

文章编号: 1007-4619(2006)01-0066-05

SAR 影像的几何精纠正

王冬红¹, 王 番¹, 周 华², 刘 智¹

(1. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052; 2. 中国人民解放军 61512 部队, 北京 100088)

摘 要: SAR 影像几何纠正中的一个重要问题是建立其构像模型。在阐述 F. Leberl 模型的基本原理和方法的基础上, 针对星载 SAR 成像处理过程中多普勒中心频率不为零的现象, 采用多项式拟和多普勒中心频率的方法, 修正零多普勒条件方程, 建立起既适合星载又适合机载 SAR 传感器的 F. Leberl 构像模型。机载和星载 SAR 影像的实验结果表明, 文中提出的改进算法能显著地提高 F. Leberl 模型对星载 SAR 影像的定位精度, 同时也适合于对机载 SAR 数据的处理, 并且解算过程稳定, 收敛很快, 精度较高。

关键词: SAR; F. Leberl 模型; 多普勒中心频率; 零多普勒条件; 距离条件

中图分类号: TP722.6/TP751.1 **文献标识码:** A

Precise Rectification of SAR Images

WANG Donghong¹, WANG Fan¹, ZHOU Hua², LIU Zhi¹

(1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;

2. The PLA 61512 Command, Beijing 100088, China)

Abstract: With the development of SAR (Synthetic Aperture Radar) remote sensing techniques, SAR images have been widely applied in a lot of fields. But because of its side-looking character, we have to rectify the images into orthoimages before we use them. Building mathematical models is an important step in SAR rectification. In this paper, we first recapitulate some mathematical models used for SAR image rectification, including Soviet Model, Polynomial Model and G. Konecny Model. The characteristics of these models are analyzed. Then we introduce the F. Leberl Model in detail, which is based on the distant condition and the zero-Doppler condition. In airborne condition, the range direction is perpendicular to the flight track, so the Doppler center frequency is zero. But in spaceborne condition, the Doppler center frequency does not always equal to zero, so the zero-Doppler condition needs to be corrected. In this article, we use a polynomial to substitute the value of the Doppler center. By this way, we corrected the zero-Doppler condition. In the experiments, we used both the original F. Leberl Model and the corrected model to validate the precision of our model. From the results, we come to the conclusion that the new model is acceptable to both the airborne SAR and the spaceborne SAR. At the same time, it can get higher precision than the original model in spaceborne condition.

Key words: SAR; F. Leberl model; doppler center frequency; zero doppler condition; distance condition

1 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种主动式微波遥感系统, 与光学传感器相比具

有全天时、全天候的优点, 并且对地物有一定的穿透能力。由于侧视成像的特点, 地形起伏会造成 SAR 影像几何畸变很大, 存在着透视收缩、迭掩、阴影等特有现象, 从而大大限制了其应用范围。如果需要从 SAR 影像提取空间位置信息, 或进行多时相、多

收稿日期: 2004-09-21; 修订日期: 2004-12-24

作者简介: 王冬红 (1977-), 女, 吉林长春人, 信息工程大学测绘学院在读博士研究生, 主要从事雷达图像处理、InSAR 滤波技术研究。

源信息的综合分析,必须对其进行高精度几何纠正。

SAR 影像几何纠正中的一个重要问题是建立构像模型。目前国际上常用的构像模型有多项式模型、前苏联采用的数学模型、G. Konecny 模型和 F. Leberl 模型等^[1,2]。多项式模型形式简单,但由于它是基于两个平面间的变换,没有考虑地形起伏的影响,故不适用于山区影像的几何纠正。前苏联模型形式复杂,实现很困难。G. Konecny 模型忽略了 SAR 影像距离投影的特点,用处理光学影像的模式处理 SAR 影像,形式上类似于画幅式像片的共线条件方程,只是一种近似处理,并且需要较为准确的模型参数初始值。

F. Leberl 模型是目前被广泛使用的 SAR 构像模型,它建立在 SAR 成像的零多普勒条件和距离条件上,较好地体现了 SAR 成像的物理条件。但是由于地球自转等因素的影响,星载 SAR 传感器的雷达波束与天线的速度矢量之间不存在严格的正交关系,波束中心的多普勒频率通常不为零,此时 F. Leberl 模型的零多普勒条件不满足。针对此现象,本文采用多项式拟和多普勒中心频率的方法,对原始的 F. Leberl 模型进行修正,以更真实地描述星载 SAR 传感器成像时的几何关系。ERS 卫星影像和机载 SAR 影像的实验结果表明,文中提出的改进方法可显著提高 F. Leberl 模型的定位精度,并且模型参数解算过程稳定,对星载、机载 SAR 影像具有普遍适用性。

