

高分辨率 SAR 层析成像建筑物叠掩散射体提取

魏恋欢¹ 廖明生¹ BALZ Timo¹ 张 路¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:阐述了 SAR 层析成像的基本原理,提出了基于 Butterworth 滤波的奇异值分解层析算法。利用柏林市高分辨率 TerraSAR-X 数据进行实验,提取了 SAR 像元内散射体的数量、位置及反射量,实现了星载高分辨率 SAR 真实数据层析成像,高程向估计精度达到米级。

关键词:高分辨率; SAR 层析成像; 奇异值分解; Butterworth 滤波; 模型选择

中图法分类号:P237.4; TP753 **文献标志码:**A

由于合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)的侧视成像方式,邻近建筑目标之间互相影响,单个雷达分辨单元中包含了来自不同地物目标的多个散射体的回波信号,产生严重的叠掩效应,导致影像解译分析难度加大。这个问题在城市地区的高分辨率 SAR 影像中尤其突出^[1]。SAR 层析成像(SAR tomography, TomoSAR)方法可以分离星载高分辨率聚束 SAR 数据中单个雷达分辨单元中信号混叠的多个散射体目标,准确估算各散射体的三维位置和反射量,是目前探索解决高分辨率 SAR 数据叠掩问题的技术手段之一^[2]。

尽管国内外学者已经对 SAR 层析成像技术理论进行了详细探讨,并开展了大量的实验研究,但大多数实验都是基于模拟数据和机载数据的,关于星载 SAR 数据的研究较少。20世纪 80 年代,文献[3]提出真实孔径雷达层析成像技术后,90 年代初引入到 SAR 领域,并有学者开展了理想条件下的仿真实验^[3-5]。2000 年,德国宇航局(DLR)的研究人员用机载数据进行了实验研究^[6]。2003 年意大利学者首次使用中分辨率 ERS 数据进行了层析实验研究,但由于数据本身的分辨率不高,得到的散射体高程估计精度偏低^[7]。2007 年一批高分辨率 SAR 卫星升空后,由于累积所需数据集的难度较大,高分辨率 SAR 层析成像成果依然较少。DLR 的学者率先使用高分辨率 TerraSAR-X 数据进行了相关研究,在

拉斯维加斯实验区开展了三维重建等研究^[1]。

笔者所在的课题组前期开展了高分辨率 SAR 层析成像的初步研究^[8-10]。本文在此基础上进一步提出了基于 Butterworth 滤波的奇异值分解(singular value decomposition, SVD)法,以克服传统奇异值阈值法无法自适应选择阈值的缺陷,并辅以基于贝叶斯信息准则的模型选择法,实现了层析成像的自适应处理。本文首先概述了 SAR 层析成像的原理,然后论述了基于 Butterworth 滤波的奇异值分解法及基于贝叶斯信息准则的模型选择法,最后,分析了柏林市 Debis 大厦的层析成像结果。

1 SAR 层析成像原理概述

一幅 SAR 影像的坐标系为方位-斜距平面,与该平面垂直的方向,称为高程向。SAR 层析成像的基本原理如图 1 所示。图 1 中所示的 SAR 分辨单元主要包括分别来自地面、建筑墙面、建筑顶部的三个散射体目标,形成叠掩。针对叠掩问题,SAR 层析成像利用 N 景影像组成的时间序列 SAR 数据集,研究多重散射信号分离方法,估算各个散射体目标的位置及信号强度,重建高程向的分辨率。

