

文章编号: 1007-4619(2006)01-0076-06

# 星载 SAR 图像的定位精度分析研究

刘秀芳, 刘佳音, 洪 文

(中国科学院 电子学研究所现代信息技术研究室, 北京 100080)

**摘 要:** 从雷达成像机理出发, 详细介绍了星载 SAR (Synthetic Aperture Radar) 图像的定位算法, 并结合仿真的数据和 Radarsat 卫星的图像, 对定位精度进行了分析和研究, 研究结果表明, 地形起伏、轨道测量误差、回波延时测量误差是影响定位精度的主要因素。在 Radarsat 卫星本身的系统测量精度范围内, 该算法可以使 Radarsat 图像的定位精度达到 600—800m, 如果地面站能够提供精确轨道数据, 定位精度可进一步提高。

**关键词:** 合成孔径雷达 SAR; 像素定位

**中图分类号:** TP722.6/TP702 **文献标识码:** A

## The Analysis of the Precision in Spaceborne SAR Image Location

LIU Xiu-fang, LIU Jia-yin, HONG Wen

(Information Technical Lab, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** This paper introduced the algorithms of SAR image location on the basis of image processing. And the precision of location is analyzed by the simulated datum and Radarsat slant image. The result indicated that the terrain variation, orbit measurement and echo pulse delay are the main factors which influenced the location precision. To Radarsat image, the location precision can attain 600—800m.

**Key words:** SAR; pixel location

## 1 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 技术以其高分辨率、全天候、全天时的工作能力以及对目标的识别特性, 在军事、地形测绘、海洋监测等方面发挥着日益重要的作用。实际的 SAR 卫星图像应用过程中, 地面目标在图像上必须有精确的像素位置, 在图像的后处理中, 为了保证几何校准精度也必须对图像像素进行精确的定位。光学遥感卫星可以利用角度信息对目标进行精确定位, 但 SAR 卫星是通过信号成像处理后才实现方位向波束的锐化性能, 因此, SAR 图像无法像光学图像那样直接利

用真实天线的方向性信息来定位。

SAR 图像的早期定位方法是在星载 SAR 观测带内找出一些位置已知的人工或自然参考点, 再根据像素和参考点相对位置关系来确定目标的位置。但是, 在大多数场合, 特别是海洋应用, 很难找到可靠的参考点。1982 年, Curlander 等人提出了利用地球模型方程、SAR 多普勒方程、SAR 斜距方程对图像像素进行定位的理论, 并于 1989 年完成了 SAR 图像自动校正地理编码后处理系统<sup>[1,2]</sup>。该系统可以对 SAR 图像进行精确定位, 精度可以达到 200m。在此基础上, 可实现大幅测绘带 SAR 图像的拼接等应用, 为 SAR 图像的地面应用奠定了基础。以后, Downan, Roth, G. Schreier 等人对 SAR 图像的像素

收稿日期: 2004-07-02; 修订日期: 2004-08-30

基金项目: 中国科学院电子学研究所知识创新工程领域项目资助 (8146-07)。

作者简介: 刘秀芳 (1972—), 女, 助理研究员, 1997 年毕业于东北师范大学物理系理论物理学专业, 现主要从事星载 SAR 图像的地理编码及应用领域的研究, 已发表相关论文 4 篇。E-mail: xlfiecas@sina.com.cn

定位进行进一步的发展和完善,利用 DEM 数据的修正,使之对于地形起伏比较大的区域,可以达到 35m 的定位精度。并在此基础上,实现了对多种地形误差的校正<sup>[3-6]</sup>。

