

文章编号: 1007-4619(2007)06-0787-09

相向飞行全极化 SAR 图像对建筑物的立体重构

戴尔燕, 金亚秋

(复旦大学 波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要: 用多方向飞行的全极化 SAR 图像可能提取特定三维目标的高度与位置信息, 进而实现目标物的几何立体重构。全极化 SAR 图像数据与单极化 SAR 相比, 可以选择多种极化组合数据, 提供对于特定目标几何特征敏感的数据类型, 通过多方向飞行 SAR 图像反演该目标或目标群的高度与位置信息。本文用两幅相向飞行的 PISAR(日本机载极化与干涉 SAR, X 波段, 1.5m 分辨率)图像, 提取日本仙台电视塔高度、日本东北大学建筑物群的立体重构。

关键词: 多方向飞行; 全极化 SAR; 目标高度; 目标立体重构

中图分类号: TP79/TP391 **文献标识码:** A

Reconstruction of the 3D Stereo Buildings from Polarimetric SAR Images in Two Converse Flights

DAI Er Yan, JIN Ya Qiu

(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information(MOE), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) imagery is one of the most advanced technologies in recent two decades in microwave remote sensing. As the resolution reaches a meter order, reconstruction of the 3D stereo objects on the terrain surface from all-weather SAR image becomes more feasible. Due to some technical limitations, conventional radar measurements are mostly restricted to classifying, inverting and reconstructing the stereo objects. It remains for further study via fully polarimetric SAR imagery with high resolution.

Since pioneer experiments of SIR-C in 1994, some airborne and satellite-borne polarimetric SAR have been developed. The satellite-borne ALOS phase array polarimetric SAR at L band was launched in January 2006. Canadian Radarsat-2 polarimetric SAR at C band will be in orbit in 2007. How to effectively implement broad applications of polarimetric SAR images has become an extensive topic.

The PISAR is a Japanese airborne polarimetric and interferometric SAR with two independent radar systems (L band, 27 GHz, 3m resolution, and X band, 9.55 GHz, 1.5m resolution). Interferometric data at X band and only polarimetric data at L band can be obtained. Fully polarimetric data from the square loop flights of PISAR over Sendai city, Japan in 2004 becomes available. Multi-directional flights can see the 3D objects in different angles and lead to reconstruction of those stereo objects.

In this paper, the images of coherency matrix components derived from polarimetric PISAR images of two converse flights at X band are employed which are mostly characterized by double bounce scattering between the building sides and ground surface, a feasible approach to reconstruct the 3D stereo objects, such as a TV tower and campus buildings is developed. Reconstructions of the building targets are validated by the real ground truth.

Key words: multi-directional flights; polarimetric SAR; height and location; stereo reconstruction

收稿日期: 2006-07-19 修订日期: 2006-10-20

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 40637033, 60571050)

作者简介: 戴尔燕 (1983—), 女, 2005 年南京理工大学工学学士, 现为复旦大学硕士生。研究方向为 SAR 图像信息。E-mail: yqj@fudan.edu.cn

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR)对地监测是近 20 年来空间微波遥感最重要的进展之一^[1],利用 SAR 图像重建地面三维立体目标是一个重要的研究方向^[2-4]。由于目标阴影、观测方法等条件局限,诸如雷达测量法、相干测量、层析摄影等方法^[5,6],虽然在目标高度计算和地形绘制中已有广泛的应用,但是对于地面特定目标,特别是非合作方的三维目标的识别、分类与几何立体重构,则很大程度上要依靠卫星高分辨率 SAR 技术的研究进展。

自上世纪 90 年代美国航天飞机 SR-C 全极化 SAR 的实验以来,机载与星载全极化 SAR 技术在国际上取得了重要进展^[7,8]。PI-SAR 是日本机载极化与干涉 (Polarimetric and Interferometric SAR) 载有 L 波段 (1.27GHz, 3m 分辨率)和 X 波段 (9.55GHz, 波长 3.14m, 1.5m 分辨率)两个独立的雷达系统^[9]。X 波段能获取相干全极化数据, L 波段只能获取全极化数据。PI-SAR 也是 2006 年 1 月发射的星载陆地观测卫星 (ALOS)的相位阵 L 波段全极化 SAR 的机载试验系统。加拿大也将在 2007 年发射雷达卫星二号 C 波段的全极化 SAR。可以预计,全极化 SAR 的运行将在更深层次上为地球观测、地面海洋环境与目标的信息获取开辟新的天地。

PI-SAR 在日本进行过多方位的遥感飞行,比如图 1 中在日本仙台市上方标记 3、4、5、6 的四方形飞行轨迹,生成标号分别为 8709、8710、8708 和 8711 的 SAR 图像,每个像素大小为 1.25m×1.25m,飞行高度分别为 11980m、12030m、11970m 和 11980m,4 个轨道的近入射角和远入射角分别为 39.7°和 51.3°,39.6°和 51.2°,39.6°和 51.3°,39.8°和 51.4°。

$$\overline{T} = \langle k k^T \rangle = \begin{bmatrix} \frac{\langle |S_{hh} + S_v|^2 \rangle}{2} & \frac{\langle (S_{hh} + S_v)(S_{hh} - S_v)^* \rangle}{2} & \langle (S_{hh} + S_v)S_{hv}^* \rangle \\ \frac{\langle (S_{hh} - S_v)(S_{hh} + S_v)^* \rangle}{2} & \frac{\langle |S_{hh} - S_v|^2 \rangle}{2} & \langle (S_{hh} - S_v)S_{hv}^* \rangle \\ \langle S_{hv}(S_{hh} + S_v)^* \rangle & \langle S_{hv}(S_{hh} - S_v)^* \rangle & \langle |S_{hv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

