

基于高精度景象匹配的 SAR 平台定位方法*

陈圣义^{1,2}, 刘晓春^{1,2}, 滕锡超^{1,2}, 李晓雪^{1,2}, 雷志辉^{1,2}

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:提出一种利用 SAR 图像与光学基准图高精度匹配实现 SAR 平台定位的方法。利用成像中间时刻 SAR 平台与 SAR 图像中心线上物点在水平面的投影共线的特性,在图像中心线上均匀选取若干点作为匹配点,并与光学基准图进行高精度景象匹配获取它们的物点坐标;根据这些物点坐标估计出图像中心线在当地水平面投影的直线方程;利用直线信息和斜距高度信息计算 SAR 平台在水平面上的投影点位置,进而计算得到成像中间时刻 SAR 平台的空位置。为了进一步提高匹配精度,分别提出对正侧视和斜视 SAR 图像匹配区域进行几何粗校正的方法。还分析了不同误差因素对平台定位精度的影响,并给出精度估计公式。仿真和实际图像实验结果表明,方法正确可行,具有较高的定位精度,具备工程实用价值。

关键词:合成孔径雷达;平台定位;景象匹配;直线拟合;误差传递

中图分类号:TP391.4 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)05-121-06

SAR positioning method based on high-precision scene matching

CHEN Shengyi^{1,2}, LIU Xiaochun^{1,2}, TENG Xichao^{1,2}, LI Xiaoxue^{1,2}, LEI Zhihui^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A SAR platform location method which utilizes the high-precision scene matching of SAR images and optical reference images was proposed. According to that the projections of SAR platform and object point in SAR image centerline are collinear, some points on the centerline were equably engaged as control points in the proposal method, and then the spatial position was obtained by matching with optical reference image. The equation of the projection line on the local horizon of centerline was estimated with the points. The projection point position of the SAR platform on the horizontal plane was calculated by making use of the straight line and slant-range-altitude information, as well as the spatial position of the platform. Considering the difference between boresight and squint imaging mode, rough rectifying methods were respectively proposed according to the two modes to improve the matching precision. The impact of different errors on location precision was also analyzed and the precision estimation formulas were derived. Both simulation and real data test results show high accuracy and precision of the proposed method, thus bringing forth good practical value for engineering.

Key words: synthetic aperture radar; platform geo-location; scene matching; line fitting; error propagation

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有全天时、全天候成像的优点,并且对目标区域成像精度较高,特别适用于景象匹配等视觉导航系统^[1-2]。不同于一般的光学传感器成像方式,SAR 依靠于运动成像,这样一种成像特点使得 SAR 平台定位问题具有一定的特殊性。

李亚超等^[3]提出在 SAR 正侧视成像条件下,利用某方位门上的两个高精度匹配点作为控制点来解算 SAR 平台位置。这种方法原理简单,同时计算量较小,但是对匹配精度要求较高,并且容易

在 SAR 飞行方向(方位向)产生比较大的误差。秦玉亮等^[4]提出了一种融合多传感器信息的方法,结合使用惯导输出的速度、高度计的测高数据以及距离多普勒数据来计算 SAR 平台的空位置,但其定位精度容易受速度数据和高度数据的误差影响。文献[5]采用多项式参数来描述 SAR 平台运动轨迹,使用若干控制点来建立观测方程组,最后利用最小二乘法来估计这些参数。与该方法类似,程华等^[6]提出在正侧视条件下使用支持向量机来估计 SAR 平台的运动方程。这类

* 收稿日期:2015-05-27

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2013YQ140517)

作者简介:陈圣义(1989—),男,江西萍乡人,博士研究生,E-mail:chensy8904@sina.com;