本文在各种文献汇总的基础上,对 SAR 图像的像素定位方法进行了研究,并利用理想的点目标仿真数据对斜距多普勒定位方法进行了全方位的分析 and 验证。结果表明,理想情况下,斜距多普勒定位方法本身产生的误差在两个像素范围内,对 50km × 50km 的区域,只有 6m 的误差,因而该算法本身的精度可以满足地面应用数据处理的精度要求。在影响定位精度的各种因素中,地形起伏误差、轨道测量误差、脉冲回波延时测量误差是导致目标点有定位偏差的主要因素。在此基础上,本文针对北京地区的一幅 Radarsat 数据,经成像处理和地理编码后形成了 SAR 标准图像产品,并在该图像产品上选取了几个控制点,对各点的定位精度进行了分析比较。结果表明:在 Radarsat 卫星本身的系统测量精度范围内,斜距多普勒定位方法使该图像的定位精度达到 600—800m。

## 2 星载 SAR 工作原理及定位算法

SAR 工作原理用图 1 来描述。星载 SAR 在飞行中向地面发射线性调频脉冲信号,由于卫星相对地面运动,自地面反射回来的回波有多普勒频移。频移量的大小取决于雷达相对于成像区矢径方向上的相对速度的大小。所有在源雷达天线相位中心的矢径上投影速度一样大的曲面上的点构成等多普勒曲面。SAR 成像时,像素点的空间定位由两方面来决定:一是根据雷达在目标上回波时间的长短来确定像点离雷达的距离,二是根据回波的多普勒特性。像点必定在等距离曲面和一个等多普勒曲面的交线上,如果预先知道像点所在的约束平面,如地表面,则像点的空间位置可唯一的确定。因此,星载 SAR 成像是一个完备定义了的问题。

SAR 图像中目标点位置的准确程度是通过定位精度来衡量的。SAR 图像的定位也是星载 SAR 后处理的基础。实际的 SAR 卫星定位条件取决于惯性坐标系斜距方程、多普勒方程、地球模型方程的联立。由多普勒中心频率方程和地球模型方程在地面的交线确定的等多普勒线,与给定斜距方程的交点就是目标点在地面的位置  $R_T(x_T, y_T, z_T)$ ,如图 2。

SAR 图像的像素定位首先要选定固定的坐标系,

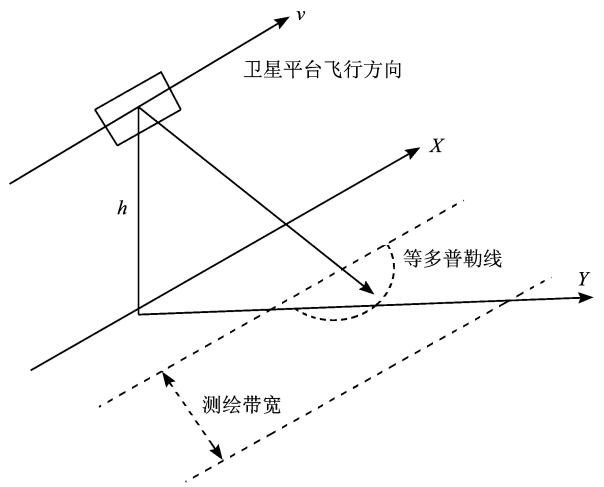


图 1 星载 SAR 图像的工作原理  
Fig 1 The principle of spaceborne SAR

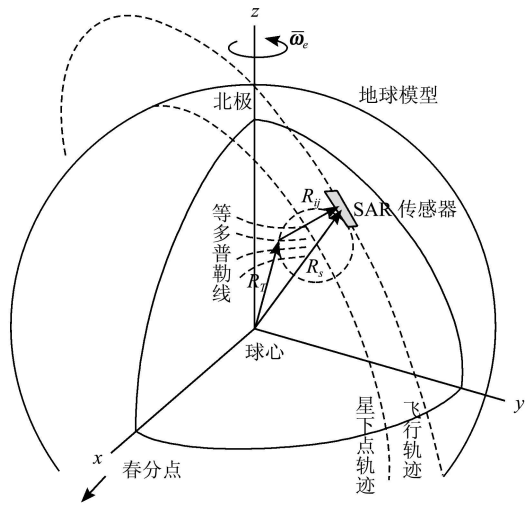


图 2 惯性坐标系下卫星和目标点的位置关系图  
Fig 2 Earth model with GEI coordinate system and spacecraft and target position vectors