2 F. Leberl 模型的基本原理^[3]

2.1 距离条件

如图 1, 设 R_s 为雷达天线中心 S 到地面点 P 的距离(斜距), D_{s_0} 为扫描延迟, H 为传感器到数据归化平面(基准面)的航高, R_0 为扫描延迟在数据归化面上的投影, (X, Y, Z) 为点 P 的物方空间坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为天线中心瞬时位置 S 的物方空间坐标, y_s 为地面点 P 在斜距显示影像上的距离向像坐标, y_g 为平距显示影像上的距离向像坐标, M_y 为斜距显示影像的距离向像元分辨率, m_y 为平距显示影像的距离向像元分辨率。

于是,根据图 1 的几何关系可知,斜距显示影像的距离条件为:

$$(X-X_s)^2 + (Y-Y_s)^2 + (Z-Z_s)^2 = (y_s M_y + D_{s_0})^2 \quad (1)$$

而对于平距显示影像,其距离条件为:

$$(X-X_s)^2 + (Y-Y_s)^2 + (Z-Z_s)^2 = (y_g m_y + R_0)^2 + H^2 \quad (2)$$

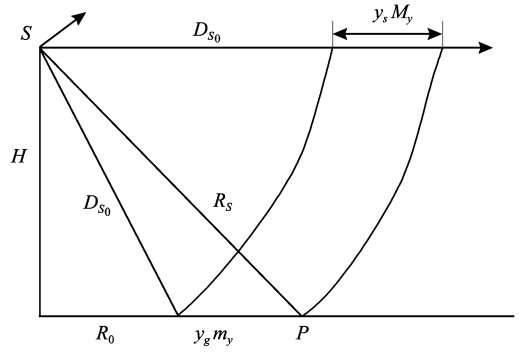


图 1 距离条件

Fig 1 Distance condition

由于飞行期间雷达天线中心 S 随轨迹而变化,因此可将 S 的空间坐标 (X_s, Y_s, Z_s) 表示成飞行时间 T 的多项式函数,即:

$$\begin{cases} X_s = X_{s_0} + \dot{X}_s \cdot T + \ddot{X}_s \cdot T^2 + \dots \\ Y_s = Y_{s_0} + \dot{Y}_s \cdot T + \ddot{Y}_s \cdot T^2 + \dots \\ Z_s = Z_{s_0} + \dot{Z}_s \cdot T + \ddot{Z}_s \cdot T^2 + \dots \\ T = K_x \cdot x_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, $(X_{s_0}, Y_{s_0}, Z_{s_0})$ 为像坐标原点对应的雷达天线中心 S 的瞬时物方空间坐标, $(\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s)$ 为外方位元素的一阶变率,即飞行器的速度矢量, $(\ddot{X}_s, \ddot{Y}_s, \ddot{Z}_s)$ 为外方位元素的二阶变率, x_s 为雷达影像的方位向像坐标, K_x 为影像方位向每行所用的扫描时间。如果传感器飞行较平稳,则可认为 (X_s, Y_s, Z_s) 随时间线性变化,于是:

$$\begin{cases} X_s = X_{s_0} + \dot{X}_s \cdot T \\ Y_s = Y_{s_0} + \dot{Y}_s \cdot T \\ Z_s = Z_{s_0} + \dot{Z}_s \cdot T \\ T = K_x \cdot x_s \end{cases} \quad (4)$$

2.2 零多普勒条件

在理想条件下,雷达影像的每一个点对应的扫描平面总是与雷达天线的速度矢量垂直,此时垂直于飞行方向上的射线的多普勒频移为零,用公式表示为:

$$\dot{X}_s(X-X_s) + \dot{Y}_s(Y-Y_s) + \dot{Z}_s(Z-Z_s) = 0 \quad (5)$$

在由式(1), (5)或式(2), (5)组成的构像方程式中,共有 $X_{s_0}, Y_{s_0}, Z_{s_0}, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s, D_{s_0} (R_0), K_x, M_y$ (或 m_y) 9 个定向参数。通常, $D_{s_0} (R_0), K_x, M_y$ 3 个参数可由 SAR 系统设计参数直接给定,此时定向参