刘晓春(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:lxc1448@163.com

方法能够有效利用所有控制点的信息,但是参数化的运动方程往往只能在短时间内符合实际情况,并且运动参数的估计精度依赖于运动过程中采样时刻的 SAR 平台定位精度。

1 SAR 平台定位方法

图 1 表示了在世界坐标系 XYH 中, SAR 平台以速度 v 飞行时成像的几何关系。 XOY 平面为成像区域的当地水平面, OH 为当地的高度方向, V 为速度在 XOY 平面上的投影; S 为成像中心时刻对应的平台位置, S_0 为 S 在 XOY 平面上的投影, 并利用其他传感器(如高度计)获得平台相对于 XOY 的高度 h , 即 $h = \overline{SS_0}$; S_0L 在 XOY 平面上, 表示该时刻波束中心的成像区域; X_1, X_2, \dots, X_n 为 S_0L 上的点, 它们对应于 SAR 图像中心线上的一系列点, 通过 SAR 图像坐标以及图像分辨率可以计算得到这些点的斜距 D_1, D_2, \dots, D_n 。假设 X_1 对应于图像的中心点, 一般地, 将 S 到 X_1 的距离认为是 SAR 成像距离, S_0 到 X_1 的距离为相应的地距, 用 L_1 来表示。

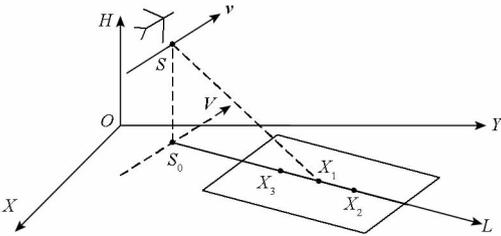


图 1 SAR 成像几何关系

Fig. 1 Geometric relation of SAR imaging

1.1 景象匹配确定图像点地面位置

定位过程中,先在 SAR 图像的中心线上均匀地选取若干点,并通过景象匹配的方法来确定这些点在 XOY 平面上的位置。由于目前主要使用光学基准图来进行景象匹配,因此,这两类异源图像的高精度匹配是实现高精度 SAR 平台定位的基础。

由于成像原理的巨大差异, SAR 图像和光学基准图在灰度域上一般不存在严格的对应关系。为了消除这两类图像间灰度和纹理差异的影响,可以同时二者在灰度域进行变换,并抽取两者之间稳定的物理结构信息。本文使用了一种基于局部频率信息的异源图像匹配方法^[7-8], 首先将图像由灰度域变换到频率域,利用局部频率信息来构造适于异源匹配的光照不变图像表达,并提取图像间公共、稳定的物理结构信息,进而实现异源图像间的高精度匹配。

另外, SAR 图像上的景物位置与其斜距相对应,因此与地面实际场景还存在一定差异。为了进一步提高景象匹配的精度,可以利用已知的 SAR 成像信息对匹配区域的图像进行几何粗校正,使其与光学基准图基本一致。

1.1.1 正侧视 SAR 图像粗校正

SAR 图像距离向上斜距与地面实际距离不一致,并且比例尺不是常数。如图 2 所示,不考虑地面起伏, h 为 SAR 平台高度;用 X 表示波束中心上任意点,并且有 $0 < \theta < \pi/2$, 并用 D 表示 X 的像在斜平面上的位置,可用 D 和 L 分别表示该点的斜距和在地面上相对于点 S_0 的距离,则有:

$$L = D \sin \theta \tag{1}$$

式(1)两端微分得:

$$\Delta L = \Delta D \sin \theta \tag{2}$$

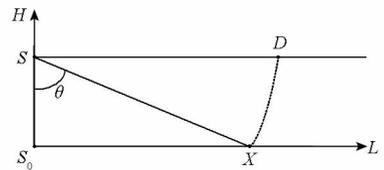


图 2 斜距与地距的关系示意图

Fig. 2 Sketch of slant range and ground range

用 K 表示 SAR 图像相对于实际地距的比例尺, 即有:

