

一种新的机载 SAR 图像几何校正和定位算法

孙文峰^{1,2}, 陈 安¹, 邓海涛¹, 俞根苗¹

(1. 中国电子科技集团公司第 38 研究所, 安徽合肥 230031; 2. 武汉雷达学院, 湖北武汉 430019)

摘要: 机载合成孔径雷达常采用时域子孔径成像, 所得到的图像是地面散射单元到成像平面的一种空变映射. 通过联立求解等距离方程和等多普勒方程得到了这种映射的解析表达式, 提出了一种新的图像无参考点几何校正和像素点定位的距离—多普勒算法, 并用点阵仿真和外场试验验证了算法的有效性.

关键词: 机载合成孔径雷达; 子孔径; 几何校正; 目标定位

中图分类号: TN9571.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0553-04

A Novel Geometric Calibration and Target Location Algorithm for Airborne SAR Image

SUN Wenfeng^{1,2}, CHEN An¹, DENG Haitao¹, YU Genmiao^{1,3}

(1. China Electronic Technology Group Corporation No. 38 Research Institute, Hefei, Anhui 230031, China;

2. Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: Synthetic aperture imaging algorithm is often used in airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) in practice, the true position of every pixel in the image lie on the geometric relationship between radar and scatter cell, A new geometric calibration and target location algorithm is proposed, which obtains coordinates of each pixel in SAR image by means of solution of range equation and Doppler equation. The validity of the algorithm is validated by simulated scatter cell array and location experiment.

Key words: airborne SAR; synthetic aperture; geometric calibration; target location

1 引言

图像实时无参考点定位是 SAR 用于飞行器导航、火控等领域的一项关键技术. 机载 SAR 为了减小对载机飞行姿态稳定性的依赖和提高算法的实时性, 常采用时域子孔径成像. 时域子孔径成像实际上是一种聚束成像模式, 得到的图像与条带 SAR 图像的差异体现在: 首先, 时域子孔径图像边缘是不完全孔径聚焦的结果, 其图像质量比条带 SAR 图像略差; 其次, 条带 SAR 图像在方位方向对应的是方位时延(可转化为方位距离), 时域子孔径 SAR 图像则是多普勒频率; 第三, 条带 SAR 图像的几何形变是由斜地变换产生的, 而时域子孔径 SAR 图像除了斜地变换外, 还在方位上存在与散射点位置有关的几何畸变. 斜视角越大的位置, 畸变程度越大. 这种几何畸变将严重制约 SAR 图像的拼接、匹配、特征提取等应用, 必须对其进行校正.

时域子孔径 SAR 图像几何校正的关键是找到地面散射单元到成像平面映射的解析表达式, 实际上就是要对每个像素点进行无参考点定位. 众所周知, 星载 SAR

图像的无参考点定位需要联立解距离方程、多普勒方程和地球模型方程^[1], 而且需要星历表数据, 限制了其在机载 SAR 图像定位中的应用. 文献[2]虽然运用的是距离方程和多普勒方程联合定位, 但只能用于地面单一散射点的定位, 不具备实际应用价值. 本文提出的机载 SAR 图像定位算法忽略地球曲率的影响, 定位所需的载机速度和多普勒频率可以从实测数据中提取, 一次性完成几何校正和定位, 运算量小, 因此具有广泛的适用性.

2 几何校正和定位原理

2.1 距离—多普勒定位方程

机载 SAR 成像几何关系如图 1. 以子孔径中心点在地面的投影点为原点 O, 以载机速度方向为 Y 轴, 建立地面直角坐标系 XOY. 地面上任意一个散射点 P(x, y) 到子孔径中心点的斜距 r 为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \quad (1)$$

其中, h 为载机高度. 这就是用于定位的等距离方程.

