

利用航天飞机成像雷达干涉数据 提取数字高程模型^{*}

王 超

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 首先介绍干涉雷达 (INSAR) 成像原理和处理方法, 接着介绍了二维离散包缠 (wrapped) 干涉相位纹图的解缠 (unwrapping) 算法。利用航天飞机成像雷达 (SIR-C) 1994 年 10 月获取的昆仑山干涉数据, 研究了 SIR-C INSAR 获取数字高程模型的方法, 显示了 INSAR 在三维信息获取和动态监测方面的优越性和应用前景。

关键词 干涉雷达, 航天飞机成像雷达, 数字高程模型

1 引 言

利用遥感技术获取地面三维信息, 常规的方法是立体摄影测量。雷达遥感的发展, 合成孔径雷达 (SAR) 图象也被用作立体摄影测量, 它虽具有全天候、全天时的优点, 却由于斑点噪声的存在而受到限制。近年来发展起来的干涉雷达 (Interferometric SAR) 技术, 提供了获取地面三维信息的全新方法, 是雷达遥感的最新领域, 是遥感和摄影测量科学的前沿。

干涉雷达技术的特点在于, 它充分利用了雷达波束的相位 (phase) 信息。干涉雷达通过两副天线同时观测, 或两次平行的观测, 获取地面同一景观的复图象对。由于目标与两天线位置的几何关系, 遂在复图象对上产生了相位差, 形成干涉纹图 (interferogram)。干涉纹图中包含了斜距向上图象点与两天线位置之差的精确信息。因此, 利用传感器高度、雷达波长、波束视向及天线基线距 (baseline) 之间的几何关系, 可以精确地测量出图象上每一点的三维位置。

Graham 于 1974 年首次演示了干涉雷达用于地形测量的可行性^[1]。但是, 直到 1986 年, 经过 Zebker 和 Goldstein 的改进, 数字化干涉雷达技术才得以真正实现^[2], 并利用该技术产生出数字地形图^[3,4]。1993 年, Massonnet 等人成功地利用干

涉雷达技术测量 1992 年美国 Landers 地震形成的位移^[5]。

干涉雷达的优势是能够全天候、全天时地获取大面积地面精确三维信息, 空间分辨率高, 对大气和季节的影响不敏感, 尤其是差分干涉雷达技术 (differential INSAR), 对地表垂向运动和运动目标十分敏感, 精确到波长量级, 在军事应用方面具有极大的潜力。

干涉雷达技术发展近十年, 其应用领域也在不断探索和发现。主要应用领域包括: (1) 地形测量: 高精度数字地形的产生; (2) 地壳形变: 地震位移的测量; (3) 火山监测: 岩浆活动监测; (4) 地面沉降: 地下开采造成地面沉降; (5) 土地利用: 土地利用变化; (6) 森林调查; (7) 海洋现象和舰船的监测; (8) 军事应用: 运动目标的发现与监视; (9) SAR 图象校正: 几何与辐射校正。

该文利用航天飞机成像雷达 1994 年 10 月获取的昆仑山干涉数据, 研究了利用航天飞机成像雷达干涉数据获取数字高程模型 (DEM) 的方法。

2 干涉雷达成像原理和处理方法

关于干涉雷达的成像原理, 目前已有许多文章予以阐明。下面将给予简要介绍。

如前所述, 干涉雷达信号的获取, 通常是通过两副雷达天线同时观测, 或两次平行的观测来完

^{*} 中国科学院院长基金和国家自然科学基金重大项目, 得到了中国科学院徐冠华院士的热情支持、中国科学院遥感应用研究所郭华东研究员和美国喷气推进实验室 (JPL) T. Farr 博士等的支持和帮助, 数据由 JPL 提供, 在此表示衷心感谢。

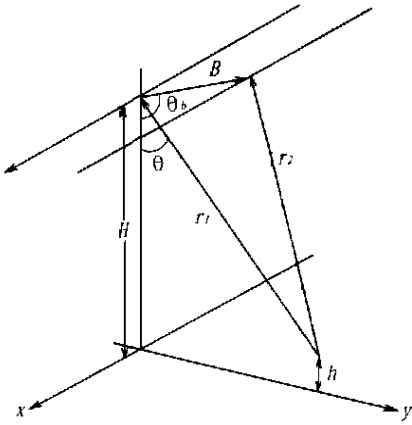


图 1 干涉雷达成像几何示意图

Fig.1 Geometry of interferometric SAR

成。一般机载 SAR 通常采用前者，星载 SAR 通常采用后者。假设有两副天线接收同一目标产生的回波信号（图 1），两副天线是确定的，并且视向相同，那么两副天线接收的信号的路径差可由下式表示：