$$K = \frac{\Delta D}{\Delta L} = \frac{1}{\sin \theta} \tag{3}$$

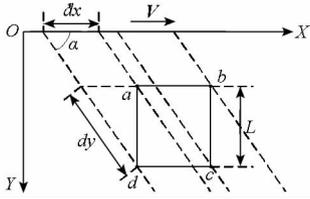
从式(3)可以看出,比例尺是俯角 θ 的函数,而不是常数,并且随着 θ 增大而减小。越接近点 S_0 的地方,比例尺越大,成像得到的地面场景压缩程度越大,表现为 SAR 成像中的近距离压缩现象。这样一种变比例尺的图像不利于景象匹配,可以在景象匹配之前根据已知的 SAR 平台高度,估计出匹配区域内图像上各点对应的俯角 θ , 并根据式(3)在图像的距离向上进行拉伸修正,使得匹配区域内图像比例尺基本一致,以提高景象匹配精度。

1.1.2 斜视 SAR 图像粗校正

在非正侧视条件下,在同一距离门上的点依然可以用来进行 SAR 平台定位, SAR 平台依然位于这些点所在的直线上。但是在这种条件得到的 SAR 图像相对地面实际景象会有较大的剪切形变,不利于景象匹配,因而需要根据已知的成像角度对 SAR 图像进行几何粗校正。

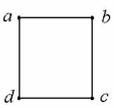
如图 3 所示, SAR 平台沿 X 轴以速度 V 飞行,在地面 XOY 上有个矩形 $abcd$, 矩形高为 L 。当以正侧视进行 SAR 成像时,即 $\alpha = \pi/2$ 时,可以得

到如图3(b)所示的矩形图像;若以前斜视成像方法进行成像,即 $\alpha < \pi/2$,则如图3(a)所示,最先被雷达波束扫描到的是 d 点,接下来依次为 a, c 和 b 点,因而在等效平面上得到的图像如图3(c)所示。

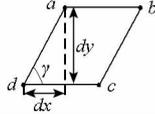


(a) 前斜视成像几何关系

(a) Imaging geometry of squint mode



(b) 正侧视成像结果
(b) Side-looking image



(c) 前斜视成像结果
(c) Squint image

图3 正侧视成像与非正侧视成像结果对比

Fig. 3 Result contrast between side-looking and squint imaging mode

由图3(a)中几何关系可知, $dx = L \cot \alpha$, $dy = L / \sin \alpha$, 则 $\tan \gamma = dy / dx = \sec \alpha$ 。将斜视图像校正到正侧视图像,需要先消除斜视角造成的横向剪切形变,再消除纵向的拉伸,可以通过如式(4)所示变换完成:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cot \gamma \\ 0 & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, (x, y) 为斜视图像上的像素坐标, (x', y') 为该点在校正后图像上的坐标,由上述几何关系可知, $\cot \gamma = \cos \alpha$, 拉伸因子 $s = \sin \alpha$ 。

需要指出的是,严格意义上的SAR图像几何校正模型^[9]非常复杂,本文仅单纯地从几何关系出发,利用成像高度和斜视角对SAR图像进行粗略校正。通过这样的粗校正可以使SAR图像匹配区域与光学基准图的景象特征结构基本一致,从而可以较大地提高景象匹配速度和精度。

1.2 SAR平台位置确定

SAR图像中心线投影在当地水平面内也是一条直线,并且,成像中心时刻SAR平台空间位置在水平面上的投影也在这条直线上。通过上述景象匹配方法确定中心线上若干点所对应的地面坐标后,就可以利用它们估计出水平面上投影直线的方程。最后利用成像时的高度数据以及各点的斜距就能够估计出SAR平台的空间位置。