容易证明,由 $\overline{S}$ 可组成极化散射强度——4 个 Stoke 参数的 Mueller 矩阵 $\overline{M}$,即全极化散射可以测量得到 $\overline{S}$ 、 $\overline{T}$ 、 $\overline{M}$,而且可以得到 $\overline{S}$ 、 $\overline{M}$ 、 $\overline{T}$ 之间的各分量的对应关系^[10]。由散射机制,可建立相干矩阵 $\overline{T}$ 与各类典型散射机制的相似性参数^[11,12],如

本文将利用上述飞行的 X 波段 PI-SAR 全极化图像数据,选取两次相向飞行的对墙二次散射特征明显的相干矩阵分量图像,提取该飞行地区日本仙台市电视塔高度,并提出该地区日本东北大学校园建筑物群的一种立体重构方法。

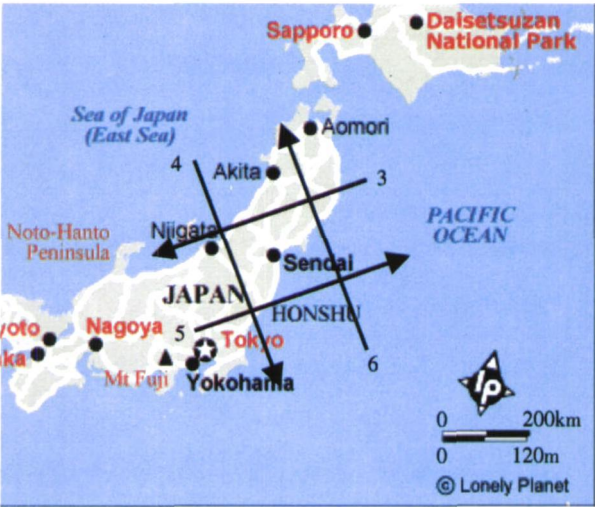


图 1 PI-SAR 的四次互成直角方位的遥感飞行
Fig 1 The square flight paths of PI-SAR

2 全极化 SAR 图像与多方向飞行的 PI-SAR 数据

当任一极化电磁波 (水平 h 与垂直 v 极化组合, $[E_h, E_v]$) 入射在自然地表上,极化散射场写为^[10]

$$\begin{bmatrix} E_{sh} \\ E_{sv} \end{bmatrix} = \frac{e^{jkr}}{r} \overline{S} \cdot \begin{bmatrix} E_h \\ E_v \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中可由全极化测量得到的散射矩阵 $\overline{S}$ 定义为

$$\overline{S} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由互易性 $S_{hh} = S_{vv}$ 定义散射矢量 $k = [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, S_{hv}]^T$,相干矩阵 $\overline{T}$ 写为^[10,11]:

$$R_0 = \frac{\langle |S_{hh} + S_v|^2 \rangle}{2(\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_v|^2 \rangle + \langle |S_{hv}|^2 \rangle)} \quad (4)$$

以同极化差异表征的与二面角目标反射的相似性参数:

$$R_d = \frac{\langle |S_{hh} - S_v|^2 \rangle}{2(\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_v|^2 \rangle + \langle |S_{hv}|^2 \rangle)} \quad (5)$$

以突出水平极化回波功率特征与线目标的相似性参数:

$$R_h = \frac{\langle |S_{hh}|^2 \rangle}{(\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_v|^2 \rangle + \langle |S_{hv}|^2 \rangle)} \quad (6)$$

以突出随机性产生去极化特征的随机或多次散射相似性参数:

$$R_r = \frac{\langle |S_{hv}|^2 \rangle}{(\langle |S_{hh}|^2 \rangle + \langle |S_v|^2 \rangle + \langle |S_{hv}|^2 \rangle)} \quad (7)$$

等。可以看出, 式 (4), (5) 分别对应于相干矩阵 $\overline{T}$ 式 (3) 中的分量 T_{11} 和 T_{22} , 即相干矩阵 $\overline{T}$ 的分量 T_{11} , T_{22} 分别凸现平面目标和二面角目标的散射特征。特别采用 PI-SAR 表征二面角特征的 T_{22} 图像来立体重构墙面 地面散射特征的建筑物目标。