数降至 6 个,至少需要 3 个地面控制点才能解算。

3 F. Leberl模型的改进

3.1 基本思路

零多普勒条件是 F. Leberl模型的基本关系式之一。在机载条件下,由于影像覆盖面积较小,地球自转的影响可忽略,认为雷达波束与传感器飞行矢量垂直,此时多普勒频率为零。但是,在星载条件下,由于地球自转等因素的影响,雷达波束与卫星的飞行方向不再保持严格的垂直关系,多普勒频率不再保持为零。对于星载 SAR 影像,其多普勒条件应严格表示为^[4]:

$$\begin{aligned} f_b &= -\frac{2}{\lambda R_s} \mathbf{R} \cdot \mathbf{v} \\ &= -\frac{2}{\lambda R_s} [\dot{X}_s(X-X_s) + \dot{Y}_s(Y-Y_s) + \dot{Z}_s(Z-Z_s)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中 f_b 为多普勒频率, λ 为雷达波长, \mathbf{R} 为雷达天线到地面点矢量, \mathbf{v} 为飞行器速度矢量。于是有:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} \cdot \mathbf{v} &= \dot{X}_s(X-X_s) + \dot{Y}_s(Y-Y_s) + \dot{Z}_s(Z-Z_s) \\ &= -\frac{\lambda R_s f_b}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)即为星载条件下的多普勒条件,其应用的关键问题是确定多普勒中心频率 f_b 。

3.2 多普勒中心频率 f_b 的确定

在 SAR 的成像处理中,多普勒中心频率和多普勒速率是通过杂波锁定和自聚集的技术得到的。杂波锁定是把 SAR 的方位线原始数据进行傅里叶变换成为方位功率谱,再对数条相邻方位线的功率谱进行平均以改善其信噪比。一般,经过平均后的功率谱具有类似于天线方位功率方向图的形状,该频谱的对称轴就是多普勒中心频率的估值^[4]。但通常要进行几何纠正的影像是经过成像处理得到的幅值影像,而非原始数据,这样要从影像上进行多普勒中心频率的估计是不可能的。如果进行几何纠正的数据是 CEOS (Committee On Earth Observations Satellites)数据格式,那么在头文件中将包含多普勒频率的改正参数,于是某一像点,其多普勒频率可以通过下式求得:

$$f_b = d_0 + d_1(t-t_0) + d_2(t-t_0)^2 + d_3(t-t_0)^3 \quad (8)$$

其中 d_0, d_1, d_2, d_3 及 t_0 的值由影像的头文件提供。 t_0 称为多普勒中心频率的参考时间, $t = 2 \cdot R_s / c$ (c

为光速),称为当前快时间。

我们也可以不利用 CEOS 数据头文件提供的改正参数,直接利用地面控制点近似求得多普勒频率 f_b 。由于 t 与 R_s 成正比,同时由图 1 知 $R_s = y_s M_y + D_{s_0}$, 而 D_{s_0}, M_y 对于同一幅影像为常数,因此 t 与 y_s 也成线性关系。因此 f_b 可以用 y_s 的多项式来表示,即:

$$-\frac{\lambda R_s f_b}{2} = (D_{s_0} + y_s M_y) \left[-\frac{\lambda}{2} \right] (a_0 + a_1 y_s + a_2 y_s^2 + \dots) \quad (9)$$

由于 λ 为常数,因此可以将其归入到系数 a_i ($i=0, 1, \dots$) 中,于是改进后的多普勒条件为:

$$\begin{aligned} \dot{X}_s(X-X_s) + \dot{Y}_s(Y-Y_s) + \dot{Z}_s(Z-Z_s) \\ = (D_{s_0} + y_s M_y) (a_0 + a_1 \cdot y_s + a_2 \cdot y_s^2 + \dots) \end{aligned} \quad (10)$$

(1)式和(10)式构成严格意义上的 F. Leberl 构像模型,其中包含 $X_{s_0}, Y_{s_0}, Z_{s_0}, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s, D_{s_0}, K_x, M_y$ (或 m_y) 9 个常规定向参数以及 a_0, a_1, a_2 等模型改正参数。在 SAR 的成像处理中,由于多普勒频率对 SAR 影像的信噪比和方位模糊性有重大影响,因此 SAR 影像对多普勒频率的准确性要求很高,经过成像处理的多普勒中心频率比较稳定,因而(10)式右侧的改正多项式一般仅保留 y_s 的一次项。如果 D_{s_0}, K_x, M_y 已知,则 F. Leberl 改进模型共包含了 $X_{s_0}, Y_{s_0}, Z_{s_0}, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s, a_0, a_1$ 共计 8 个定向参数,至少需要 4 个地面控制点才能进行平差计算。

