分析和在轨数据验证两方面推导出了明确的异源立体定位误差规律。研究得到如下结论:在卫星参数一定的前提下,异源立体定位误差主要与等效立体交会角、同名点匹配精度、参与图像数目等因素有关。但是异源立体定位误差理论与传统光学立体定位误差理论有一定区别:1)SAR的RPC等效视角与其真实侧视角相垂直,因此当SAR侧视角与CCD侧摆角重合时,等效立体交会角达到 $90^{\circ}$ ,高程误差和平面误差最小;反之,当SAR与CCD视角垂直时,等效交会角为 $0^{\circ}$ ,高程误差和平面误差最大。2)一定的匹配误差在不同交会角下对定位误差的影响不同,在考虑增加立体交会角进行图像选择的同时,要综合SAR侧视角对图像分辨率以及匹配误差的影响。3)由所有参与图像RPC参数计算出的等效立体交会角越大,立体条件越好,高程误差越小,即使交会角不增加,随着图像数的增多,定位误差也会减小。4)异源立体的平面定位精度主要由CCD决定,当CCD视角越小即越接近下视时,平面误差受SAR的影响越小。

以上结论为异源立体定位的实际应用提供了可靠依据,但异源立体定位技术的推广需要解决自动化的问题,其中多源遥感影像之间的自动配准是关键。借助RFM模型的通用优势,基于几何约束的异源多视影像同名点高精度匹配是后续研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Fan C C, Wang M, Yang B. A method of high-precision ground processing for star sensor and gyro combination and accuracy verification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 0928002.  
范城城, 王密, 杨博, 等. 一种星敏感器/陀螺地面高精度组合定姿与精度验证方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 0928002.
- [2] Zhao R, Jiang Y, Zhang G, *et al.* Geometric accuracy evaluation of YG-18 satellite imagery based on RFM[J]. *Photogrammetric Record*, 2017, 32(157): 33-47.
- [3] Cheng Y F, Jin S Y, Wang M. A high accuracy image mosaicking approach of optical remote sensing satellite for multi-camera system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0828003.  
程宇峰, 金淑英, 王密. 一种光学遥感卫星多相机成像系统的高精度影像拼接方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0828003.
- [4] Jeong J, Yang C, Kim T. Geo-positioning accuracy using multiple-satellite images: IKONOS, QuickBird, and KOMPSAT-2 stereo images[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4549-4564.
- [5] Tang S, Wu B, Zhu Q. Combined adjustment of multi-resolution satellite imagery for improved geo-positioning accuracy[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 125-136.
- [6] Wu Y D. Comparative analysis on block adjustment methods for multi-sensor SAR images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(9): 24-28.  
吴颖丹. 多源SAR影像区域网平差的比较研究[J]. *测绘科学*, 2014, 39(9): 24-28.
- [7] Wang T Y, Zhang G, Li D R. Comparison between



- plane and stereo block adjustment for ZY-3 satellite images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(4): 389-395.
- 汪韬阳, 张过, 李德仁, 等. 资源三号测绘卫星影像平面和立体区域网平差比较[J]. *测绘学报*, 2014, 43(4): 389-395.
- [8] Li Y Y, Wu H, Sun X K, *et al.* Research about stereo positioning using multi-source remote sensing images[C]//Sun J, Liu J, Fan S, *et al.* Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC), Singapore: Springer, 2016, 389: 513-525.
- [9] Li Y Y, Wu H, Chang X L. Research on stereo positioning with CCD and SAR multi-view image[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(11): 137-141.
- 李莹莹, 吴昊, 常学立. 一种异源多视影像的立体定位方法[J]. *测绘科学*, 2016, 41(11): 137-141.
- [10] Raggam J, Almer A, Strobl D. A combination of SAR and optical line scanner imagery for stereoscopic extraction of 3-D data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994, 49(4): 11-21.
- [11] Toutin T. Spatiotriangulation with multisensor HR stereo-images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(2): 456-462.
- [12] Xing S, Xu Q, He Y. Combined stereo location among multi-sensor remote sensing images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(5): 522-526.
- 邢帅, 徐青, 何钰. 多源遥感影像“复合式”立体定位的研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(5): 522-526.
- [13] Cheng C Q, Zhang J X, Huang G M, *et al.* Combined positioning of TerraSAR-X and SPOT-5 HRS images with RFM considering accuracy information of orientation parameters[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(2): 179-187.
- 程春泉, 张继贤, 黄国满, 等. 考虑定向参数精度信息的 TerraSAR-X 和 SPOT-5 HRS 影像 RFM 联合定位[J]. *测绘学报*, 2017, 46(2): 179-187.
- [14] Wang J, Balz T, Liao M. Absolute geolocation accuracy of high-resolution spotlight Terra SAR-X imagery-validation in Wuhan[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2016, 19(4): 267-272.
- [15] You H J, Ding C B, Fu K. SAR image localization using rigorous SAR collinearity equation model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(2): 158-162.
- 尤红建, 丁赤飏, 付琨. SAR 图像对地定位的严密共线方程模型[J]. *测绘学报*, 2007, 36(2): 158-162.
- [16] Liu J, Qiu X, Hu Y, *et al.* Geolocation of HJ-1C satellite image using one GCP[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec City, QC, Canada, IEEE, 2014: 4776-4779.
- [17] Zhang G, Fei W B, Li Z. Evaluation of the RPC model for spaceborne SAR Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(6): 727-733.
- [18] Zhang G, Qin X W. Spaceborne SAR and InSAR data processing technology based on RPC model[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013.
- 张过, 秦旭文. 基于 RPC 模型的星载 SAR 和 InSAR 数据处理技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2013.