$$\Delta r = |r_2| - |r_1| = B \parallel \quad (1)$$

式中 Δr 为接收信号路径差， B 为天线基线距 (baseline) $B \parallel$ 为基线距的视线向 (line-of-sight-direction) 分量。由图 1 可见，基线距的视线向分量 $B \parallel$ 随目标的三维位置的变化而不同，因此包含了目标的三维信息。考虑系统使用同一天线作为发射源（例如重复轨道干涉处理），那么路径差将产生如下相位差：

$$\varphi = 4\pi/\lambda * \Delta r = 4\pi f/c * \Delta r \quad (2)$$

式中 λ 为雷达信号波长， f 为频率， c 为光速。该式为干涉雷达相位差与信号路径差的关系，由此可以根据成像几何参数推出地面任一点的高度：

$$\Delta r = B \cos(\theta - \theta_0) \quad (3)$$

$$\theta = \theta_0 - \arccos(\varphi \lambda / (4\pi |B \parallel|)) \quad (4)$$

$$h = H - r \cos \theta \quad (5)$$

式中 θ 为视角 (look angle)， θ_0 为基线与 z 轴负向夹角， r 为斜距， H 为雷达平台高度， h 为目标高程。

值得指出的是，式 (4) 中的 φ 是解缠 (unwrapped) 的相位，而干涉雷达测量相位值是 2π 的模，即是包缠的 (wrapped)。因此必须经过相位解缠方可获得目标三维信息。

3 相位解缠算法

相位解缠是 INSAR 数据处理的关键步骤之一。

在理想条件下，相位解缠算法是很简单明了的，只要求相位数据 x, y 方向的偏微分并求积即可得到结果。然而在实际处理中，由于噪声和数据不连续，将产生误差的传播和累加。

目前有两类相位解缠算法。一类是“枝切法 (branch-cutting)”^[3]，即确认相位数据的不连续点或残差，利用枝切线连接该残差，然后绕枝切线解缠。这样即限制了局部误差的传播。但如何确定枝切线的位置，是该方法的难题。

第 2 类是最小二乘法，即求解一个解缠相位，使之最适合相位数据的偏微分。

假设已知二维离散函数 2π 模的相位：

$$\Psi_{i,j} = \varphi_{i,j} + 2\pi k \quad k \text{ 为整数} \quad (6)$$

$$-\pi < \Psi_{i,j} \leq \pi, i = 0, \dots, M-1, j = 0, \dots, N-1 \quad (7)$$

给定包缠相位 $\Psi_{i,j}$ ，我们要得到相同网格点上的解缠相位 $\varphi_{i,j}$ ，使得 $\varphi_{i,j}$ 相位差与 $\Psi_{i,j}$ 的相位差达到最小二乘的一致。

首先定义一个包缠算子 W ，通过对其参数加减整数个 2π ，使该参数的范围为 $(-\pi, \pi)$ ，因此有 $W\{\varphi_{i,j}\} = \Psi_{i,j}$ 。然后，让我们看 $\Psi_{i,j}$ 行和列上的相位差：

$$\Delta X_{i,j} = W\{\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j}\} \\ i = 0, \dots, M-2, j = 0, \dots, N-1 \quad (8)$$

$$\Delta X_{i,j} = 0, \text{其它} \quad (9)$$

$$\Delta Y_{i,j} = W\{\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j}\} \\ i = 0, \dots, M-1, j = 0, \dots, N-2 \quad (10)$$

$$\Delta Y_{i,j} = 0, \text{其它} \quad (11)$$

可以导出满足以下算式的 $\varphi_{i,j}$ 为最小二乘结果：

$$\begin{aligned} &(\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}) \\ &+ (\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}) = \rho_{i,j} \\ \rho_{i,j} = &(\Delta X_{i,j} - \Delta X_{i-1,j}) + (\Delta Y_{i,j} - \Delta Y_{i,j-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

可以看出，该方程是一个 $M \times N$ 网点上的离散泊松方程。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x,y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \varphi(x,y) = \rho(x,y) \quad (14)$$

由此可知，二维解缠问题实际上是一个边界值问题，关于边界值问题的算法很多，常用的有高斯-赛德尔迭代法、FFT 或 DCT 法、多维网格法等^[6-8]

