

基于 RADARSAT-2 数据的 SAR 图像 双视向几何校正方法研究

万紫^{1,2}, 邵芸¹, 谢酬¹, 张凤丽¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对山区高分辨率雷达卫星 Radarsat-2 图像的严重几何变形, 提出了一种新的双视向雷达图像几何校正方法. 实验证明该方法可以有效祛除地形引起的各种几何变形, 防止地形引起的后向散射系数的失真, 特别是能够有效祛除叠掩和阴影的影响, 而这个问题是基于单幅雷达图像的传统几何校正方法无法解决的. 为合成孔径雷达 (SAR) 图像在山区的推广应用提供了重要手段.

关键词: 高分辨率 SAR; 几何校正; 地形纠正; 双视向补偿

中图分类号: TP79, S43 **文献标识码:** A

The dual-aspect geometric correction method based on DEM using Radarsat-2 data

WAN Zi^{1,2}, SHAO Yun¹, XIE Chou¹, ZHANG Feng - Li

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) images reveal serious geometric distortions that are caused by terrain undulations. This paper presents a newly developed method on SAR image geometric correction which is the dual-aspect geometric correction based on digital elevation model (DEM) to overcome the inherent shortages of SAR image such as foreshortening, shadow and layover and correct the distorted or lost backscatter coefficient values in mountainous area. The Radarsat-2 SAR images were used in this study. The results show that this method can effectively eliminate the effect of geometric distortions and compensate the lost or distorted backscatter coefficients, especially is useful for eliminating layover and shadow distortions in SAR images. This method solves the geometric correction problem that cannot be solved with single SAR image.

Key words: high-resolution SAR image; geometric correction; radiometric slope correction; dual-aspect compensation

PACS: 42.79.Qx

引言

合成孔径雷达 (SAR) 通过测距成像, 山区的 SAR 图像几何变形严重, 甚至造成信息缺失, 给 SAR 在山区的应用推广带来了很大困难^[1]. 针对山区高分辨率雷达卫星 Radarsat-2 图像的特点, 本文提出了一种新的双视向雷达图像几何校正方法. 利用雷达卫星上行轨道 (升轨) 与下行轨道 (降轨) 准同步获取山体东西两坡的数据, 实现对山体两坡的双视向成像. 研究基于数字高程模型 (DEM) 的双视向雷达图像几何精校正技术, 修正由于 SAR 侧视成

像造成的山区图像几何变形的的方法, 包括, 透视收缩、叠掩、顶底倒置; 研究由于坡度造成的后向散射系数变形修正方法; 解决山区 SAR 图像的信息丢失和变形问题. 实验证明该方法可以有效祛除地形引起的各种几何变形, 特别是能够有效祛除叠掩和阴影的影响, 而这个问题是传统的基于单幅雷达图像的几何校正方法无法解决的.

1 基本原理

针对地形引起的 SAR 影像几何变形, 首先必须通过精确的正射校正处理去除 SAR 影像固有的几

收稿日期: 2010-03-16, 修回日期: 2010-10-13

基金项目: 中国科学院重要方向性项目 (KZCX2-YW-Q10-2-2-1)

作者简介: 万紫 (1982-), 男, 博士研究生, 主要从事高分辨率雷达图像几何校正研究, E-mail: wanzi021@163.com.

Received date: 2010-03-16, revised date: 2010-10-13

何畸变,以生成一幅处于一定地图投影下的正射影像.地形引起的透视收缩现象会造成后向散射系数变化失真,这种误差在地形起伏严重的区域是不能忽视的,因此在正射校正之后有必要采取合适的地形纠正方法去除掉透视收缩现象造成的后向散射系数变化失真^[2].地形起伏所引起的叠掩和阴影现象是基于单幅雷达影像的常规方法所无法消除的,通常的做法是将雷达影像上发生叠掩和阴影的区域掩膜掉,但是这会带来雷达影像信息的丢失.文中提出的雷达影像双视向几何校正方法基于两幅升、降轨具有重叠区域的雷达影像,其基本原理为在对每幅影像做完正射校正和地形纠正后,基于地理坐标进行叠加,利用一副影像上的叠掩和阴影区域在另一幅影像上往往不是叠掩或阴影区域的特点,用另一幅影像上对应正常区域的像元值来补偿该幅影像上发生叠掩和阴影的区域.