3 电视塔高度反演

根据图 2 的成像原理, 从两幅不同飞行方向 (P_1 , P_2) 的雷达图像可以提取同一观测目标的高度信息, 按图 2 的几何关系, 以圆弧投影方式, 将聚焦成像后的目标投影到成像平面里^[13]。如图 2 对于一个高度为 h 的散射体目标, 其顶端在成像平面的成像位置和目标真实位置的位移是

$$s = \frac{h}{\tan \theta} \quad (8)$$

其中: θ 为雷达的入射角。由两个飞行方向的雷达图像对目标成像位置配准与式 (8) 的计算, 可确定该目标为高度为 h 的立体目标, 由式 (8) 的两个 s_1 , s_2 的和反演得到

$$h = \frac{s_1 + s_2}{\cot \theta_1 + \cot \theta_2} \quad (9)$$

将选定目标在不同向飞行的雷达图像上成像的

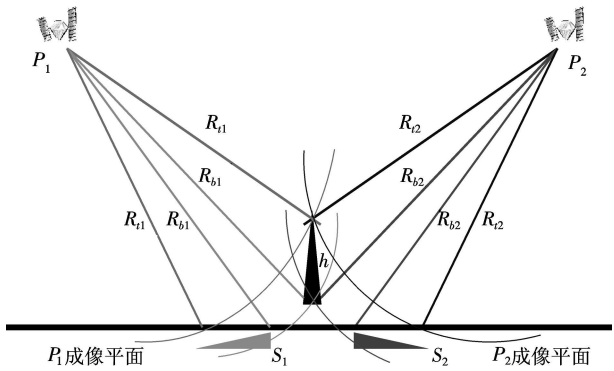


图 2 雷达成像原理

位置差做高度反演, 以某一次飞行轨道生成的雷达图像为基准, 对其他飞行轨道生成的图像进行配准。专门提取出包含选定的电视塔目标那一部分图像 (200×200 像素), 选用 8709 的图像作配准基准, 使得研究目标的真实位置在配准后的 4 幅图像上的坐标相同, 以保证 4 幅图像中目标成像位置差仅由目标的高度引起。由于目标的真实位置往往并不知道, 因此选用图像中明显的高度为零的地面控制点, 比如道路的交叉点、河流等作为配准点, 如图 3 中白色圆圈标出的点。

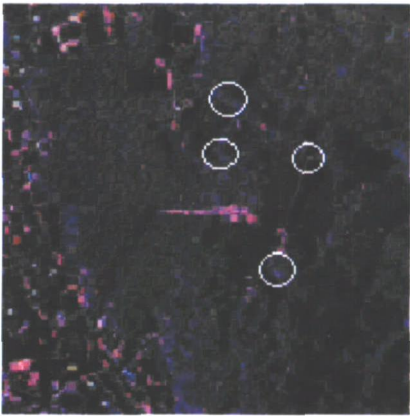


图 3 配准的控制点

Fig 3 Ground Control points for location matching

图 4 是已经配准后的 4 幅 RGB 图像 (红色 R 代表 $\langle |S_{hh} - S_v|^2 \rangle$, 绿色 G 代表 $\langle |S_{hh} + S_v|^2 \rangle$, 蓝色 B 代表 $\langle |S_{hv}|^2 \rangle$), 白色箭头表示的是雷达的飞行方向。

从配准后的图像看出, 在相对飞行轨道 (8708—8709, 8710—8711) 图像上, 电视塔像在垂直于飞行方向没有位置差, 但在平行于飞行方向上仍有位置差。因此, 选用各对相对飞行轨道的数据反演电视塔底部和顶部高度, 再将两组结果平均, 如表 1 所列。反演结果与真实值相差很小。由于电视塔结构形状对称简单, 在 4 幅图像上成像形状相同, 容易辨识。

表 1 两组数据计算的电视塔高度与真实值的比较
Table 1 Inverted height of the TV tower and comparison with real height

	8708+8709	8710+8711	平均	真实值
底部高度 /m	8.7	10.9	9.8	—
顶部高度 /m	158.3	142	150.2	—
电视塔高 /m	149.6	131.1	140.4	138