该坐标系为惯性坐标系。在惯性坐标系中,以地球中心为坐标原点, x 轴指向春分点的方向, z 轴指向地球极轴方向, y 轴与 x z 轴成右手螺旋关系。在该坐标系下,地面上任一目标点  $R_T$  满足地球模型方程:

$$\frac{x_i^2 + y_i^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z_i^2}{R_p^2} = 1 \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} h &= h(x_T, y_T, z_T) \\ R_p &= (1 - f)(R_e + h) \end{aligned} \quad (2)$$

$h$ 为该点的地面高程值,  $R_e$ 为地球半径,  $f$ 为平坦度因子。同时,目标点  $R_T$ 随地球的自转而转动,其速度为:

$$V_T = \omega_e \times R_T \quad (3)$$

卫星的位置  $R_s = (x_s, y_s, z_s)$ 和速度  $V_s$ 是卫星飞行时间的函数,可以通过卫星提供的轨道数据得到。它与目标点的斜距之间的关系为:

$$R_{ij}^2 = (R_T - R_s) \cdot (R_T - R_s) \quad (4)$$

天线波束通过该目标点时的多普勒频移为  $f_d$ ,它与卫星的位置、目标点的位置之间的关系可以表示为:

$$f_d = -\frac{2}{\lambda R} (R_T - R_s) \cdot (V_T - V_s) \quad (5)$$

只要给定 SAR 图像上每个像素的斜距  $R_{ij}$ 和多普勒中心频率  $f_d$ ,联立求解方程 (1), (4), (5),即可求得每个像素对应的位置  $R_T$ 。

### 3 影响定位精度的因素

星载 SAR 成像比机载 SAR 成像的过程复杂一些。由于卫星处于近圆轨道,在不同位置卫星与地球之间的距离是不同的,而且 SAR 成像是侧视雷达成像,如果再考虑到地形起伏因素,影响 SAR 点目标定位精度的误差源是多方位的。

根据 SAR 图像的定位原理可知,定位精度主要受卫星测控系统中的卫星平台位置测量误差、速度测量误差、系统脉冲回波延迟测量误差以及地面高度测量误差的影响。各种误差对定位的影响各不相同,卫星的轨道测量误差包括沿轨道方向误差、径向轨道方向误差和跨轨误差。卫星沿轨方向上的测量误差主要引起方位上的定位误差、径向轨道上的测量误差对图像距离和方位上的定位精度,以距离向为主。其中,前两项误差构成轨道测量的主要误差来源,而跨轨位置测量误差正交于径向轨道测量误差,其影响很小。

系统脉冲回波延迟测量误差主要影响 SAR 图像像素对应的斜距精度。在数字采集系统中有 3 种直接影响斜距计算的延迟:相对于脉冲发射时间,回波采样窗的开始延迟时间;从脉冲发射到接收过程中的电子延迟;信号处理中距离压缩算法引起的数据采样时间延迟。其中,回波采样窗开始延迟误差为主要误差源,其他两种误差的影响较小。

为了将目标定位于地球表面,通常采用旋转椭球体数学地球模型来代替真正的地球体。不同的旋

转椭球体,椭球参数各不相同,观测带内的实际目标高度也不一样。由于 SAR 图像的信息反映的是地物的后向散射强度,因此,地形起伏是影响 SAR 图像质量和位置精度的主要误差源之一。

在斜距多普勒定位算法中,卫星平台的速度是输入参数之一,该参数的测量精度主要引起方位向的定位误差。由于卫星平台速度的测量精度一般较高,因此,该误差源对定位精度的影响较小。