若令 H 为 P 点到子孔径中心连线与载机航线的夹角, P 点回波的多普勒频率为 f_a , 雷达发射信号的波长

为 K 载机速度为 v , 则有

$$\cos H = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2}} \quad (2)$$

这就是用于定位的等多普勒方程, 它表示一条双曲线. 将等距离方程和等多普勒方程画在一个图中, 得到机载 SAR 子孔径图像定位原理图如图 2. 结合式(1)、(2)可解出 P 点坐标

$$\begin{cases} x = ? \sqrt{1 - \left(\frac{K_a}{2v}\right)^2} \# r^2 - h^2 \\ y = \frac{K_a r}{2v} \end{cases} \quad (3)$$

这就是用于机载 SAR 图像无参考点定位的距离) 多普勒方程. x 坐标的符号由天线指向和 X 坐标轴的指向共同确定, 二者方向相同时取正.

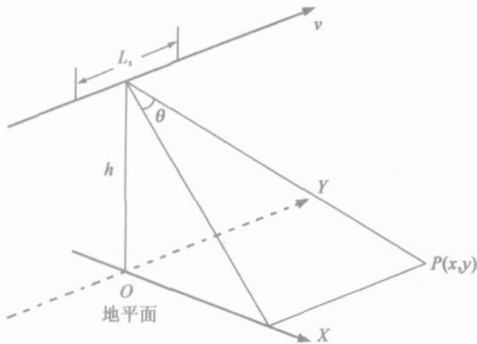


图 1 机载 SAR 成像几何关系图

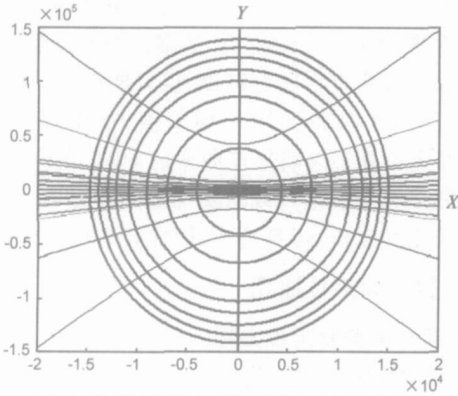


图 2 机载 SAR 子孔径图像定位原理图

在距离) 多普勒方程的四个输入参数中, v 由载机携带的惯性导航系统 (INS) 得到 (当载机没有携带 INS 时, 可从实测数据估计的多普勒中心频率和多普勒调频率联合解出^[3]), h 从载机的高度表读出 (否则机载 SAR 必须增加测高模式), f_a 是聚束成像时的输出参数, 斜距 r 可用下述脉冲时延法估计得到.

上述距离) 多普勒定位方法用于几何校正和定位有三个特点: 首先, 对正侧视和斜视均适用, 不需要在成像区域事先设定位置已知的参考点, 适用面广; 第二, 一次完成几何校正和定位两项功能, 所用的输入参

数只有斜距 r 、载机高度 h 、载机速度 v 和方位多普勒频率 f_a 四个, 输入参数少, 计算量很小; 第三, 当机载速度可由 INS 精确得到时, 成像过程中的多普勒频率估计误差不会影响定位精度.

2.1.2 斜距测量原理

斜距测量可分两步进行: 首先根据脉冲时延法测量距离向起始数据点对应的斜距 r_s . 脉冲之间的延迟关系如图 3. 其中, M_s 为发射脉冲与地面回波脉冲到达时刻之间经过的脉冲重复周期数 (可由系统设计参数获得机载条件下一般等于 0), S_s 为取样触发脉冲前沿与前一个相邻发射脉冲前沿之间的附加时延. 则有

$$r_s = \frac{C}{2} (M_s \# T_p + S_s - S_s) + N_s \# D \quad (4)$$

其中, N_s 为距离向数字处理时跳过的数据点数, D 为采样率决定的相邻距离单元间距, S_s 为雷达系统时延.