1.2.1 计算图像中心线在地面投影直线方程

如图4所示,在图像中心线上均匀地选取 n

个点进行景象匹配,其中点 X_1 对应于SAR图像中心。由于这些点均在SAR图像的中心线上,根据它们在当地水平面的对应点可以拟合一条直线,这条直线就是中心线在 XOY 平面上的投影,即 S_0L 所在的直线。用齐次坐标形式来表达 XOY 平面上的点,即 $X_i = [x_i \ y_i \ 1]^T$,同时设 S_0L 满足直线方程 $ax + by + 1 = 0$,则直线 S_0L 可用向量 $l = [a \ b \ 1]^T$ 来表示,并且有 $X_i^T l = 0$ 。利用以上匹配点来估计直线 S_0L ,设 $\hat{l} = [\hat{a} \ \hat{b} \ 1]^T$ 为 l 的估计,且 $\varepsilon_i = X_i^T \hat{l}$,则可转化为如式(5)所示的最优化问题来估计直线方程。

$$[\hat{a} \ \hat{b}] = \arg \min \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \right) \quad (5)$$

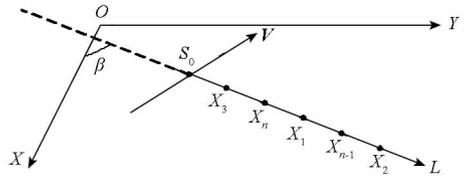


图4 控制点拟合投影直线

Fig. 4 Fitting the projection line with control points

1.2.2 确定SAR平台空间位置

使用其他传感器获得SAR平台的海拔高程 h_s ,再根据高程模型获取各匹配点的高程,用 h_i 表示,各点的斜距应满足 $D_i^2 = H_i^2 + L_i^2$,其中 $H_i = h - h_i$ 。当无法精确取获高程模型的时候,各点高程也可以用当地平均海拔高程来代替。利用上述关系,可以计算得到 S_0 到 X_i 的距离 L_i ,进而可以确定 S_0 在 XOY 平面上的位置 (x_s, y_s) 。当使用所有匹配点来估计 S_0 的位置时,可以得到一个超定方程组,设估计结果为 $\hat{S}_0 = (\hat{x}_s, \hat{y}_s)$, \hat{S}_0 到点 X_i 的距离为 \hat{L}_i ,有 $\hat{D}_i^2 = H_i^2 + \hat{L}_i^2$,并令 $d_i = D_i - \hat{D}_i$,可以通过优化问题

$$\begin{cases} [\hat{x}_s \ \hat{y}_s] = \arg \min \left(\sum_{i=1}^n d_i^2 \right) \\ \text{s. t. } \hat{a} \hat{x}_s + \hat{b} \hat{y}_s + 1 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

来估计 S_0 的位置。

根据 S_0 的估计结果,可以得到 S 在 XYH 坐标系中的坐标为 $\hat{S} = (\hat{x}_s, \hat{y}_s, h_s)$,再根据 XYH 坐标系与大地坐标系之间的转换关系,可以计算得到 S 的经纬度,完成SAR平台的定位。

2 误差分析

本文SAR平台定位方法主要包含两部分:通过匹配点确定图像中心线在水平面的投影以及根

据斜距确定 SAR 平台的位置。第一步估计中心线投影时,会引入面内直线的斜率误差,也就是直线倾角误差,这个误差会在垂直于距离向的方向上(正侧视成像时就是方位向)被 SAR 成像距离放大,带来一定的定位误差;第二步确定 SAR 平台位置时,受斜距测量误差以及各匹配点高程误差等影响,会在距离向上引入一定的定位误差。正侧视成像时,方位向垂直于距离向,因而上述两种误差可以分别在这两个方向上进行分析;而斜视成像时,由于方位向不再垂直于距离向,因而第一种误差不在方位向上,而是在垂直于距离向的方向上。下面在正侧视条件下对这两种误差进行分析。