除以上因素外,多普勒中心频率也是定位计算过程中分析的主要参数。多普勒中心频率与卫星轨道,雷达视角,天线指向,地球自转等因素有关。随着卫星运行在轨道的不同位置,多普勒中心频率的值不同。在不同的斜距上,多普勒中心频率也有所不同。一般情况下,多普勒中心频率的估计值和真实值之间存在着一定的偏差,带有偏差的多普勒中心频率带入成像处理中的方位参考函数,就会引起 SAR 图像中像素在方位向的偏移。如果在目标定位时采用的多普勒中心频率与成像处理中采用的多普勒中心频率的值相同,则可以补偿方位向的偏移量,使得最后的目标定位精度不受影响。目前,多普勒参数可以通过杂波锁定和自聚焦技术获得,这种技术可以极大的提高多普勒参数的估计精度。因此,多普勒中心频率误差对定位精度的影响很小。

### 4 点目标定位精度仿真分析

SAR 图像的定位精度是表征星载 SAR 空间性能指标,是 SAR 图像应用最重要的参考值之一。为了对目标的定位有更明确的认识,本文首先通过理想点目标信号的斜距多普勒定位来验证该算法的处理效果,评估该算法的定位精度,然后对影响各点目标定位精度的因素进行了详细的仿真分析。

#### 4.1 定位算法的精度验证

根据 SAR 卫星的轨道设计参数和雷达参数,建立 SAR 回波点阵信号。该信号数据量为  $16384 \times 16384$ ,像素间隔为  $3m$ ,对应地面测绘带宽度为  $50km \times 50km$ ,在数据的起始位置,中点位置,终止位置的近距,中距,远距各生成一个点目标,总共为 9 个仿真点目标。每个点目标都有完整的信号多普勒历程。

由于该点目标仿真信号是按理想椭球表面生成的,因此,在不存在任何误差的情况下,每个点目标经斜距多普勒定位后的地理位置应该与设计值完全相同。仿真验证的结果如表 1 所示。

表 1 点目标定位结果  
Table 1 The result of dot location

| 点目标   | 方位<br>像素号 | 距离<br>像素号 | 理想纬度 /( $^{\circ}$ ) | 理想经度 /( $^{\circ}$ ) | 成像后方位<br>像素号 | 成像后距离<br>像素号 | 像素定位<br>纬度 /( $^{\circ}$ ) | 像素定位<br>经度 /( $^{\circ}$ ) | 误差 /m    |
|-------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|--------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------|
| 1     | 3193      | 2193      | 0 376921             | 111 955167           | 3195         | 2227         | 0 376987                   | 111 955162                 | 7 380430 |
| 2     | 3193      | 8193      | 0 403831             | 112 148296           | 3194         | 8205         | 0 403864                   | 112 148293                 | 3 684371 |
| 3     | 3193      | 14193     | 0 429957             | 112 335838           | 3192         | 14183        | 0 429922                   | 112 335832                 | 3 863905 |
| 4     | 8193      | 2193      | 0 541903             | 111 932340           | 8194         | 2215         | 0 541936                   | 111 932338                 | 3 698061 |
| 5     | 8193      | 8193      | 0 568773             | 112 125480           | 8193         | 8193         | 0 568773                   | 112 125480                 | 0 000000 |
| 6     | 8193      | 14193     | 0 594858             | 112 313032           | 8192         | 14171        | 0 594823                   | 112 313025                 | 3 893582 |
| 7     | 13193     | 2193      | 0 706888             | 111 909546           | 13194        | 2203         | 0 706921                   | 111 909540                 | 3 687824 |
| 8     | 13193     | 8193      | 0 733718             | 112 102698           | 13193        | 8181         | 0 733717                   | 112 102694                 | 0 481884 |
| 9     | 13193     | 14193     | 0 759762             | 112 290263           | 13192        | 14160        | 0 759732                   | 112 290283                 | 4 069126 |
| 均方根误差 |           |           |                      |                      |              |              |                            |                            | 3 8338   |

注:距离向像素号偏移较大是因为成像算法的算法误差引起的,在定位时通过修订因子修正。

从表 1 中的结果可以看出:在没有任何系统误差和地形误差的情况下,对  $50\text{km} \times 50\text{km}$  的地面测绘范围,斜距多普勒定位方法定位误差在二个像素内(6m)。可见,定位算法本身对图像的的定位精度影响不大,可以忽略不计。