在由 N 景 SAR 复数影像组成的数据集中,第 n 景影像中某个像素的复数值 g_n 可以看作真实三维反射情况在方位-斜距平面的投影,也即反

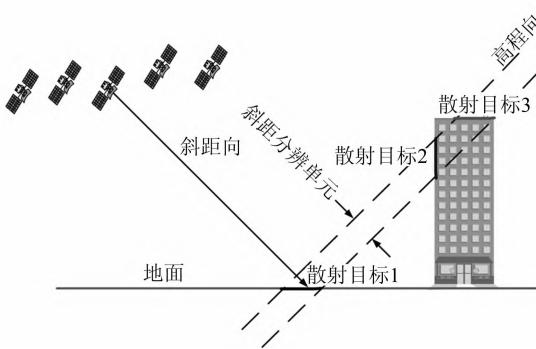


图1 SAR层析成像原理

Fig. 1 SAR Tomography Principles

射信号沿高程向的积分,可表示为:

$$g_n = \int_{-s_{\max}}^{s_{\max}} \gamma(s) \cdot \exp(-j \cdot 2\pi\xi_n s) ds \\ n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, $[-s_{\max}, s_{\max}]$ 为信号沿高程向的分布范围; s 为信号沿高程向的采样坐标; ξ_n 为高程向空间采样间隔; $\gamma(s)$ 代表沿高程向分布的反射量。TomoSAR 要解决的问题是根据数据集中相应的某一像素的一组复数观测值 g , 计算每个离散高程位置的反射量 γ , 进而确定该像素内主导散射体的数量及每个散射体的位置, 实现无模糊的三维 SAR 成像。如果在 TomoSAR 中只适用两景 SAR 影像, 就变成传统 InSAR 处理方法, InSAR 可看作 TomoSAR 的一种特殊情况^[11]。

重建出的高程向分辨率 ρ_s (可以区分两个散射体的最小距离) 取决于垂直基线跨度 Δb , 计算公式为:

$$\rho_s = \frac{\lambda r}{2\Delta b} \quad (2)$$

其中, r 是卫星与影像多谱勒中心的距离。

2 研究方法

本文提出了基于 Butterworth 滤波的奇异值分解法, 进行层析成像分解, 获得每个像元的后向散射剖面图。在获得后向散射剖面图后, 仍需通过模型选择过程来自动估计单个像元内的散射体数量及位置。下文将对层析成像过程中这关键的两步进行论述。

2.1 Butterworth-奇异值分解

奇异值分解法是线性代数中的一种重要的矩阵分解方法, 是解决线性求逆问题的经典方法之一。该法是一种非参数方法, 计算效率高, 对不规则采样不敏感, 具备很好的噪声抑制能力, 不需要散射体分布情况的先验信息即可获得稳定解, 因

此是研究高分辨率 SAR 层析成像的理想工具之一。

奇异值分解结果中经常存在一些小奇异值, 会带来噪声传播问题。为限制因小奇异值而导致的噪声传播, 目前常用的方法是设定奇异值阈值 (truncated-SVD, TSVD), 截断小奇异值的影响^[7]。阈值大小不是一成不变的, 应根据数据需要进行调整。如果进行大量像元自动化层析成像, TSVD 法不能为所有像元进行自适应阈值选择。为解决上述问题, 本文创新采用 Butterworth 高通滤波器^[12]对测量矩阵的奇异值进行过滤, 保留大奇异值, 削弱小奇异值的影响, 提高了数据处理算法的自适应特点和鲁棒性, 该法简称为 Butterworth-SVD。

2.2 模型选择

模型选择的任务是根据 Butterworth-SVD 法估计出的散射剖面图, 从一组可能的参数统计模型中选择一个与之匹配的统计模型, 在统计模型与数据的相似度和模型复杂度二者之间寻找平衡。统计模型越复杂, 其与数据的相似度越大, 但在实际应用中, 为减少冗余, 不能盲目追求过度复杂的统计模型。因此, 最大似然函数是无效的, 可以用处罚似然准则进行模型选择。处罚似然准则有很多种, 各准则的基本原理是相同的, 主要区别在于处罚形式不同。