1.1 SAR 影像正射校正

文中使用的雷达遥感数据源为 Radarsat-2,分辨率为 8m,这对雷达图像的正射校正提出了较高要求.对于 Radarsat-2 雷达数据正射校正可分为两个部分:(1)利用基于距离-多普勒(RD)定位模型的迭代定位法^[3]对 SAR 影像进行正射校正,使得原始 SAR 影像恢复到与地面位置趋于一致;(2)利用地面控制点采取多项式几何校正方法对粗校正的结果进行加密,最终完成 SAR 影像的整个正射校正过程.

1.1.2 基于 RD 定位模型的 SAR 图像正射校正

由于研究区地形起伏严重,很难获取高精度地面控制点,因此,本文首先利用 DEM 产生的模拟图像进行 SAR 图像正射校正,再将模拟 SAR 图像与原始 SAR 图像配准,从而建立 DEM 地面坐标与原始 SAR 影像坐标间的变换关系^[4].根据 Radarsat-2 数据技术文档,8 米分辨率的 Radarsat-2 图像正射校正后的结果影像应被采样到 3.13m,而 DEM 的分辨率为 25m,这就产生模拟影像欠采样问题,这时需要对 DEM 进行过采样处理.根据参考文献^[5],最终的 DEM 重采样率 f 由下式决定:

$$f \geq \left[\frac{\delta_{rg}}{\delta_r} \frac{\Delta S_{out}}{\sqrt{2}\Delta S_{dem}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

其中, δ_{rg} 为雷达影像的地距分辨单元, δ_r 为斜距分辨单元, $\delta_{rg}/\delta_r = 1/\sin\theta$, θ 为雷达影像入射角; ΔS_{dem} 为原始 DEM 像元大小, ΔS_{out} 为要输出的模拟影像的像元大小.

进行校正时,首先利用基于多普勒频率的迭代定位方法求出原始雷达图像上所有像点 (i, j)

所对应的地面坐标 (X, Y, Z) . 此时,相当于得到了与原始图像行列号一致的一幅空白图像,根据像点 (i, j) 与地面坐标 (X, Y, Z) 之间的关系,将 DEM 上对应地面坐标的高程值赋予到该空白图像上对应的像元处,生成斜距 DEM 图像.然后利用斜距 DEM 图像上每个像元周围临近像元的高程值,计算出局部入射角 θ 和地表单元表面积 A ,选取后向散射模型 $RCS = A \times \cos^2\theta$ 就可以计算出模拟 SAR 图像像元值了.

利用 DEM 和初始成像模型参数模拟出的 SAR 图像,与实际 SAR 图像之间只存在线性变形,复杂的、与高程有关的几何变形已经在模拟过程中得到完全描述,因此完全可以通过简单的多项式直接建立模拟 SAR 图像坐标和真实 SAR 图像坐标之间的几何关系.这里是用全自动匹配的方法寻找控制点从而建立描述模拟 SAR 和真实 SAR 之间几何关系的多项式的.由于模拟 SAR 图像坐标与地面目标空间直角坐标之间的关系已经由基于多普勒频率的迭代定位方法求得,因此此时就可以间接得到真实 SAR 图像坐标与地面目标空间直角坐标之间的关系了,从而完成正射校正.在生成模拟 SAR 图像的过程中,还可以根据叠掩和阴影产生的几何条件判断叠掩和阴影区域,生成叠掩阴影掩膜图像.

1.1.3 用控制点对粗校正结果进行加密

用基于 RD 定位模型的算法对 SAR 影像进行粗正射校正后, SAR 影像已经与地面位置趋于一致,但是由于 RD 定位算法主要是利用雷达影像自带的卫星轨道数据进行定位的,其定位精度受到所提供的卫星轨道数据精度的影响,因此有必要利用地面控制点采用低阶多项式法对粗校正的结果进行精校正.