#### 4.2 点目标定位精度的仿真分析

根据 4.1 中的仿真结果,选取误差比较大的第一个点作为分析点目标(赤道附近),在定位算法中分别加入卫星轨道测量误差,脉冲回波延时测量误差,地形起伏误差,卫星平台速度测量误差,分析各测量误差对定位精度的影响。

仿真的结果如图 3—图 6。图 3 描述的是轨道测量误差对定位偏差的变化曲线,图 4 描述的是回波延时误差对定位偏差的变化曲线,图 5 描述的是地形起伏变化引起定位偏差的变化曲线,图 6 描述的是卫星速度变化导致的定位偏差的变化曲线。

对图 3—图 6 的统计结果如表 2,表中各测量误差参数选取是依据目前卫星能够达到的普遍精度确定的。可见,在沿轨道测量误差 500m,径向轨道测量误差 100m,地形起伏 500m,脉冲回波延时测量误差  $0.5\mu\text{s}$  卫星速度测量误差  $20\text{m/s}$  的情况下,目标点的定位误差约为 400m 左右。

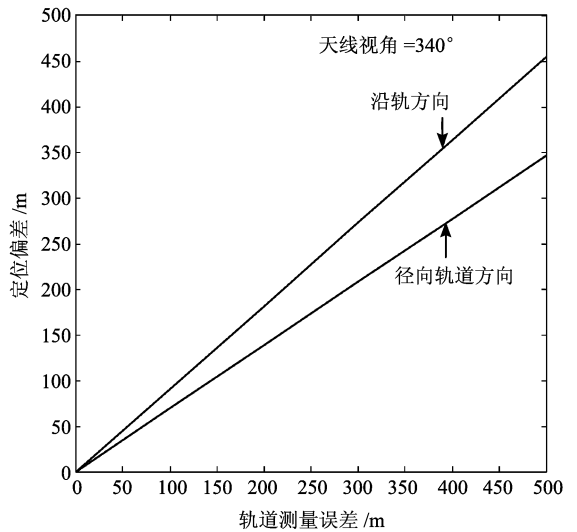


图 3 轨道测量误差对定位的影响

Fig 3 The location error owing to mensurable orbit data error

表 2 各种误差源影响定位精度统计结果

Table 2 The result of location precision of various errors

| 测量误差源           | 误差值              | 定位误差   |
|-----------------|------------------|--------|
| 沿轨道测量误差 /m      | 500              | 450    |
| 径向轨道测量误差 /m     | 100              | 66     |
| 地形起伏 /m         | 500              | 640    |
| 脉冲回波延时测量误差      | $0.5\mu\text{s}$ | 125m   |
| 卫星速度测量误差 /(m/s) | 20               | 0      |
| 均方差 /m          |                  | 397.52 |