贝叶斯信息准则^[13] (Bayesian information criterion, BIC), 也称 Schwarz 准则, 是众多模型选择准则之一, 该准则计算效率及正确检出率都很高, 因此, 本文选取基于 BIC 的模型选择方法。本文中, 散射模型的复杂度只取决于像元内散射体的数量, 因此, 本文设计了单散射体模型、双散射体模型与多散射体模型, 逐步增加散射体个数及模型复杂度, 根据模型的后验概率进行处罚判断, 为每个像元选择相适应的模型。

3 实验与分析

3.1 数据及实验区

本文使用 2008~2009 年间的 23 景高分辨率 TerraSAR-X 聚束模式升轨数据, 选取 2008-05-08 的数据为主影像。该组数据的方位向分辨率 1.1 m, 距离向分辨率为 0.6 m, 垂直基线跨度约 374.4 m, 斜距约 458.44 km, 由式(2)可计算出高程向分辨率达到 18.9 m。

选取柏林市 Debis 大厦作为研究目标, 该大厦的光学影像及平均幅度影像如图 2 所示。该大

位于波茨坦广场附近,总体高度106 m,其中主楼为23层的办公楼,高度为85 m,层高约为3.7 m。

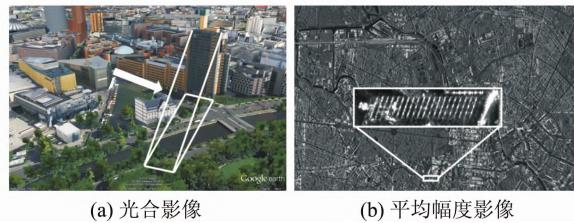


图2 柏林Debris大厦的Google Earth光学影像及SAR平均幅度影像

Fig. 2 Berlin Debris Tower in Google Earth and Mean-Amplitude SAR Image

3.2 结果分析

图3是用SAR层析成像方法提取出的实验区散射体数量分布图,其中,用十字星表示的像元为单散射体像元,用三角形表示的像元为双散射体像元。双散射体像元大多分布在建筑体的上半部分,而单散射体像元多数接近建筑底部。这是由于建筑外立面与地面形成了典型的二面角结构,墙面与地面上存在与卫星距离相等的地物目标。建筑上半部分的像元回波信号通常有一部分来自地面,另一部分来自墙面,两种信号叠加组成

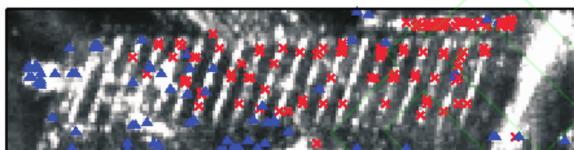


图3 提取出的散射体数量分布图

Fig. 3 Estimated Number of Scatterers

了该像元的回波信号。图4是沿外立面的散射体分布情况,可基本看出建筑的轮廓。结合该实验区的幅度影像进行分析,选取了位于大厦顶部(幅度图上大厦顶部突起处)的12个散射体,剔除粗差后估算得到建筑高度为107.8 m,该估计值与大厦总体高度106 m非常接近。

为了精确评价该层析结果,选取了两个典型像元,详细分析了它们的散射剖面图。这两个像元分别位于大厦第8层和大厦顶部,其中,位于8层的像元1是单散射体像元,位于大厦顶部的像元2是双散射体像元。如图5所示,图5(a)为像元1的散射剖面图,该像元的散射信号主要来自于单一散射体目标,该目标的高程向坐标为59 m,考虑到该数据集的入射角为30°,可以得出该散射体的估计高度为29.5 m;已知该办公楼的层高为3.7 m,8楼的实际高度应为29.6 m,估计高