2.1 方位向误差分析

首先分析地面点匹配误差对确定图像中心线在地面投影方向精度的影响。如图 4 所示,SAR 图像中心线的地面投影方向就是直线 S_0L 与 OX 轴的夹角 β ,可以在 XOY 平面上通过直线上的 n 个点来确定。这些点在 XOY 平面上的位置通过景象匹配来确定,且地面点的匹配精度直接决定了中心线的定向精度。

在实际匹配过程中是在波束中心线上均匀选取的图像点与基准图进行匹配,这里讨论使用 n 个均匀分布的点来拟合直线时,直线在平面中倾角 β 的精度 σ_β 与点定位精度 σ_k 的关系。在平面中,直线方位角 β 与斜率 k 的关系为 $\beta = \arctan k$,由误差传递关系可知:

$$\sigma_\beta = \sigma_k / (1 + k^2) \quad (7)$$

在使用多点拟合直线时可以先使用坐标旋转使得直线与坐标系横轴基本平行,这样并不会影响直线拟合精度,这时有 $k \approx 0$,可以认为:

$$\sigma_\beta = \sigma_k \quad (8)$$

并且此时影响直线定向精度的是各点在纵轴方向的精度。假设这 n 个点的相邻间距为 ΔL ,通过坐标平移使得第一点的横坐标为 $x_1 = 0$,第 i 个点的横坐标近似为 $x_i = (i - 1)\Delta L$,同时各点的纵坐标为 y_i 。设各点分布在直线 $y = kx + b$ 上,则由这些点可组成方程组:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{Y} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{X} = [k \quad b]^T$, $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$ 。使

用最小二乘方法可以解得 $\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y}$ 。

设各点在横轴和纵轴方向的定位误差均为 σ_x ,可得 \mathbf{Y} 的协方差矩阵为 $\Sigma_Y = \sigma_x^2 \mathbf{I}_n$,其中 \mathbf{I}_n 为

n 维单位方阵。令 $\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$,则 \mathbf{X} 的协方差矩阵为 $\Sigma_X = \mathbf{B} \Sigma_Y \mathbf{B}^T$,其第一行第一列的元素为 σ_k^2 。可化简得到:

$$\sigma_k^2 = \frac{12\sigma_x^2}{n(n+1)(n-1)\Delta L^2} \quad (10)$$

直线的定向精度为:

$$\sigma_\beta = \sqrt{\frac{12}{n(n+1)(n-1)}} \frac{\sigma_x}{\Delta L} \quad (11)$$

上述直线的定向误差被 SAR 成像距离放大后,会在方位向上对 SAR 平台定位带来误差:

$$\sigma_V = \sigma_\beta L_0 = \sqrt{\frac{12}{n(n+1)(n-1)}} \frac{\sigma_x L_0}{\Delta L} \quad (12)$$

2.2 距离向误差分析

对于波束中心线上的各点,在 SAR 图像上的斜距为 $D_i^2 = L_i^2 + H_i^2$,其中 H_i 表示 SAR 平台相对于第 i 个点的高度,而 $L_i = L_{s0} - L_{s0}$, L_{s0} 和 L_{i0} 分别为 S_0 和第 i 个点在 L 轴上的位置,则有 $L_{s0} = L_{i0} - \sqrt{D_i^2 - H_i^2}$ 。利用式(6)进行优化求解时,其实质是对利用多个点算得的 L_{s0} 进行平均,即:

$$L_{s0} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_{i0} - \sqrt{D_i^2 - H_i^2}) \quad (13)$$

假设各点匹配精度均为 $\sigma_{L_{i0}} = \sigma_x$,各点高程精度为 σ_h ,SAR 成像时斜距精度为 σ_D ,根据误差传递公式可知,SAR 平台定位在距离向上的精度为:

$$\sigma_L = \sqrt{\sigma_x^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial L}{\partial L_{i0}}\right)^2 + \sigma_h^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial L}{\partial H_i}\right)^2 + \sigma_D^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial L}{\partial D_i}\right)^2} \quad (14)$$