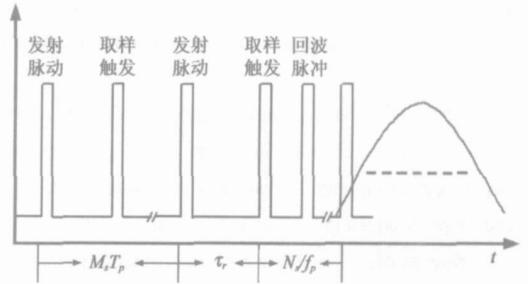


图 3 脉冲之间的延迟关系示意图

每个回波脉冲都可以按上述方法测得一个起始斜距, 为了减少附加时延和系统时延测量误差, 以及雷达脉冲重复频率不稳定等随机因素的影响, 可以将子孔径时间内测得的 N_0 个起始斜距取平均:

$$r_s = \frac{1}{N_0} \sum_{m=N_0/2}^{N_0/2-1} r_s(n) \quad (5)$$

然后根据每个像素点相对于距离向起始像素点的位置推算第 (m, n) 个像素点对应的斜距

$$\hat{r}(m, n) = r_s + (m + M/2) \# D - M/2 \quad [m < M/2, -N/2 \leq n < N/2] \quad (6)$$

M 和 N 分别为距离和方位向的数据点数. 必须说明的是, 以上公式没有考虑场景中的地形起伏.

2.1.3 载机坐标系到地理坐标系的转换

如果载机携带 GPS, 还可以很容易地将相对坐标转化为经纬度坐标. 如果 GPS 的数据率小于脉冲重复频率, 必须采用平滑估计的方法得到子孔径的起始点经纬度 (b_1, a_1) 和终止点经纬度 (b_2, a_2) . 坐标转换的过程分为坐标轴旋转和经纬度转换两个步骤. 令 $k = (b_2 - b_1) / (a_2 - a_1)$, 坐标轴旋转的角度为 A

$$A = \begin{cases} \arctg(k), & a_2 > a_1 \\ P + \arctg(k), & a_2 < a_1, b_2 > b_1 \\ -P + \arctg(k), & a_2 < a_1, b_2 < b_1 \end{cases} \quad (7)$$

令 $P(x, y)$ 相对于子孔径中心点的经纬度增量(弧度)为 $(\Delta b, \Delta a)$, 将地球近似为球体, 不难推出

$$\begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta a \end{bmatrix} = \frac{1}{R_0} \# \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \# \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, R_0 为地球半径. 易知 P 点的经纬度 (b_p, a_p) 为

$$\begin{bmatrix} b_p \\ a_p \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} b_1 + b_2 \\ a_1 + a_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{R_0} \# \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{bmatrix} \# \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 几何校正和定位算法

几何校正和定位算法步骤:

第一步: 由式(3)计算每个像素点在子孔径坐标系中的坐标 $(x(m, n), y(m, n))$;

第二步: 由式(9)计算每个像素点的经纬度 $(b(m, n), a(m, n))$. 所需的坐标系旋转角 A 在得到 GPS 给出的载机平台位置后由式(7)计算;

第三步: 图像由非均匀到均匀的重采样. 从图 2 可以看出, 虽然原始图像在斜距和多普勒频率二维成像平面内是一个等间隔采样的矩形区域, 但按式(3)映射到地平面之后, 像素点间隔将不再是均匀的, 也不在一个矩形区域内. 重采样时首先必须选取一个图像显示的矩形区域, 即经度区间 $[b_{\min}, b_{\max}]$ 和纬度区间 $[a_{\min}, a_{\max}]$, 并按系统要求选取一个合适的重采样间隔 Q 将显示区域分割成经度和纬度等间隔的网格 $(b(i, j), a(i, j))$

$$\begin{cases} b(i, j) = b_{\min} + (i - 1) \# Q \\ a(i, j) = a_{\min} + (j - 1) \# Q \end{cases} \quad (10)$$