1.2 地形纠正

地形所引起的雷达影像上的透视收缩现象会造成后向散射系数变化失真,这种误差在地形起伏严重的区域是不能忽视的,因此有必要采取合适的地形纠正方法去除掉透视收缩现象造成的后向散射系数变化失真.这里采用 Ulander 提出的一种地形纠正因子 $\cos\psi$ 来对单幅 Radarsat-2 正射校正结果图像进行地形纠正^[6].

$$\begin{aligned} \cos\psi &= \vec{n} \cdot (\vec{x} \times \vec{R}) \\ &= \sin\theta\cos u + \cos\theta\sin u \sin v \end{aligned}, \quad (2)$$

式(2)中, θ 为入射角(incidence angle); u 为坡度角; v 为坡向相对于飞行方向的方位角,其计算公式为

$$\sigma^0 = \beta^0 \cos\psi = \frac{\sigma^{0'}}{\sin\theta} \cos\psi \quad (3)$$

式(3)中, σ^0 是地形校正后的后向散射系数结果值; $\sigma^{0'}$ 是后向散射系数, 即要求在进行地形校正之前要对正射校正后的雷达幅度图像进行辐射定标处理, 将幅度值转换为后向散射系数值(0~1 之间); θ 为入射角; $\cos\psi$ 如式(2)所示.

$$v = 360 - a + b \quad (4)$$

式(4)中, a 为卫星的飞行方位角; b 为坡向.

1.3 双视向补偿

对升轨和降轨雷达数据分别进行正射校正和地形校正之后, 由于地形校正主要是针对透视收缩问题, 对叠掩和阴影等地形引起的信息丢失问题是无能为力的, 因此需要利用一景影像对另一景影像上的叠掩和阴影区域进行补偿, 以解决叠掩阴影区域造成的信息丢失问题, 这就是雷达影像双视向补偿过程的核心思想. 在双视向补偿过程中, 首先需要在升、降轨雷达影像中确定主、副影像, 选取的原则是选取一幅叠掩和阴影区域总计数较小的影像做为主影像. 叠掩和阴影区域大小可以从正射校正产生的副产品叠掩阴影掩膜影像上提取出来. 由于之前对升降轨雷达影像是单独进行正射校正的, 两影像存在空间位置偏差, 因此需要对两幅正射校正后的影像进行图像配准工作. 由于这时候的两幅影像是已经用同样的方法进行过正射校正了, 所以这里选用多项式校正方法对两幅正射校正后的 Radarsat-2 影像进行配准, 配准精度控制在一个像元以内. 配准以后进行双视向补偿, 补偿的原则是用辅影像对应区域的像元值直接替换主影像上的叠掩阴影区域像元值.

2 试验数据处理与讨论

选择的研究区域位于贵州省贵阳地区的扎佐林

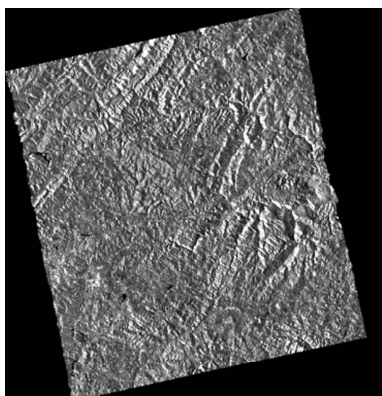


图1 基于 RD 模型粗正射校正结果
Fig. 1 Ortho-rectified image based on RD location model

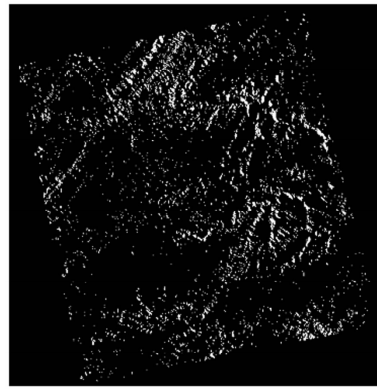


图2 叠掩阴影掩膜影像
Fig. 2 Shadow and layover mask image

场, 地形起伏, 山势陡峭, 大小约为 $20\text{km} \times 20\text{km}$, 海拔高程范围为 $600 \sim 1700\text{m}$. 该研究区域有利于验证新方法的有效性.