Fig 2 A stereo imagery from two directional SAR flights

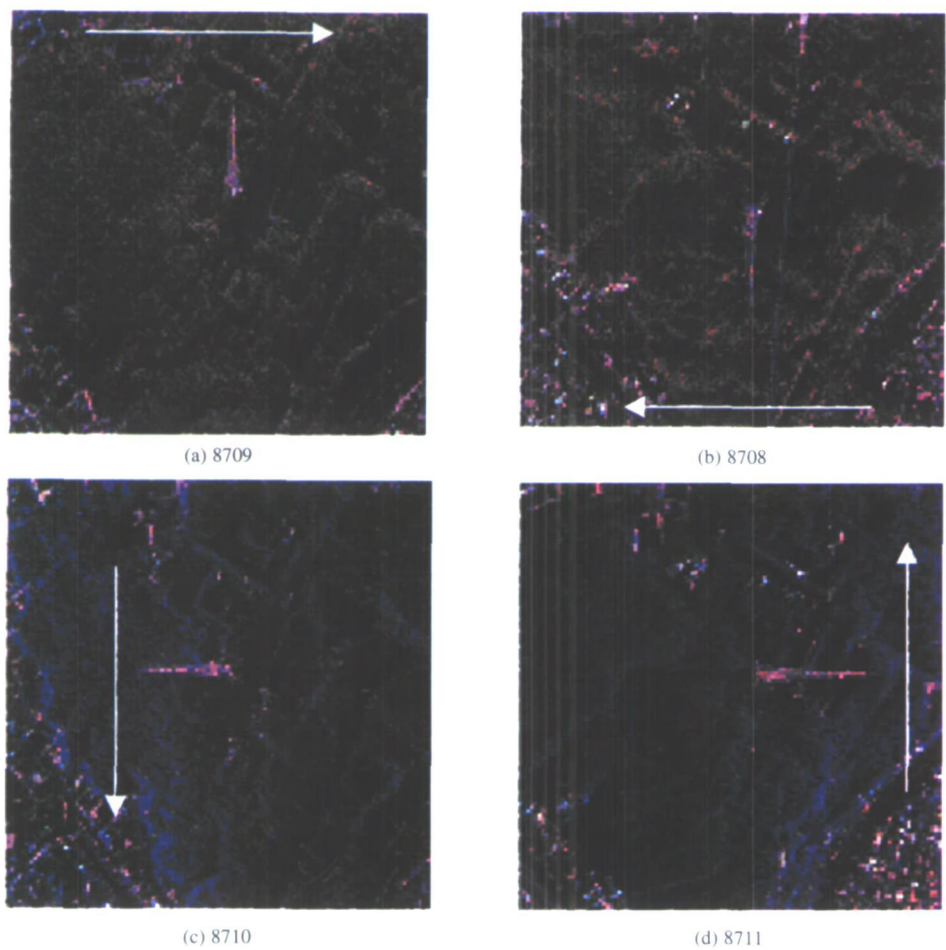


图 4 配准后的 4 次不同方向飞行的电视塔的 SAR 图像
Fig. 4 Four directional SAR images with matched TV tower locations

4 三维建筑物立体重构

提取建筑物目标图像, 仍选取 8709 图像作为基准图像 (200×200 像素), 以道路的交叉点或河流交叉点为地面控制点。由于 8710 和 8711 图像中建筑物成像可能由于树木的遮蔽而不清楚, 因此在下面的计算中只选用 8708 和 8709 这一组数据的 RGB 图像。

建筑物目标看成简单的立方体或者立方体的组合。以 8709 图像为例, 图 6 的两幅图像分别突出目标与平面目标和二面角目标的相似性。对于立方体结构的建筑物所成的像, 主要包括屋顶面散射、屋顶几何构造棱边的散射、墙与地的二次散射, 分别是平面目标、线目标和二面角目标的成像。由两幅图可看出, 图像中散射最强的部分大致都相同, 来自于屋顶棱边。

图 6 给出了图 5 图像中相干矩阵的分量 T_1 和 T_2 的图像。

图 7 是该地区建筑分布地图, 地面植被较多, 屋

顶平坦, 屋顶棱边的几何构造产生较强的散射。 T_2 突出了二次散射, 便于描绘建筑物墙面与屋顶轮廓的成像。图 8 中的建筑物是图 7 中的 20 号建筑。

作为第一步, 先把要选定的建筑物目标分解成由几个基本的长方体组成部分, 如图 9 所示, 建筑物分成 3 个基本的组成部分, 左边从上到下分别是 A 部分和 B 部分, 右边的是 C 部分。

第二步分别计算出这 3 个部分的高度。因为图 9 中 A、B 两个部分可能在成像中发生重叠, 因此, 不使用 A 与 B 两个部分连接的那条轮廓线, 而用 A 与 B 两部分最外侧的两条轮廓线计算出 A、B 和 C 的高度。

由于建筑物目标在图像中的轮廓线并不会是一条理想的直线, 要确定成像目标的准确位置有困难。首先确定一个范围, 这个范围刚好可以包含并且仅仅包含建筑物的某一个部分。在这个范围内, 把灰度值超过一定阈值的像素的个数在水平方向上累加, 这样就把建筑物成像位置转化成轮廓线在垂直方向的一个分布情况。如图 10 横坐标表示图 8 中