然后由网格中的经纬度 $(b(i, j), a(i, j))$ 反推子孔径坐标系中的坐标

$$\begin{bmatrix} x(i, j) \\ y(i, j) \end{bmatrix} = R_0 \begin{bmatrix} \cos A & \sin A \\ \sin A & \cos A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b(i, j) \\ a(i, j) \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} b_1 + b_2 \\ a_1 + a_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

再用式(3)反推网格中每个像素点对应的斜距和多普勒频率

$$\begin{cases} r(i, j) = \sqrt{x^2(i, j) + y^2(i, j) + h^2} \\ f_a(i, j) = \frac{2v \# y(i, j)}{K \# r(i, j)} \end{cases} \quad (12)$$

最后, 在原始图像中选取斜距和多普勒频率最接近 $r(i, j)$ 和 $f_a(i, j)$ 的像素点的灰度值作为 $(b(i, j), a(i, j))$ 的灰度值直接赋值, 这样重采样就完成了. 经验证, 上述重采样方法计算量小, 并有效地避免了样条插值可能带来的斑纹.

4 几何校正和定位试验

4.1 点阵仿真实验

用 Ku 波段机载 SAR 进行点阵模拟实验, 取载机高

度为 4200m, 载机速度为 110m/s, 发射信号带宽为 80MHz, 波束擦地角为 45° , 脉冲重复频率为 2KHz, 脉冲宽度为 6 μ s, 在地面上选取一个间隔为 40m 的 9 @ 9 点阵. 图 4~ 5 分别给出了实际成像结果和几何校正结果的对照. 表 1 给出了实际地理坐标和从成像参数计算所得坐标的对照.

从图 4、图 5 及表 1 可以看出: 在地面上等间隔分布的矩形点阵, 在正侧视 SAR 子孔径图像中也会出现几何形变, 表现为距离近的点方位间距比距离远的点大; 在斜视情况下, 除了这一形变之外, 点阵还会出现倾斜. 无论是正侧视还是斜视, 经过几何校正后, 点阵均能恢复成矩形, 而且校正后的点阵坐标与真实坐标的误差不超过一个像素间隔. 这种误差是由于点目标回波能量在脉压过程中发生扩散导致的, 并不是定位公式本身存在误差.

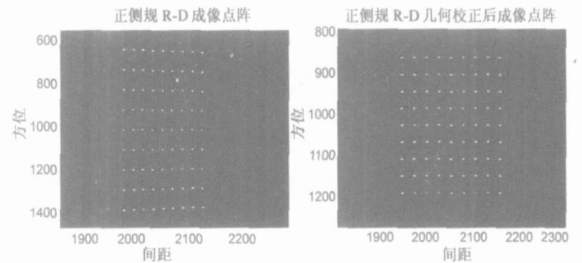


图 4 正侧视条件下的点阵成像和几何校正结果

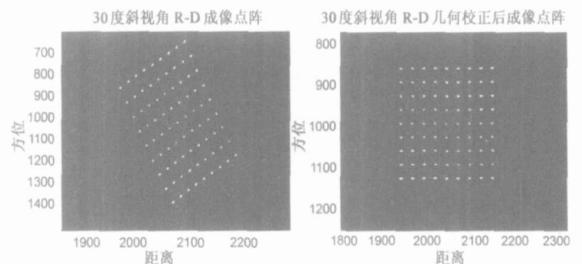


图 5 前斜视 30 条件下的点阵成像和几何校正结果

表 1 成像点阵的坐标转换结果对照

真实坐标	原始图像坐标		校正后图像坐标	
	正侧视	斜视角 30b	正侧视	斜视角 30b
(2160.0, 2160.0)	(919.0, 358.0)	(919.0, 413.0)	(2160.5, 2159.6)	(2160.5, 2159.07)
(2160.0, 160.0)	(919.0, 0.670.0)	(919.0, 0.616.0)	(2160.5, 159.6)	(2160.5, 160.65)
(160.0, 2160.0)	(1133.0, 358.0)	(1133.0, 413.0)	(160.5, 2159.6)	(160.5, 2159.07)
(160.0, 160.0)	(1133.0, 0.670.0)	(1133.0, 0.616.0)	(160.5, 159.6)	(160.5, 160.65)