利用一对具有大范围重叠区域的准同步获取的升降轨的 8m 分辨率的 Radarsat-2 单视复数据 (Single Look Complex), 其中一幅为 2009 年 2 月 7 日获取的升轨数据, 另一幅为 2009 年 2 月 8 日获取的降轨数据. 利用的数字高程模型数据是国家测绘局提供的标准 $1:50000$ 比例尺 DEM 数据, 空间分辨率为 25m .

首先根据式(4)将 DEM 以 5 倍的采样率进行重采样, 再用于 SAR 影像的模拟. 利用基于 RD 定位模型的方法对 2 月 7 号获取的 Radarsat-2 影像进行粗正射校正的结果如图 1、图 2 所示, 叠掩阴影掩膜图像中叠掩图像区域被标记为绿色, 阴影图像区域被标记为红色. 由于两景图像的入射角较小, 产生阴影较少, 所以阴影区域非常小.

为了定量评价粗正射校正的效果, 以数字化的 $1:10000$ 地形图 (DRG) 为参考, 对 Radarsat-2 粗正射校正结果进行定位精度评价分析, 结果如表 1 所示.

目前, 主流遥感软件中, 最新版的 PCI Geomatics10.0 也支持对 RADARSAT-2 数据的正射校正. 为了验证迭代定位方法的有效性和正确性, 利用 PCI 软件对同一幅 RADARSAT-2 影像进行了正射校正处理, 并在 DRG 上选取了如表 2 中的 10 个同样的点进行了定位精度评价, 为了更直观地对 PCI 和迭代定位法的结果进行比较, 选取了平均绝对值误差 (MABSE) 和均方根误差 (RMSE) 两个指标对两种方法在东西方向和南北方向的定位误差进行了描述, 如表 3 所示.

表 1 基于 RD 定位模型的 Radarsat-2 影像粗正射校正结果定位精度分析

Table 1 Lateral deviation on ortho-rectification accuracy based on RD location model

点号	DRG 上 X 坐标	DRG 上 Y 坐标	Radarsat-2 正射 图像 X 坐标	Radarsat-2 正射 图像 Y 坐标	d_x (m)	d_y (m)
1	672770.864	2970497.183	672790.696	2970465.772	-19.832	31.411
2	677316.567	2971458.724	677330.486	2971418.680	-13.919	40.044
3	658260.804	2979256.470	658267.458	2979203.456	-6.654	53.014
4	665861.075	2982663.367	665867.127	2982633.390	-6.052	29.977
5	672895.287	2983721.548	672907.456	2983689.059	-12.169	32.489
6	656679.879	2970421.380	656700.245	2970381.004	-20.366	40.376
7	669675.319	2975956.899	669696.531	2975924.586	-21.212	32.313
8	664509.917	2966713.910	664528.453	2966684.393	-18.536	29.517
9	679009.950	2962922.148	678994.501	2962894.880	15.449	27.268
10	676583.453	2974709.069	676603.201	2974666.302	-19.748	42.767

表 2 基于控制点多项式几何精校正 Radarsat-2 影像定位精度分析

Table 2 Lateral deviation on ortho-rectification accuracy based on polynomial geometric precision correction method

点号	DRG 上 X 坐标	DRG 上 Y 坐标	Radarsat-2 正射 图像 X 坐标	Radarsat-2 正射 图像 Y 坐标	d_x (m)	d_y (m)
1	672792.807	2970470.175	672797.843	2970464.255	-5.036	5.920
2	677336.478	2971414.798	677339.930	2971416.248	-3.452	-1.45
3	664891.121	2983240.765	664894.854	2983235.521	-3.733	5.244
4	677124.771	2975031.970	677119.521	2975028.546	5.250	3.424
5	664283.386	2966149.380	664279.358	2966142.529	4.028	6.851
6	669693.898	2975938.577	669692.890	2975933.495	1.008	5.082
7	669363.092	2975899.659	669358.020	2975897.293	5.072	2.366
8	665922.030	2983139.062	665919.215	2983136.975	2.815	2.087
9	668280.667	2964553.561	668277.717	2964548.313	2.950	5.248
10	668183.006	2963713.675	668178.021	2963711.033	5.006	2.675