整理得:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{N} + \frac{\sigma_D^2}{N} + \frac{\sigma_D^2 + \sigma_h^2}{N^2} \sum_{i=1}^N \frac{H_i^2}{D_i^2 - H_i^2}} \quad (15)$$

3 实验结果

使用仿真数据对所提出的 SAR 平台定位方法进行精度验证,并使用实际挂飞获得的 SAR 图像进行实验验证。

3.1 仿真数据实验

在仿真实验中,假定 SAR 平台高度 $h_s = 7000$ m,点 S_0 到图像中心的距离 $L_0 = 20\,000$ m。在水平面上均匀取 $n = 12$ 个控制点,相邻点之间的距离 $\Delta L = 700$ m,假设它们的位置已经由景象匹配获得,匹配精度为 σ_x ,且各点高程满足均值为 0、标准差为 σ_h 的高斯分布,解算过程中各匹

配点高程均取为 0 m。各匹配点的斜距 D_i 通过使用 SAR 平台与各点位置的真值计算获得,并添加均值为 0、标准差为 σ_D 的高斯噪声。

本文进行了 3 组不同实验,分别研究了匹配误差、地面点高程误差以及斜距测量误差对 SAR 平台定位精度的影响。具体配置如下:

- 1) $\sigma_h = 5 \text{ m}, \sigma_D = 1 \text{ m}$, 匹配精度 σ_X 从 0 到 15 m 变化;
- 2) $\sigma_X = 5 \text{ m}, \sigma_D = 1 \text{ m}$, 地面点高程精度 σ_h 从

0 到 15 m 变化;

- 3) $\sigma_X = 5 \text{ m}, \sigma_h = 5 \text{ m}$, 斜距测量精度 σ_D 从 0 到 15 m 变化。

在不同误差条件下分别进行了 500 次独立实验,分别统计了方位向和距离向 SAR 平台定位的均方根误差作为各误差条件下的定位精度,并根据式(12)和式(15)算得的理论精度进行了对比。具体结果如图 5 所示。