4.1.2 外场试验

利用 ku 波段机载 SAR、差分 GPS、角反射器等试验设备进行了几何校正和定位试验. 在地面不同位置共放置了 7 个角反射器, 角反射器放置点的区域在距离向的跨度大约 2km, 在方位向的跨度为 1km. 几何校正结果见图 6. 从中可以看出: 几何校正前图像具有明显的几何形变, 比较明显的特征就是机场跑道和道路的弯曲现象, 经过几何校正后得到了很好的处理. 根据角反

射器定标点的位置参数、雷达和飞机的相关参数,得到的初步试验结果为:各角反射器定标点之间距离的平均相对误差小于 0.12%,距离向定位平均随机误差小于 3m,方位向定位平均误差小于 15m.由于试验中存在诸多误差因素,试验结果不算理想,但可以说明本文提出的几何校正和定位方法是正确的.

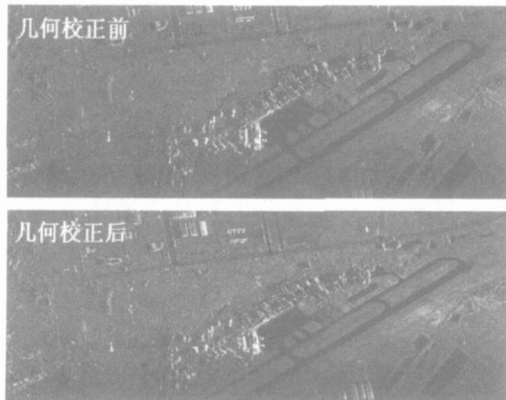


图 6 实测数据的成像和几何校正结果

5 讨论

本文提出了一种用于机载 SAR 子孔径图像几何校正和实时无参考点定位的距离)多普勒方法,该方法通过联合解等距离方程和等多普勒方程,得到图像中每个像素点的地理坐标,通过重采样完成几何校正.模拟点阵和外场试验证明,该方法简单有效,能够校正除地形起伏以外的几何形变,同时实现像素点的精确定位.但是,该方法无法解决成像场景地形起伏引入的定位误差,对机下点与成像场景之间的高程差引入的定

位误差也没有提出解决办法,这些问题有待进一步研究.

参考文献:

- [1] Curlander J C. Location of pixels in spaceborne SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1982, 20(3): 359- 364.
- [2] 高祥武, 黄广民, 杨汝良. 机载 SAR 目标快速定位方法和定位精度分析[J]. 现代雷达, 2004, 26(9): 4- 7.
GAO Xiangwu, HUANG Guangmin, YANG Ruliang. Study on a fast target location method for airborne SAR and location precision analysis[J]. Modern Radar, 2004, 26(9): 4- 7. (in Chinese)
- [3] 邢孟道. 基于实测数据的雷达成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2002.
XING Mengdao. Study of radar imaging methods based on real data[D]. Xi'an: Xidian University, 2002. (in Chinese)

作者简介:

孙文峰 男, 1970 年生于湖南汉寿, 1998 年获国防科技大学博士学位, 武汉雷达学院副教授, 中电科技集团第 38 研究所站博士后. 主要研究领域: 雷达信号处理、雷达成像与目标识别等.

E-mail: wfsun_cn@163.com

陈安 男, 1979 年生于安徽宣州, 2004 年获南京理工大学硕士学位, 中电科技集团第 38 所助理工程师. 主要研究领域: SAR 成像处理.

邓海涛 男, 1978 年生于湖北荆门, 2001 年毕业于中国地质大学, 中电科技集团第 38 所助理工程师. 主要研究领域: SAR 成像处理.

俞根苗 男, 1964 年生于安徽贵池, 2006 年获西安电子科技大学博士学位, 中电科技集团第 38 所高级工程师. 主要研究领域: SAR、雷达信号处理.