表 3 两种正射方法的定位精度比较

Table 3 Geolocation accuracy comparison of two methods

	东西方向误差 (m)		南北方向误差 (m)	
	MABSE _x	RMSE _x	MABSE _y	RMSE _y
迭代定位法	15.3937	16.288	35.9176	36.7056
PCI 处理结果	109.6712	126.163	14.7229	18.123

根据表 3, 在南北方向上, PCI 软件正射结果比迭代法定位精度高一些, 但是在东西方向上, PCI 软件正射结果定位精度很低, 远远低于迭代法结果. 通过以上的定量评价, 可以证明基于迭代定位法的 RADARSAT-2 正射方法优于 PCI 软件的处理方法, 利用该方法对于 RADARSAT-2 图像进行正射校正可以取得更高的定位精度.

通过上述定位精度评价分析, 经过基于 RD 算法的粗校正和基于控制点多项式几何精校正处理, Radarsat-2 正射结果的定位精度在东西方向和南北方向都能达到 5m 左右, 相对于 Radarsat-2 本身的分辨率, 定位精度较高, 证明了利用上述方法对高分辨率雷达卫星 Radarsat-2 数据进行正射校正的方法是有效的.

在对两幅雷达影像都做正射校正处理后, 根

据式(2)、(3)、(4)对升降轨雷达影像进行地形纠正. 图 3 和图 4 分别给出 2 月 7 号 Radarsat-2 影像辐射定标结果图像和地形纠正结果图像的局部图.

很明显, 经过地形纠正的图像的几何变形得到了有效抑制, 朝向雷达与背向雷达坡面的明暗差异得到有效消减, 整个图像色泽趋于均一, 这说明地形纠正起到了消除透视收缩影响的作用. 衡量地形对后向散射的影响是否被有效消除的一个重要指标是校正前后影像均方差的减少百分比, 这一指标几乎

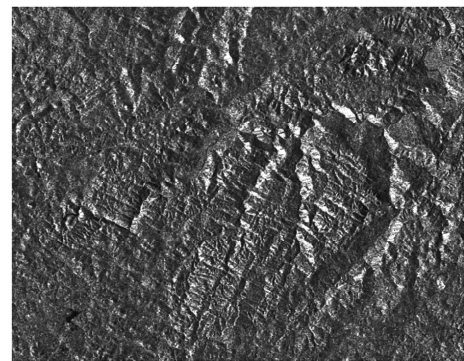


图 3 辐射定标图像

Fig. 3 Radiometric calibrated image

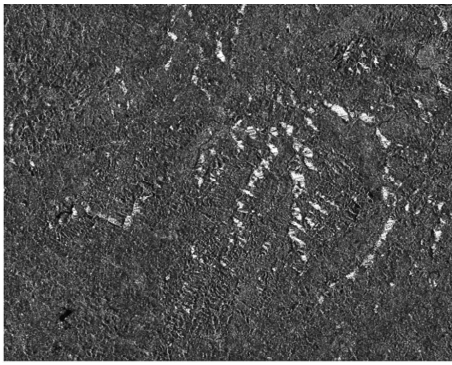


图 4 地形纠正图像
Fig. 4 Radiometric slope corrected image

被所有的研究者使用. 在辐射定标后的 2 月 7 号雷达影像上选取了两个 800×800 像元的两个子区域, 记为 A、B, 这两个区域的地面覆盖类型比较单一, 这样影像的差异(均方差)可以认为主要是地形引起的. 这两个区域中区域 B 的地形起伏较大, 对区域 A、B 分别计算了经过正射校正、地形校正两种情况下的后向散射方差, 分别记为 S_0 、 S_1 , 结果列于表 4.