3.3 基于 F. Leberl 改进模型的正射纠正

对于 SAR 图像的几何校正,宜采用间接法方案,即从正射影像的像点坐标出发,按 $x = G_x(X, Y), y = G_y(X, Y)$ 求出原始影像上的像点坐标 (x, y) ,然后将该点的灰度值赋给校正后的影像上 (X, Y) 处的像点,式中 G_x 和 G_y 为间接校正的坐标变换函数,这里即为 F. Leberl 改进模型。主要步骤如下:

(1)解算定向参数。对由(1)式和(10)式组成的构像模型进行线性化,利用 4 个以上的地面控制点计算出 F. Leberl 改进模型的 8 个定向参数。

(2)计算地面点坐标。设正射影像上任意一点(像素中心)P 的像点坐标为 (r, c) ,由正射影像左下角点坐标 (X_0, Y_0) 与正射影像像元分辨率 M ,可计算出 P 点对应的地面坐标 (X, Y) : $X = X_0 + M \cdot r, Y = Y_0 + M \cdot c$ 进而根据 X, Y 在 DEM 中内插出高程 Z 。

(3)计算像点坐标:由于改进模型不是像点坐标 (x_s, y_s) 的线性方程,因此计算地面点 $P(X, Y, Z)$ 的像点坐标需要进行迭代。迭代公式为:

$$x_s^{(i+1)} = \frac{\dot{X}_s(X-X_{S_0}) + \dot{Y}_s(Y-Y_{S_0}) + \dot{Z}_s(Z-Z_{S_0}) - (a_0 + a_1 y_s^{(i)})}{\dot{X}_s \cdot \dot{X}_s + \dot{Y}_s \cdot \dot{Y}_s + \dot{Z}_s \cdot \dot{Z}_s} \quad (11)$$

$$y_s^{(i+1)} = \frac{\sqrt{(X-X_{S_0} - \dot{X}_s \cdot x_s^{(i+1)})^2 + (Y-Y_{S_0} - \dot{Y}_s \cdot x_s^{(i+1)})^2 + (Z-Z_{S_0} - \dot{Z}_s \cdot x_s^{(i+1)})^2} - D_{S_0}}{M_y} \quad (12)$$

y_s 坐标的初始值取为 $y_s^{(0)} = 0$ 。

(4) 灰度内插: 由于所求得的像点坐标不一定正好落在像素中心, 为此必须进行灰度内插。考虑到计算速度及纠正效果, 本文采用双线性内插法求得像点灰度值 $g(x_s, y_s)$ 。

(5) 灰度映射: 将像点灰度值 $g(x_s, y_s)$ 赋给正射影像的像点 $P(x, y)$ 。

4 实验与结果分析

为了比较 F. Leberl 原始模型和改进模型的定

位能力, 本文采用了机载和星载的两组控制点数据进行了对比实验, 并对星载 SAR 影像进行了纠正。实验的精度统计采用数值计算的方法, 将控制点和检查点的地面坐标代入各种 F. Leberl 模型, 计算出像点坐标, 并与像点的实际量测坐标作比较, 统计出误差指标, 如表 1、表 2 所示。图 2 是 ERS 影像 (a) 和利用保留一次项的改进模型进行纠正得到的正射影像 (b)。原始影像采用斜距投影, 方位向分辨率为 20m, 距离向分辨率为 8m, 正射影像的地面分辨率为 20m。

表 1 机载 SAR 数据实验结果

Table 1 Results of airborne SAR data

单位: 像素

数学模型	控制点数	检查点数	方位向均方差		距离向均方差	
			控制点	检查点	控制点	检查点
原始 F. Leberl 模型	12	8	2.01	3.18	3.03	3.99
保留常数项的情况	12	8	1.99	3.18	3.02	3.95
保留一次项的情况	12	8	1.97	2.91	2.88	3.69

表 2 ERS 数据实验结果

Table 2 Results of ERS data

单位: 像素

数学模型	控制点数	检查点数	方位向均方差		距离向均方差	
			控制点	检查点	控制点	检查点
原始 F. Leberl 模型	13	7	3.28	3.53	4.73	5.33
保留常数项的情况	13	7	2.88	3.08	3.71	4.10
保留一次项的情况	13	7	1.28	1.73	2.41	2.49