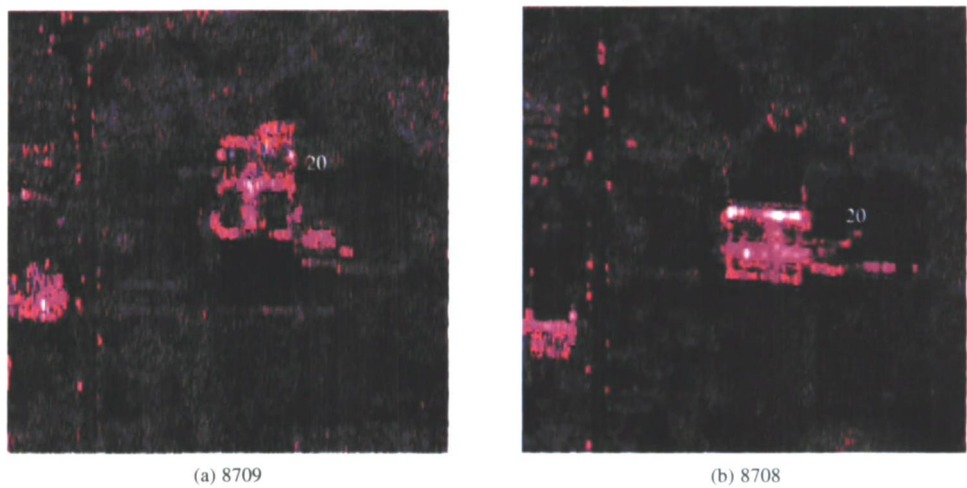


图 5 经过配准后的建筑物的图像
Fig 5 Building image after matching location

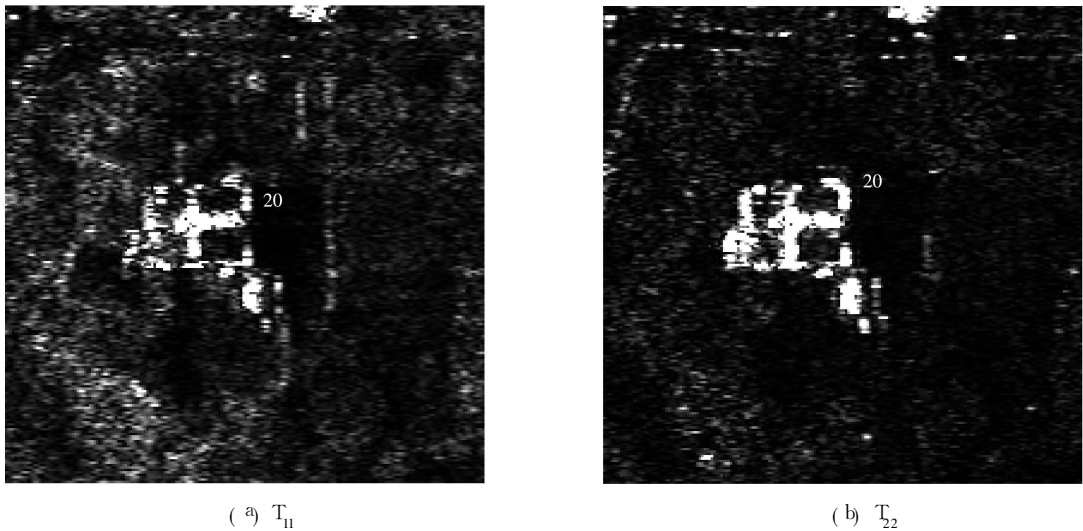


图 6 相干矩阵几个分量的图像
Fig 6 Image of the coherence matrix components T_{11} and T_{22}



图 7 研究地区的地图
Fig 7 A map of the study area

垂直方向上的坐标, 纵坐标表示像素的个数。

图 10 中轮廓分布曲线峰值对应的横坐标就是建筑物轮廓线所在的正确位置。图 10 中红色和蓝色曲线的每一个相对应的峰值所在的横坐标的差, 就是图像 8709 和 8708 中建筑物对应的棱所成的像的位置差。将这个位置差代入式 (9), 计算出 A、B、C 三部分的高度, 如表 2 所示。

第三步根据计算的三部分高度, 重构建筑物原来的形状和位置。已知目标的高度和卫星的入射角, 根据式 (8), 分别计算该目标的三个部分成像时发生的位移, 完成立体重构。在 8708 图像上, A 与 B 两部分的像有一定的重叠, 因此在进行还原的时

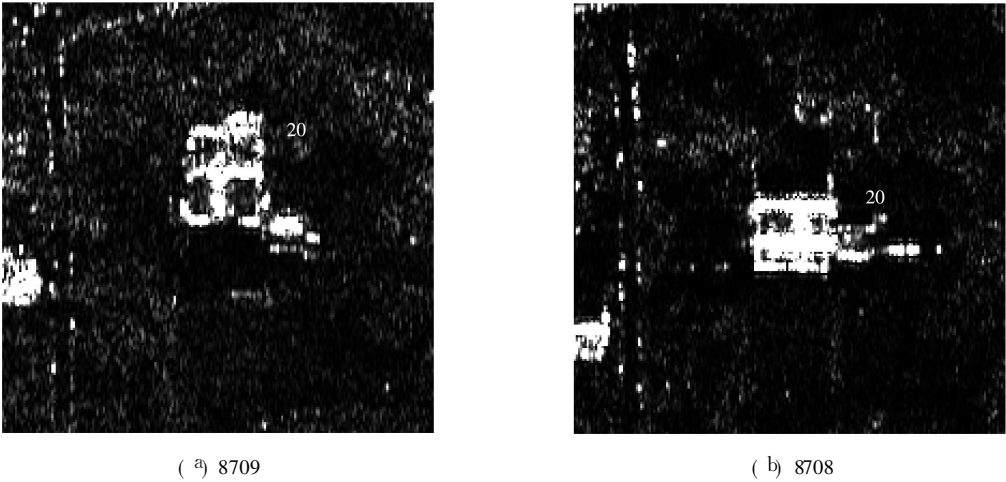


图 8 该建筑物的 T_{22} 图像
Fig 8 The component T_{22} image of the building 20

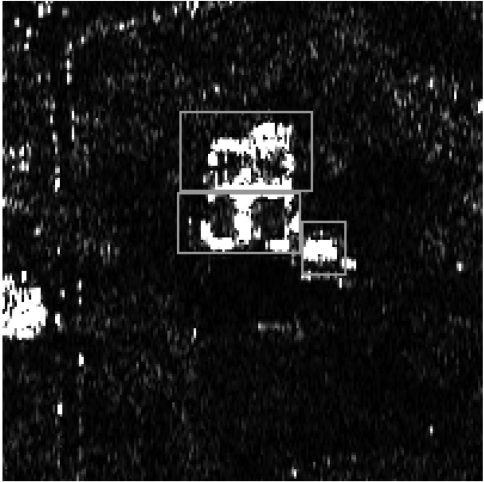


图 9 该建筑物的三个组成部分
Fig 9 Three parts of the building

表 2 建筑物的三个部分计算高度和真实值的比较
Table 2 Inverted heights of three parts of the building and comparison with real values