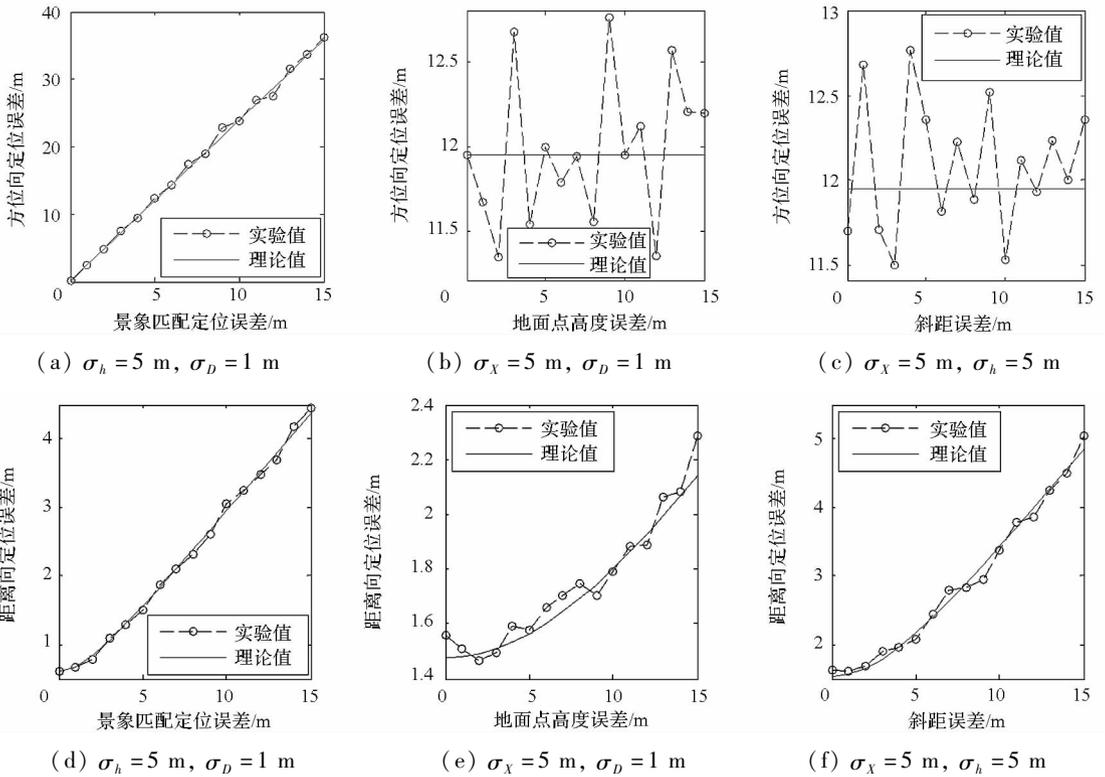


图5 定位精度仿真实验结果

Fig.5 Experimental results of synthetic data

从实验结果可以看出,各误差条件下的 SAR 平台定位精度与理论值基本一致。使用该方法进行 SAR 平台定位,在距离向上精度都能优于 5 m,而在方位向上精度受匹配误差影响较大,这主要是由直线的定向误差被成像距离放大所致,在景象匹配精度达到 5 m 时,方位向的定位精度达到 12 m,这在工程实际中是可以接受的。

3.2 实际图像实验

使用实际挂飞得到的正侧视 SAR 图像进行了实验验证。如图 6 所示,左半部分是所使用的 SAR 图像,右半部分为光学基准图。匹配过程中在 SAR 图像的中心线上均匀地选取了 13 个点,其中第 7 个点就是图像中心点,白色十字丝表示了匹配结果。实验所使用的光学基准图是从 Google Map 下载的,并进行了经纬度校正^[10],精

度可以达到 10 m 以内,图像分辨率为 1 m/Pixel,因而匹配精度可以达到 10 m。根据精度公式以及成像参数可以计算得到这种条件下方位向定位精度为 63.5 m,距离向定位精度为 4.0 m。

实验中选取了 SAR 图像序列中的 5 幅图像进行景象匹配和 SAR 平台定位,并与飞行时 GPS 数据进行对比得到定位误差,结果如表 1 所示,均与理论值一致。需要指出的是,文中使用一倍标准差(1σ)来表示理论精度,实际中误差达到 3σ 是正常的,因此表 1 中图像 5 的距离向误差略大于理论值也是可以接受的。实验中方位向的定位误差较大,这主要是由于匹配误差较大造成的,实际中若使用精度更高的专用卫片,匹配精度可以到 5 m 甚至更高,方位向的定位精度可以得到显著提高。

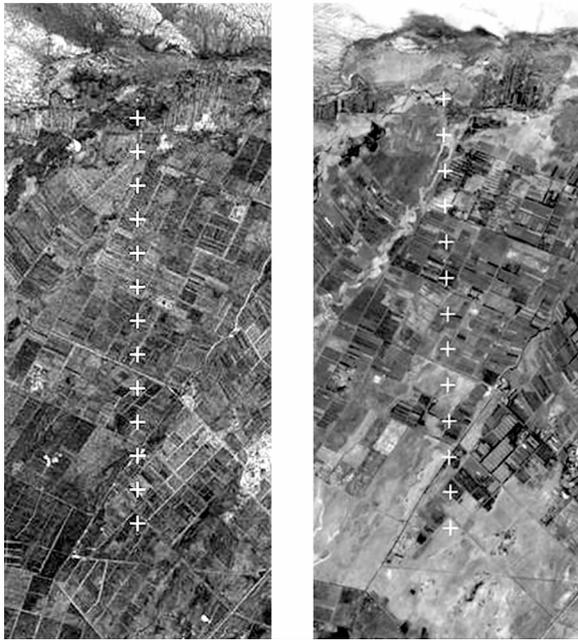


图 6 SAR 图像(左图)与光学基准图(右图)匹配结果
Fig. 6 Matching result of SAR image (the left) and optical reference image (the right)