该文采用了基于离散余弦变换和加权共轭梯度的快速循环法^[8]。

4 实验数据和处理流程

1994 年 10 月, 美国航天飞机成象雷达 SIR-C/X-SAR 2 次升空。从飞行的第 8 天开始, SIR-C/X-SAR 进入了干涉测量模式, 目的是进行专门干涉测量研究。飞行期间获取了重复轨道干涉测量数据。

该项研究利用 SIR-C/X-SAR L 波段新疆昆仑的干涉数据, 进行了三维信息提取的研究。新疆昆仑位于我国西北地区, 青藏高原的北部, 这里人烟稀少, 地壳构造活动, 是利用干涉雷达技术开展地壳位移的优选地, 被列为 SIR-C/X-SAR 超级试验区。同时, 该区植被稀少, 便于干涉测量信息提取。有关数据见表 1。

表 1 SIR-C 昆仑干涉数据主要参数

Table 1 Parameters of SIR-C interferometric data in Kunlun, Xinjiang

| 参数 | 轨道 1 | 轨道 2 |
|--------------|------------|------------|
| 数据编号 | 143.40 | 159.40 |
| 成象时间 | 1994.10.09 | 1994.10.10 |
| 轨道方向 (A/D) | D | D |
| 星下平台方向 | 138.834 | 138.851 |
| 入射角 (度) | 50.681 | 50.780 |
| 波段 | L | L |
| 极化 | VV | VV |
| 雷达频率 (千兆赫) | 1.237 | 1.237 |
| 雷达波长 (米) | 0.2422721 | 0.2422721 |
| 距离向复采样率 (千赫) | 44.9971199 | 44.9971199 |
| 脉冲重复频率 (赫兹) | 0.2422721 | 0.2422721 |
| 线采样距 (米) | 4.4905472 | 4.4907508 |
| 象元采样距 (米) | 3.3312409 | 3.3312409 |

干涉雷达数据提取三维信息的主要步骤包括干涉雷达信号数据的处理、成象参数的统一化、数据的几何精配准、平坦地形相位纠正、以及相位的解缠, 经过上述步骤的处理, 即可获得斜距向的数字高程模型。利用成象参数可计算出正射投影的数字高程模型。图 2 是算法流程。

图 3 是试验区 L 波段 VV 极化雷达图象, 封二图版 I 图 4 是经过平坦地形相位纠正的相位图, 图中一个色环代表 $-\pi$ 至 π 的变化, 强度代表 L 波段 VV 极化雷达信号强度, 封二图版 I 图 5 为相位相

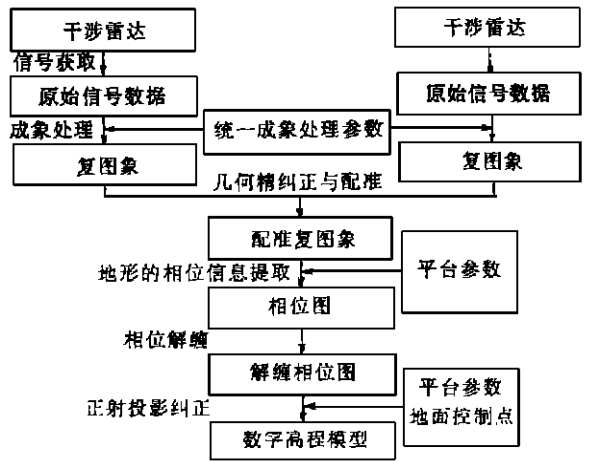


图 2 干涉雷达提取数字高程模型流程图
Fig.2 Flow chart of interferometric SAR data for digital elevation modelling



图 3 新疆昆仑 SIR-C L 波段 VV 极化图象

Fig.3 SIR-C L VV image of Kunlun, Xinjiang

干图, 图中亮度变化为 0 至 1。封二图版 I 图 6 为数字高程模型 (未进行地距和正射投影纠正)。封二图版 I 图 7 为试验区地形图。封二图版 I 图 8 为试验区三维显示, 其中高度信息由干涉雷达获得, 亮度反映雷达后向散射强度。

5 讨论和结语

由获取的干涉测量相位图和相干图可以看出: 相位的变化与地形高程能很好地吻合; 数据的相干程度与数据信噪比、配准精度、视数等参数有关, 在雷达背影区和阴影区相干较低, 这是由于信号较弱甚至无回波信号所至。