	A部分	B部分	C部分
计算值 /m	22	15	8
真实值 /m	23	18	9
误差 /m	1	3	1

候选用 8709 的图像。按此前的假设, 建筑物是简单的立方体的组合, 屋顶是平面。图像中的轮廓亮线确定了建筑物三个组成部分的边界, 中间的高度由该部分边界轮廓线的高度确定, 还原出了该建筑的形状, 如图 11 所示。与建筑物实际照片 (图 12) 相比, 是相近的, 尽管建筑的细节部分是无法反演的。

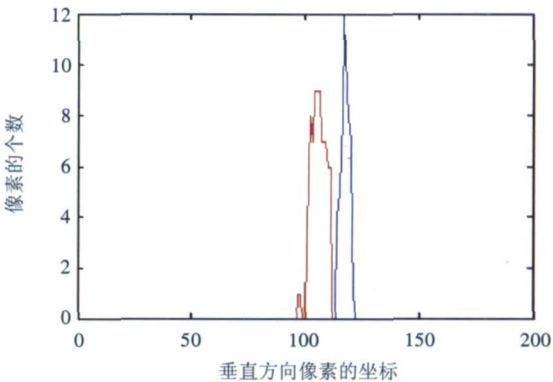
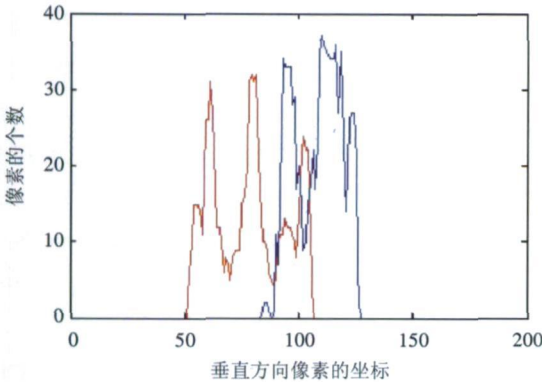


图 10 8709 和 8708 图像中建筑物所成像的轮廓线的分布曲线 (a) A、B 两个部分; (b) C 部分
Fig 10 Profile distribution in Figures of 8709 and 8708 (red color: 8709, blue color: 8708)

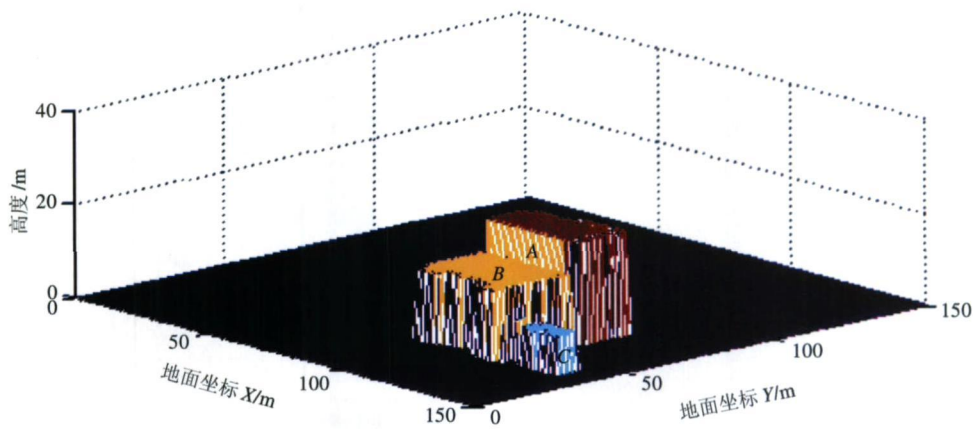


图 11 建筑物重构
Fig.11 Reconstruction of the building



图 12 建筑物实际照片
Fig.12 Photos of the building

5 建筑群的立体重构

对于建筑物群的立体重构, 与先前相同, 采用 8708 和 8709 的 T_{22} 图像, 如图 13 为配准之后的建筑群 T_{22} 图像, 图 14 为对建筑物群的划分图像。

如图 14 中标记区域, 按照 8709 图像, 按从上到下、从左到右的顺序, 最上面的是建筑物 1, 中间一行依次是建筑物 2、3、4, 下面两行分别是建筑物 5、6。通过水平方向像素累加的方法确定各建筑物成像位置, 再由式 (9) 计算各建筑物高度 (表 3)。然后根据计算高度和成像位置, 按长方形形状重构