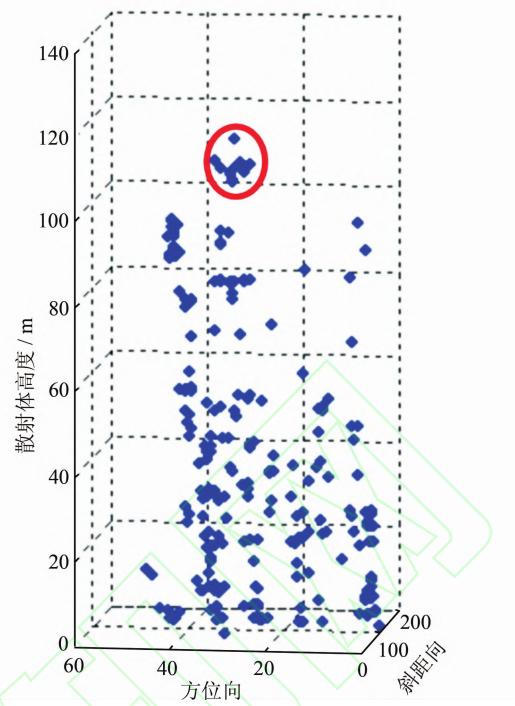


图4 SAR层析成像方法提取的建筑外立面散射体高程分布图

Fig. 4 Scatterer-Distribution Along Building Facade

度与真实高度之差仅为-0.1 m。图5(b)为像元2的散射剖面图,虽然该剖面图旁瓣影响较大,但仍可成功检测出散射体的数量及位置。由模型选择结果可知,该像元的散射信号来自沿高程向分布的两个散射体目标,强散射体的高程向位置为3.6 m,弱散射体的高程向位置为217.8 m。考虑到该数据集的入射角为30°,可得出强散射体的估计高度为1.8 m,可认为是位于地面的散射体;

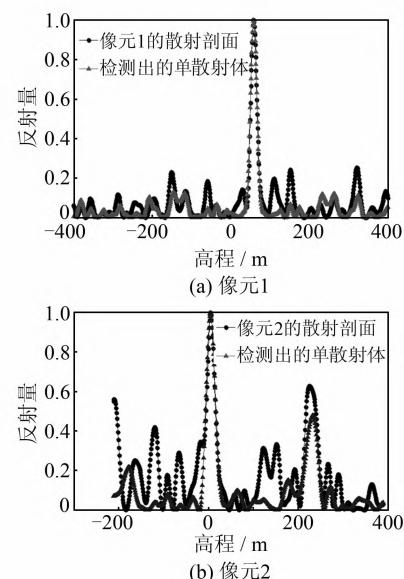


图5 像元散射剖面图分析

Fig. 5 Back-Scattering Profile Analysis

弱散射体的估计高度为 108.9 m, 可认为是位于建筑顶部的散射体; 二者之间的估计高差为 107.1 m, 与建筑实际高度 106 m 仅相差 1.1 m。

4 结语

本文阐述了 SAR 层析成像的基本原理, 提出了基于 Butterworth 滤波的奇异值分解层析算法, 以克服传统奇异值阈值法无法自适应选择阈值的缺陷, 并采用基于 BIC 的模型选择法, 提高了该层析处理算法的鲁棒性。利用覆盖柏林市的高分辨率 TerraSAR-X 数据进行实验, 提取了 Debris 大厦区域 195 个像元内的散射体数量、位置及反射量等参数, 实现了建筑物高度估计及散射体提取, 高程向估计精度达到米级。实验结果表明, 本文提出的方法具有较高的自适应特点和鲁棒性。