将获取的 DEM 与该区目前仅有的 1: 100000 地形图比较 (封二图版 I 图 8), DEM 有丰富的细

微信息。由于现有的地形图比例尺太小,无法利用地形图进行精度分析。有关工作将进一步进行。

该项研究介绍了 SIR-C INSAR 数据获取数字高程模型的方法,显示了 INSAR 技术在三维信息获取和动态监测方面的优越性和应用前景。

参 考 文 献

- [1] L.C.Graham.Synthetic Aperture Radar for Topographic Mapping. *Proc. IEEE*, 1974, **62**, 763—768.
- [2] H.A.Zebker, R.M.Goldstein. Topographic Mapping from Interferometry Synthetic Aperture Radar Observation. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**, 4993—4999.
- [3] R.M.Goldstein, et al..Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 1988.
- [4] A.Gabriel, et al..Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B. *Int. J. Remote Sensing*, 1988, **9** (5): 857—872.
- [5] D.Massonnet, et al., The Displacement Field of the Landers

- Earthquake Mapped by radar Interferometry. *Nature*, 1993, **364** (6433), 138—142.
- [6] H.Takajo, T.Takahashi.Least-squares Phase Estimation from Phase Differences. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 1988, **5**, 416—425.
- [7] M.Pritt.Phase Unwrapping by Means of Multigrid Techniques for Interferometric SAR. *IEEE Trans.on Geosci. and Remote Sensing*, 1996, **34** (3): 728—738.
- [8] D.C.Ghiglia, L.A.Romero.Robust Two-Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping that Uses Fast Transforms and Iterative Methods. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 1994, **11** (1): 107—117.

作 者 简 介

王超,男,1963年12月生,副研究员。1989年毕业于南京大学获理学博士。1992年至1993年在德国航空航天研究院(DLR)高频技术研究所从事雷达遥感合作研究。现主要从事干涉雷达和微波遥感应用等领域的研究,已发表论文20余篇,在干涉雷达方面发表数篇论文。

Using SIR-C Interferometric Data for DEM Acquisition

Wang Chao

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract The Spaceborne Image Radar (SIR-C) onboard the space shuttle Endeavor acquired interferometric synthetic aperture radar (INSAR) data over Mt.Kunlun, NW China, during its second flight. In this paper, DEM acquisition of test site using SIR-C INSAR data was demonstrated. The main procedure included coregistration of data, remove of flat terrain effect and phase unwrapping using DCT technique. The results show more details than the existing topographic map. The precise correction and analysis have to be done in the further work.

Key words INSAR, SIR-C, DEM



图 4 干涉纹图



图 5 相位相干图



图 6 数字高程模型



图 7 试验区地形图

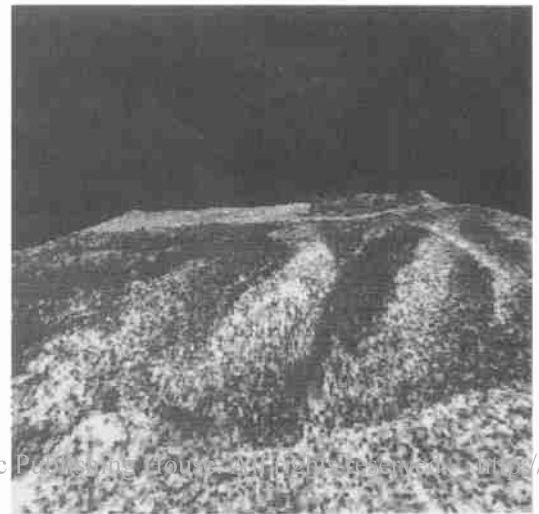
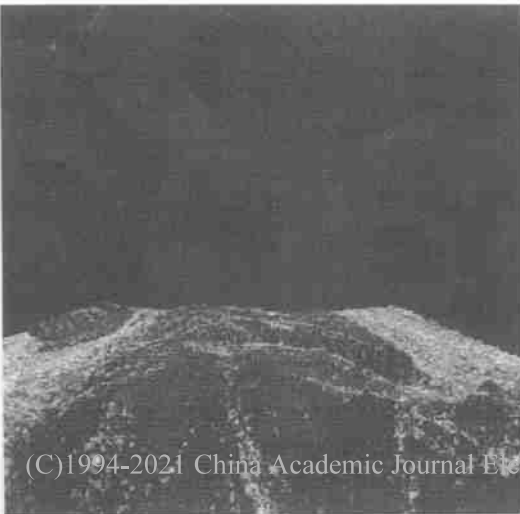


图 8 试验区数字高程和雷达图象的三维显示