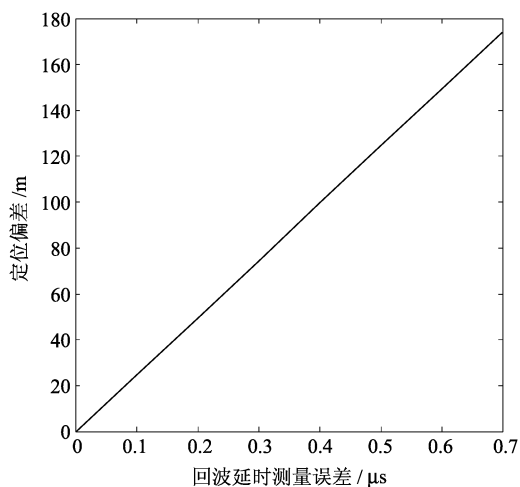


图 4 回波延时测量误差对定位的影响

Fig 4 The location error owing to echo pulse delay

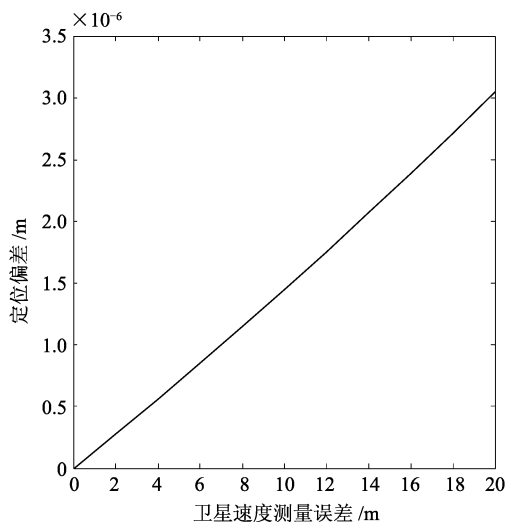


图 6 卫星速度变化对定位的影响

Fig 6 The location error owing to spacecraft velocity error

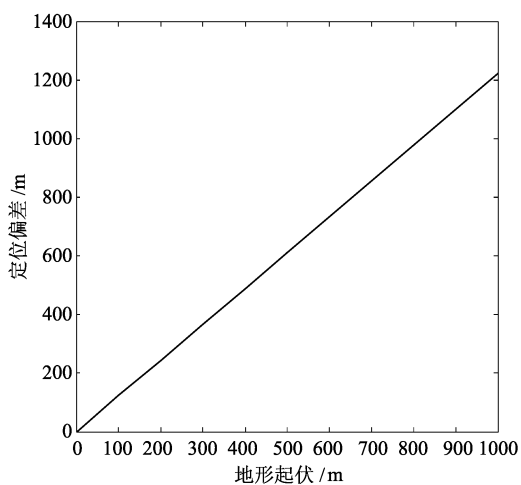


图 5 地形起伏变化对定位的影响

Fig 5 The location error owing to terrain variation



图 7 北京地区的 SAR 斜距图像 (Radarsat)

Fig 7 The single look complex image of Beijing

## 5 Radarsat 的图像定位示例

以上我们采用的是理想点目标图像对定位问题的论证。为了进一步证实定位算法的可行性,我们采取一幅含有 GCP 点的 Radarsat 卫星斜距图像(图 7),该图像对应的地理区域为北京地区,经斜距多普勒像素定位和高斯投影后,形成地理编码图像<sup>[2,5,7,8]</sup>。从编码后的图像中读取特征点的地理信息,与 GCP 点的地理位置比较,验证定位的算法和精度。地理编码后的图像如图 8。

在图 8 所示的地理编码 SAR 图像上,选取 14 个特征点,采用传统的姿态参数定位和采用斜距多

普勒定位算法进行定位的结果与 GCP 点的比较结果如图 9。

从统计结果可以看出,对 Radarsat 的图像,采用姿态参数进行定位可以达到 1200—1400m 的定位精度,采用斜距多普勒的定位算法可以达到平均 600—800m 左右的定位精度。

在算法中使用的轨道数据是该原始回波数据辅助参数中的值,精度只有 1km 左右。并且没有明确轨道测量方向(沿轨道、跨轨或径向)。图 9 的统计结果与仿真得到定位精度随轨道测量误差变化的结果相符合。由于无法获得该图像对应的 Radarsat 卫星本身的系统测量精度和精轨数据,因而无法进一