参考文献

- [1] Zhu Xiaoxiang, Bamler R. Very High Resolution Spaceborne SAR Tomography in Urban Environment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12):4 296-4 308
- [2] Liao Mingsheng, Wei Lianhuan, Balz T, et al. Application of TomoSAR in Urban Deformation Surveillance[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2013, 34(4):7-11(廖明生, 魏恋欢, Timo Balz, 等. TomoSAR 技术在城市形变监测中的应用[J]. 上海国土资源, 2013, 34(4):7-11)
- [3] Chan C K, Farhat N H. Frequency Swept Tomographic Imaging of Three-Dimensional Perfectly Conducting Objects[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1981, 29(2):312-319
- [4] Pasquali P, Pellegrini R, Prati C, et al. Combination of Interferograms From Ascending and Descending Orbits[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, California, 1994
- [5] Pasquali P, Prati C, Rocca F, et al. A 3-D SAR Experiment with EMSL Data[C]. IEEE Interna-
- tional Geoscience and Remote Sensing Symposium, Firenze, 1995
- [6] Reigber A, Moreira A. First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5):2 142-2 152
- [7] Fornaro G, Serafino F, Soldovieri F. Three-Dimensional Focusing with Multipass SAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(3):507-517
- [8] Balz T, Wei L H, Jendryke M, et al. TomoSAR and PS-InSAR Analysis of High-rise buildings in Berlin[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, 2012
- [9] Liu Kang, Liao Mingsheng, Balz T. High Resolution 3D Tomographic SAR with Compressive Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12):1 456-1 459(刘康, 廖明生, Balz T. 利用压缩感知方法的高分辨率三维层析 SAR 研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(12): 1 456-1 459)
- [10] Liu Kang, Balz T, Liao Mingsheng. Investigation on Building Height Extraction via Radar Backscattering Characteristics in High Resolution SAR Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(7):806-809(刘康, Balz T, 廖明生. 基于后向散射特性的高分辨率 SAR 影像建筑物高度提取的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(7): 806-809)
- [11] Liao Mingsheng, Lin Hui. Synthetic Aperture Radar Interferometry: Principle and Signal Processing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2003(廖明生, 林晖. 雷达干涉测量原理与信号处理基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2003)
- [12] Jaworski R C. Hybrid Butterworth Filter Module[J]. *IBM Technical Disclosure Bulletin*, 1985, 28(5): 2 164-2 165
- [13] Schwarz G. Estimating the Dimension of a Model[J]. *Annals of Statistics*, 1978, 6(2): 461-464

Layover Building Scatterers Extraction via High-Resolution Spaceborne SAR Tomography

WEI Lianhuan¹ LIAO Mingsheng¹ BALZ Timo¹ ZHANG Lu¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: After the launch of the new generation high-resolution SAR satellites, high quality SAR da-

ta of up to meter resolution became available. However, severe layover problems occur especially in complicated scenarios like dense urban areas, which make high-resolution data interpretation more difficult. SAR tomography(TomoSAR) aims at retrieving distribution of scatterers in the elevation direction and retrieving the corresponding reflectivity inside one resolution cell. In this way, TomoSAR can achieve real and unambiguous 3D reconstruction. First the basic principles of SAR tomography are illustrated. Then, a Butterworth filter based singular value decomposition method is proposed for TomoSAR processing. Third, experimental results about Berlin Debis Tower are analyzed in detail by comparing them with real building heights, the estimation precision reaches the meter level.

Key words: high-resolution; SAR tomography; singular value decomposition; Butterworth filter; model selection

First author: WEI Lianhuan, PhD candidate, specializes in radar remote sensing. E-mail: lianhuan@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174120, 61331016; Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, No. 20110141110057; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 201161902020006.

(上接第 513 页)

technology, airspace usage policy, and so on. Third, we set forth the necessity and significance of development of UAVRSS through UAVRSS applications and practices in many related industry domain. At last, we make recommendations on development of UAVRSS from science and technology policy, industry policy, financial policy and so on, respectively.

Key words: unmanned aerial vehicle(UAV); UAV remote sensing; UAV remote sensing system

First author: LI Deren, professor, PhD supervisor, Academician of the Chinese Academy of Sciences, Academician of the Chinese Academy of Engineering, Academician of Euro-Asia International Academy of Sciences. He is concentrated on the research, education and industrial application in spatial information science, communication and technology represented by RS, GNSS and GIS. E-mail: drli@whu.edu.cn

Corresponding author: LI Ming, PhD candidate. E-mail: lisouming@whu.edu.cn

Foundation support: The National 973 Program of China, No. 2012CB719905; the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Wuhan University, No. 2012213020206.