表 4 区域 A、B 地形纠正前后后向散射系数均方差统计
Table 4 Statistics of mean square deviation of backscattering coefficients before and after radiometric slope correction in area A and area B

	正射校正后 均方差 S_0	地形纠正后 均方差 S_1	$(S_0 - S_1)/S_0 * 100\%$
区域 A	0.450	0.336	25.333
区域 B	0.282	0.212	33.019

从表 4 中可以看到, 地形起伏较大的 B 区域, 散射面积归一化的效果要好一些, 这是因为地形起伏越大, 散射面积的差异越大, 因此面积归一化后后向散射差异减少的更多, 但两个区域总的校正效果比较接近, 这表明该方法对于地形辐射畸变的校正有效的, 经过这样的校正后, 后向散射差异减少了大约 30%, 这也可以理解为, 雷达后向散射差异中有 30% 的部分是由地形引起的.

在对升降轨 Radarsat-2 都进行正射校正和地形纠正处理以后, 就可以开始针对叠掩阴影等信息丢失现象进行双视向补偿了. 首先根据叠掩和阴影区域总计较小的原则, 选取 2 月 8 号获取的 Radarsat-2 图像作为主图像, 2 月 7 号影像为副影像. 接着用 2 次多项式几何校正方法将副影像对主影像进行配准, 配准精度控制在一个像元以内. 配准以后进行双视向补偿. 双视向补偿的原理是主图像上发生叠掩和阴影的区域(根据叠掩阴影掩膜图像判断), 如果

在副图像的对应位置上未发生叠掩和阴影, 就用副图像上该处的像元值直接进行替换补偿. 图 5 所示为在主副影像重叠区域所选定的一块山势陡峭区域, 经双视向补偿前后的效果对比.

根据叠掩阴影掩膜图像判断, 双视向补偿前主图像上呈现为亮斑特征的区域多为叠掩区域, 如图 5(a)、(b)所示. 这些很亮的叠掩区域在双视向补偿后, 后向散射系数失真得到有效补偿, 呈现正确的后向散射特性和地貌特征(图 5(d)). 根据统计分析, 主图像在与副图像重叠区域范围内, 其补偿前的叠掩和阴影图像像元总数为 1818628 个, 其中叠掩图像像元为 1654496 个, 阴影图像像元为 164132 个; 补偿成功后, 消除的叠掩和阴影图像像元总数为 1686829 个, 其中, 叠掩像元成功补偿的为 1600845 个, 阴影图像像元成功补偿的为 85984 个. 总的叠掩阴影像元补偿成功比例为 92.75%, 其中叠掩像元成功补偿比例高达 97.53%, 阴影像元的成功补偿比例为 52.39%.

图 6 所示为山势较为平坦区域雷达图像, 经双视向补偿前后的三维效果对比. 其补偿前的叠掩像元总数为 306027 个, 阴影图像像元为 53136 个; 补

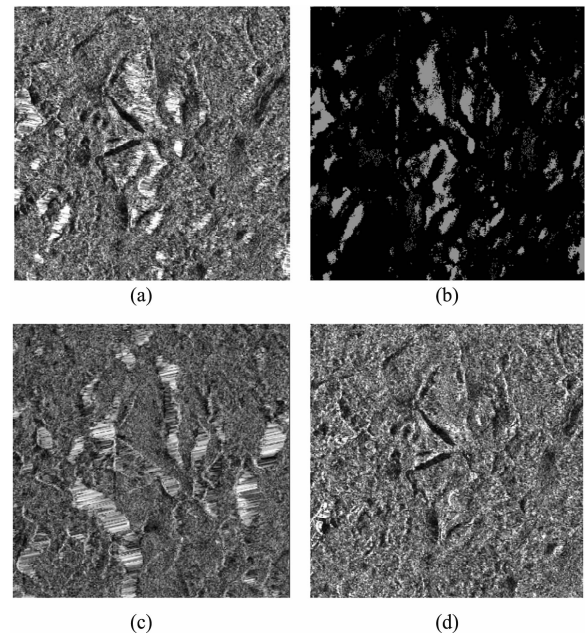


图 5 双视向补偿前后效果图 (a) 双视向补偿前主图像 (b) 主图像叠掩阴影掩膜图 (c) 双视向补偿前副图像 (d) 双视向补偿后主图像

Fig. 5 The effect pictures before and after compensating process (a) master image before compensating process (b) shadow and layover mask image of master image (c) slave image before compensating process (d) master image after compensating process