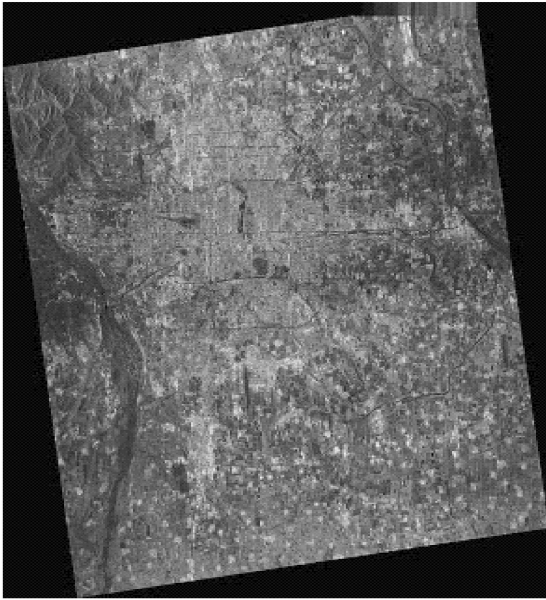


图 8 地理编码后的 SAR 图像

Fig 8 The geocoding SAR image of Beijing

步分析轨道测量误差、脉冲回波延时测量误差对定位精度的影响。同时,由于没有详细的北京地区针对 WGS84 地球模型的高程数据,因而也无法验证地形起伏对该图像定位精度的影响。但对该图像的定位结果表明,在提高轨道数据测量精度、系统测量精度、地形起伏测量精度的前提下,斜距多普勒定位算法可以满足地面系统对 SAR 图像的定位要求。

## 6 结 论

从以上的分析可以看出: SAR 图像的斜距多普勒定位算法适合在星载 SAR 地面数据处理系统中用于 SAR 图像的定位。其定位精度主要取决于系统的各种参数测量精度以及地形起伏的影响。在目前各种系统测量技术日趋完善和进步的情况下,该算法得到的定位精度可进一步提高,而对定位精度的分析也将更加细致和深入。

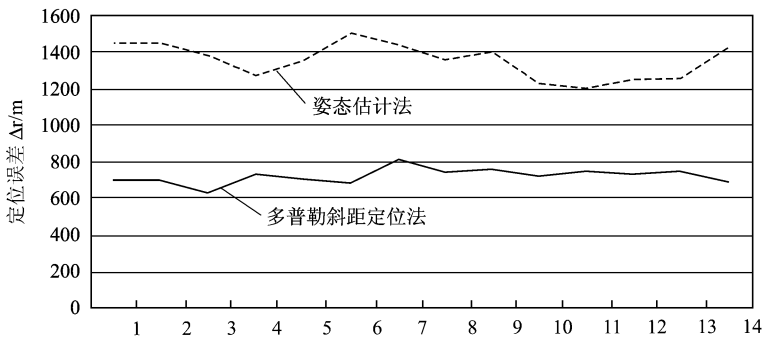


图 9 特征点统计分析的结果

Fig 9 The location precision statistics with GCP

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Curlander J C. Location of Spaceborne SAR Imagery[ J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1982, GE-20(3): 359—364.
- [ 2 ] John C. Curlander, Ronald Kwok, Shirley S. Pang. A Post-processing System for Automated Rectification and Registration of Spaceborne SAR Imagery[ J]. Int. J. Remote Sensing, 1987, 8(4): 621—638.
- [ 3 ] Roth A., Schreier G. The D-PAF ERS-1 Geocoding System[ J]. Int. J. Remote Sensing, 1992, 13(9): 1619—1625.
- [ 4 ] Roth A., Craubner H., Bayer Th. Prototype SAR Geocoding Algorithms for ERS-1 and SIR-C/X-SAR Image[ A ]. IGASS'93 [ C ], 1993.
- [ 5 ] Schreier G., Kosmann D., Roth A. Design Aspects and Implementation of a System for Geocoding Satellite SAR Image[ J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1990, 45: 1—16.
- [ 6 ] Dowman I. The Geometry of SAR Images for Geocoding and Stereo Applications[ J]. Int. J. Remote Sensing, 1992, 13(9): 1609—1617.
- [ 7 ] Daniel E. Friedmann. Two-dimensional Resampling of Line Scan Imagery by One-dimensional Processing[ J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1981, 47(10): 1459—1467.
- [ 8 ] Maisel J. E. Rotation of a Two-dimensional Sampling Set Using One-dimensional Resampling[ J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech and Signal processing, 1981, 29(6): 1218—1222.