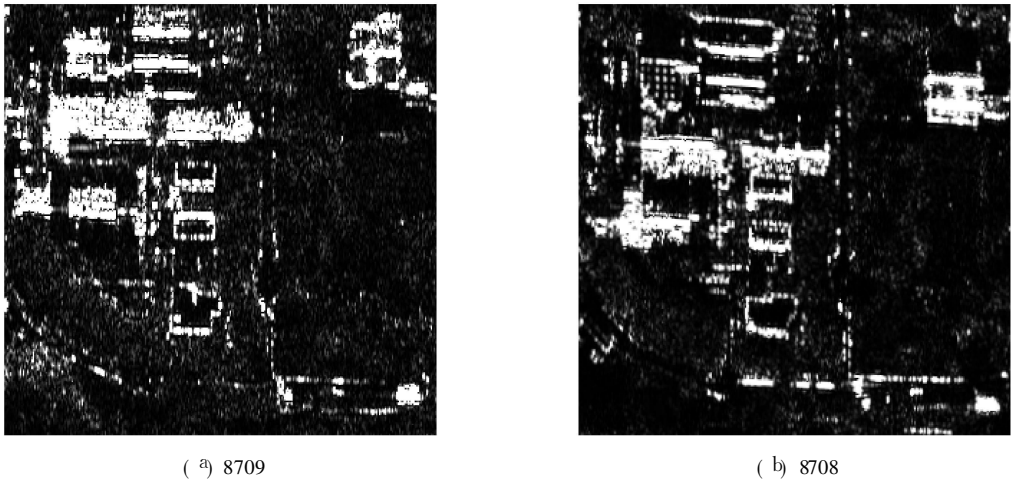


图 13 配准之后的建筑群所成的 T_{22} 图像
Fig.13 The component T_{22} image of the buildings after matching location

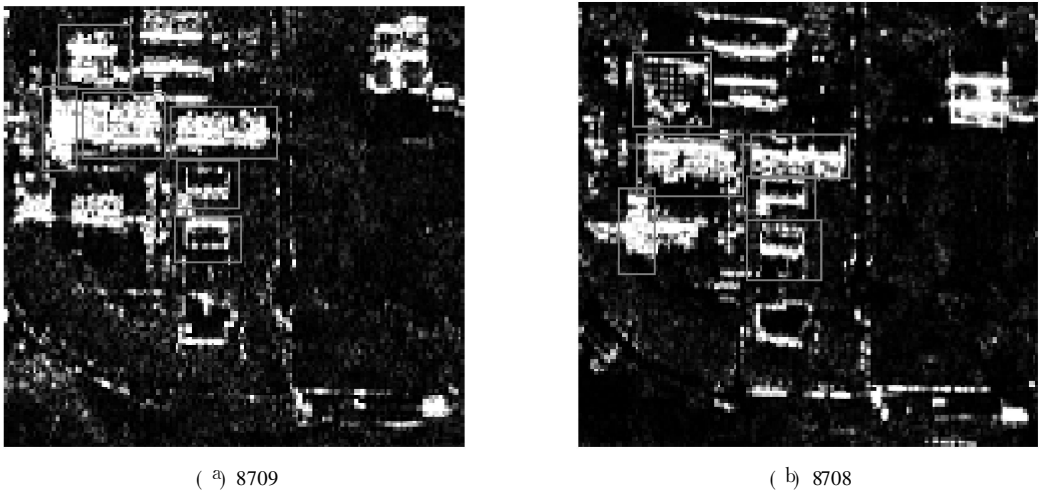


图 14 建筑群所成图像中的建筑物的识别和划分
Fig 14 Enclosing the buildings

表 3 各个建筑物的计算高度和真实高度的比较
Table 3 Inverted heights and comparison with real values

	建筑 1	建筑 2	建筑 3	建筑 4	建筑 5	建筑 6
计算高度 /m	10	40	23	16	5	5
真实高度 /m	15	36	24	19	6	6
误差 /m	5	4	1	3	1	1

各建筑物的立体目标。

已知了各个建筑物的高度, 成像的位置和形状等信息, 可以进行立体重构这个建筑物群。8709得到的重构图像更加清楚, 建筑物之间也没有重叠。

因此, 还是采用 8709 图像作为还原建筑群的原始数据。将重建的结果图 15 与图 9 比较, 图 15 中的建筑物 1, 2, 3, 4, 5, 6 在图 9 中的对应编号是 13, 23, 14, 15, 19, 19。

将图 15 与快鸟卫星的照片图 16 比较, 可看出重构的建筑物目标形状与位置还是比较准确的。但是, 高度低体积小建筑物目标占的像素少, 容易受到其周围植被的遮蔽, 就会被忽略。这些信息可以从全极化 SAR 图像对地表分类识别中加以补充。从照片上看, 建筑物 3 的真实长度比重构的结果长一些, 这是因为建筑物 2 的高度比建筑物 3 高出许