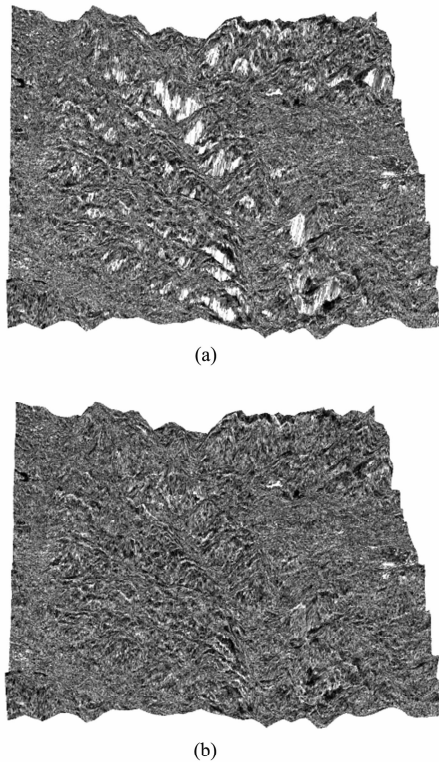


图6 补偿前后三维效果图 (a) 双视向补偿前主图像 (b) 双视向补偿后主图像

Fig.6 Three-dimensional display of master image before and after compensating process (a) master image before compensating process (b) master image after compensating process

偿后,成功补偿的叠掩像元为 289670 个,成功补偿的阴影图像像元为 28342 个.总的叠掩阴影像元补偿成功率为 88.54%,其中叠掩像元成功补偿比例高达 94.66%,阴影像元的成功补偿比例为53.34%.

上述研究表明基于 DEM 的双视向雷达图像几何精校正技术可以有效祛除叠掩和阴影的影响,这个问题是传统的基于单幅雷达图像的几何校正技术无法解决的.

3 结论

利用雷达卫星 Radarsat-2 上行轨道与下行轨道

准同步获取山体东西两坡的数据,实现了对山体两坡的基于 DEM 的 Radarsat-2 高分辨率雷达影像双视向几何校正,有效修正了由于合成孔径雷达 (SAR) 侧视成像造成的山区图像的几何变形,包括,透视收缩,叠掩,以及由于坡度造成的后向散射系数变形失真,解决了山区 SAR 图像的信息丢失和变形问题,并对双视向补偿结果进行了分析.实验证明该方法可以有效祛除地形引起的各种几何变形,特别是能够有效祛除叠掩和阴影的影响,这个问题是传统的基于单幅雷达图像的几何校正方法无法解决的.

REFERENCES

- [1] CHEN Er-Xue. Study on ortho-rectification methodology of space-borne synthetic aperture radar imagery[D]. *Doctoral Dissertation of Remote Sensing* (陈尔学. 星载合成孔径雷达影像正射校正方法研究. 中国林科院博士学位论文), 2004, 8—16.
- [2] NI Wen-Jian. Forest biomass retrieval based on 3D radar backscattering model using PALSAR data [D]. *Doctoral Dissertation of Remote Sensing* (倪文俭. 基于三维森林雷达后向散射模型与 PALSAR 数据的森林生物量反演研究. 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文), 2009, 90—94.
- [3] ZHOU Jin-Ping, TANG Ling-Li, LI Chuan-Rong. Development of two practical R-D location model and precision comparison between them[J]. *Journal of Remote Sensing* (周金萍, 唐伶俐, 李传荣. 星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型及其精度比较. 遥感学报), 2001, 5(3): 191—197.
- [4] GUO Hua-Dong. *Theory and application of radar for earth observations*[M]. Science Press (郭华东. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社), 2000, 183—191.
- [5] WU Tao. Study on simulation of space-borne synthetic aperture radar imagery [D]. *Master's Dissertation of Remote Sensing* (吴涛. 星载 SAR 图像模拟研究. 中国科学院遥感应用研究所硕士学位论文), 2008, 32—34.
- [6] Ulander L M. Radiometric slope correction of synthetic aperture radar images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1115—1122