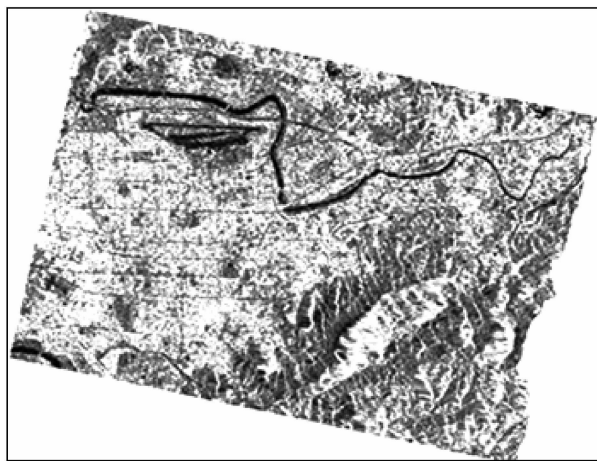
对比表 1、表 2 中的两组实验结果可以看出, 改进后的 F. Leberl 模型对机载 SAR 影像的定位精度与原始模型的精度相当, 但对于星载 SAR 影像, 其距离向和方位向的精度都有明显提高。这是因为, 机载 SAR 传感器雷达波束的扫描方向和飞机的飞行矢量基本保持垂直, a_0 和 a_1 都很小, 较好地满足了零多普勒条件, 因此原始 F. Leberl 模型足以保证其定位精度。但是, 对于星载的情况, 由于卫星平台姿态的稳定性以及地球自转等多种因素的影响, 零多普勒条件不再满足, 此时本文提出

的改进模型通过修正多普勒频率, 消除了多普勒频率不为零对解算的影响, 从而使整体精度有明显的提高。

图 2 显示的是 ERS 卫星影像 (经过裁剪) 及其纠正结果, 原始影像的上侧为平坦的市区, 其余为山地。由于地形起伏的影响, 山地区域的影像存在明显的透视收缩和叠掩现象, 在影像上表现为一些亮度较高的条带。在正射影像上, 山地地区的几何畸变得到了校正, 叠掩像点恢复到正常的位置, 产生了大片灰度相同的区域。



(a)



(b)

图 2 ERS原始影像 (a)与正射影像 (b)

Fig 2 Original image from ERS satellite (a) and its orthoimage (b)

5 结 论

本文主要对 SAR 影像纠正中的 F. Leberl 构像模型进行了全面研究, 通过对其零多普勒条件的深入分析, 认为在星载条件下由于地球自转等因素的影响, 零多普勒条件不再满足, F. Leberl 模型存在误差。针对星载 SAR 成像时多普勒中心频率不为零的现象, 本文采用了多项式拟和多普勒中心频率的方法, 修正了原始 F. Leberl 模型的零多普勒方程, 建立起 SAR 影像更为严格的 F. Leberl 模型。改进后的 F. Leberl 模型在机载情况下等价于原始 F. Leberl 模型, 星载条件下较原始模型更加严密。

本文采用了机载 SAR 影像和 ERS 卫星影像验证了 F. Leberl 改进模型的定位能力, 结果表明改进模型对机载 SAR 影像的定位精度影响不明显, 但却显著提高了星载 SAR 影像的定位精度, 这与我们的预期结果完全一致。同时, 改进模型的定向参数解算过程很稳定, 迭代收敛很快, 表明本文提出的

F. Leberl 改进算法可有效用于机载和星载 SAR 影像的几何纠正和定位。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zhu C Y, Xu Q, Wu C H, et al. Study on Mathematical Models for Airborne SAR Image Rectification [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(2): 112-117. [朱彩英, 徐青, 吴从晖等. 机载 SAR 影像几何纠正的数学模型研究 [J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 112-117.]
- [2] Lu J G, Li J P. The Research and Realization of Satellite SAR Image Ortho-Rectification Algorithm [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(4): 230-234. [吕京国, 李建平. 星载合成孔径雷达影像正射纠正算法的研究与实现 [J]. 遥感技术及应用, 2002, 17(4): 230-234.]
- [3] Xiao G C, Zhu C Y. Radar Photogrammetry [M]. Beijing: The Earthquake Publishing House, 2001. [肖国超, 朱彩英. 雷达摄影测量 [M]. 北京: 地震出版社, 2001.]
- [4] Yuan X K. Introduce to the Spaceborne Synthetic Aperture Radar [M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 2003. [袁孝康. 星载合成孔径雷达导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.]