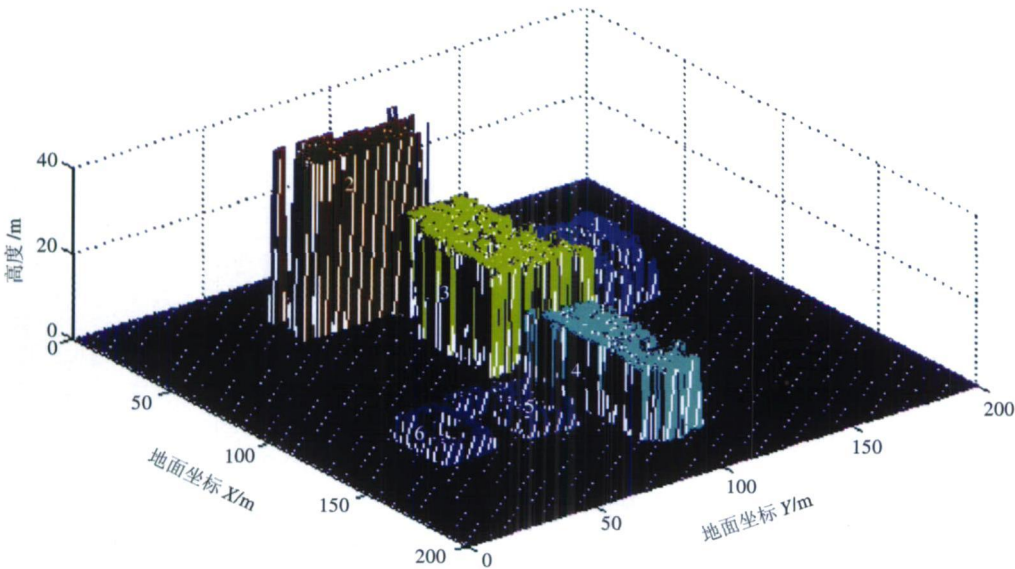


图 15 建筑物目标群的立体重构

Fig 15 Reconstruction of 3D stereo buildings

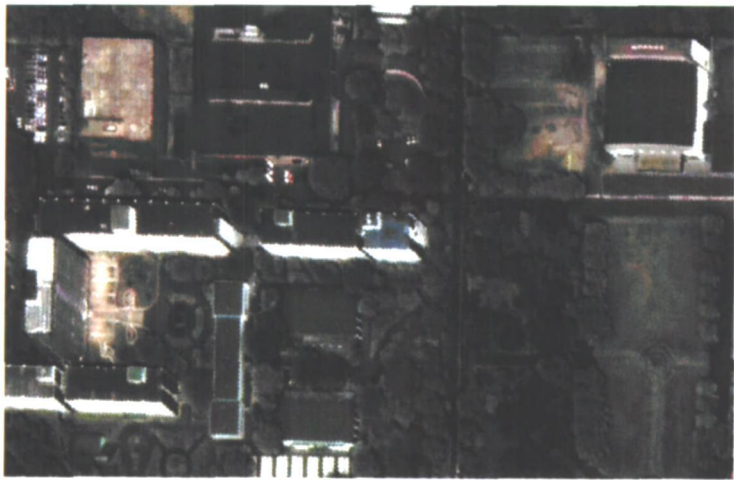


图 16 快鸟卫星照片
Fig 16 A Photo of Quickbird satellite

多, 在 8709 图像上它们的像发生了部分重叠, 在 8708 图像上建筑物 3 处在了建筑物 2 的阴影中, 影响了建筑物 3 重构的结果。

6 结 论

本文用多方向飞行的 PI-SAR 全极化数据图像, 选取相干矩阵中同极化差值分量数据, 经过目标位置配准, 由相向飞行的 SAR 图像目标成像的位置差计算目标高度, 由建筑物立方体构成的人工假定, 通过位置配准、高度计算, 提出重构三维建筑物群立体目标的一种方法, 并与实际情况做了对比。本文的方法简单易行, 效果也比较理想。

参考文献 (References)

[1] Evans D L, et al. Image Radar Polarimetry: Analysis and Application[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(5): 714—789.
[2] Hamasaki A, et al. Polarimetric SAR Stereo Using PiSAR Square Loop Path[A]. Proceedings of GARSS 05[C]. 2005, 1: 25—29.
[3] Bolter R. Reconstruction of ManMade Objects from High Resolution SAR Images[A]. IEEE Aerospace Conference Proceedings[C]. 2000, 3: 18—25.
[4] Balz T, Haala N. SAR-based 3D-reconstruction of Complex Urban Environments [A]. In: APRS Workshop on 3-D-reconstruction from Airborne Laser Scanner and InSAR Data

[C]. 2003, 34(3): W13
[5] Tupin F, Roux M. Markov Random Field on Region Adjacency Graph for the Fusion of SAR and Optical Data in Radar Grammetric Applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(8): 1920—1928.
[6] Liwitt M M, Matej S. Overview of Methods for Image Reconstruction from Projections in Emission Computed Tomography[A]. Proceedings of IEEE[C]. 2003, 91(10): 1588—1611.
[7] Klemm R. Conference Report: EUSAR' 96 Current Trends in SAR Technology[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1997, 12(3): 3—8.
[8] Sarabandi K, et al. Polarimetric Calibration of SAR-C Using Point and Distributed Targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(4): 848—857.
[9] Uratsuka S, et al. High-resolution Dual-Bands Interferometric and Polarimetric Airborne SAR(PiSAR) and Its Applications [A]. Proceedings of GARSS 02[C]. 2002, 3: 24—28.
[10] Jin Y Q. Electromagnetic Scattering Modeling for Quantitative Remote Sensing[M]. Singapore: World Scientific, 1993.
[11] Claude S, Potthier F. A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 498—518.
[12] Xu J Y, Yang J, Peng Y N. A New Method for Classification of Two Bands Polarized Radar Image[J]. Science in China(E), 2005, 35(10): 1083—1095 [徐俊毅, 杨健, 彭应宁. 双波段极化雷达图像分类的新方法[J]. 中国科学(E), 2005, 35(10): 1083—1095]
[13] Hamasaki A. Polarimetric Three-Dimensional Imaging[D]. Tohoku University, Sendai, Japan, 2005.