表 1 定位误差
Tab. 1 Location error

	方位向误差/m	距离向误差/m
图像 1	-26.9	-1.1
图像 2	24.7	1.5
图像 3	-38.3	-2.0
图像 4	-3.3	-3.4
图像 5	0.8	-6.2

4 结论

利用高精度景象匹配实现了 SAR 平台定位,并分别给出了正侧视和斜视成像的匹配区域几何粗校正方法,使得该定位方法在两种成像条件下都能适用。文中还分析了各种误差因素对定位精度的影响,并通过仿真数据实验验证了精度分析结果,同时结果也表明本文方法可以得到较高的定位精度。最后利用实际挂飞 SAR 图像与光学基准图进行匹配并解算平台位置,定位结果表明本文方法可以实现较高精度的 SAR 平台定位,具有一定的工程实用价值。

参考文献 (References)

[1] Wiley C. Synthetic aperture radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, AES - 21 (3): 440 - 443.

[2] 李想, 朱遵尚, 尚洋, 等. 方向矩异源图像匹配算法[J]. 国防科技大学学报, 2015(1): 153 - 158.
LI Xiang, ZHU Zunshang, SHANG Yang, et al. Multimodal image registration based on orientation-moment[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015(1): 153 - 158. (in Chinese)

[3] 李亚超, 吕孝雷, 王虹现, 等. 高精度景象匹配下的高速 SAR 平台定位和测速[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11): 1851 - 1855.
LI Yachao, LYU Xiaolei, WANG Hongxian, et al. Research on positioning and measuring speed in the high speed SAR system based on high precision map matching[J]. Systems Engineering and Electronic, 2007, 29(11): 1851 - 1855. (in Chinese)

[4] 秦玉亮, 李宏, 王宏强, 等. 基于 SAR 导引头的弹体定位技术[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 121 - 124.
QIN Yuliang, LI Hong, WANG Hongqiang, et al. Missile location based on SAR seeker[J]. Systems Engineering and Electronic, 2009, 31(1): 121 - 124. (in Chinese)

[5] 李天池, 周荫清, 马海英, 等. 基于参数估计的 SAR 定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 372 - 374.
LI Tianchi, ZHOU Yinqing, MA Haiying, et al. SAR position method based on parameter estimation[J]. Systems Engineering and Electronic, 2007, 29(3): 372 - 374. (in Chinese)

[6] 程华, 陆微微, 田金文. 基于最小二乘支持向量机的 SAR 平台定位[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 489 - 494.
CHENG Hua, LU Weiwei, TIAN Jinwen. SAR platform geo-location based on least squares support vector machines[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 489 - 494. (in Chinese)

[7] 刘晓春, 钟涛, 于起峰, 等. 基于局部频率信息和单类型 - 模拟退火的异源图像配准[J]. 光学学报, 2013(06): 196 - 206.
LIU Xiaochun, ZHONG Tao, YU Qifeng, et al. Multi-modal image registration based on local frequency information using modified simplex-simulated annealing algorithm[J]. Acta Optical Sinica, 2013(06): 196 - 206. (in Chinese)

[8] Liu X C, Lei Z H, Yu Q F, et al. Multi-modal image matching based on local frequency information[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 3: 1 - 11.

[9] 王冬红, 王番, 周华, 等. SAR 影像的几何精纠正[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 66 - 70.
WANG Donghong, WANG Fan, ZHOU Hua, et al. Precise Rectification of SAR Images[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 66 - 70. (in Chinese)

[10] 陈圣义. 空地导弹景象匹配制导关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
CHEN Shengyi. Study on key technology of scene matching guidance for air-to-ground-missile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)