

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0501-06

小波域多时相干涉 SAR 数据融合

岳焕印, 郭华东, 王长林, 廖静娟, 阎福礼

(中国科学院 遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 大气因素和高斯白噪声对由星载干涉 SAR 系统获取的干涉图相位有很大的影响, 可能会极大地降低结果 DEM 的精度。提出了一种对多时相干涉 SAR 数据生成的独立 DEM 进行权重融合的方法, 该算法在小波域当中估计了大气和高斯噪声的误差功率, 并对多时相 DEM 进行权重融合。用河北省尚义县地区的 ERS-1 和 ERS-2 数据的研究表明, 此算法可以很好地提高由干涉 SAR 获取的 DEM 的精度。

关键词: 干涉 SAR; 数字高程模型; 大气因素; 权重平均; 小波变换; 精度

中图分类号: TP722.6/TP751.1 **文献标识码:** A

1 引言

雷达波在大气中传播, 主要由于大气中水汽含量随时间和空间的变化, 大气的折射率也会随之发生变化, 从而影响 InSAR 的干涉相位, 损害 InSAR 所提取的 DEM 的质量, 尤其对于垂直基线距较小的轨道对, 这种现象更为明显, InSAR 的大气影响因子已引起人们的高度重视。大气相位偏差的能量谱表现为 $1/f^n$ 型谱特征(我们将表现为 $1/f^n$ 型谱特征的信号称作“ $1/f$ 过程”^[1]), 其相关长度远大于用于相干性估计的窗口大小。因此, 在提取 DEM 的过程中, 尽管所用的干涉对的相干性提高, 最终得到的地形也会有很大的偏差。

许多文献中对干涉 SAR 的这种相位缺陷进行过研究。Massonnet 和 Feigl^[2] 研究了意大利 Etna 山和美国加利福尼亚州 Landers 干涉图的一些无法解释的特征, 将其归因为由大气的变化引起的。Goldstein^[3] 对 SIR-C 雷达干涉图的这种相位缺陷进行了分析, 他发现由 SIR-C 获得的加利福尼亚 Mojave 沙漠的干涉图包含一个单程传播误差, 如果用距离表示就是在雷达图像上普遍存在 0.3cm 的均方根误差, 最高可达 2.8cm, 这相当于雷达干涉图上 L 波段 0.16rad 的均方根相位噪声, C 波段 0.63rad 的均方根相位噪声。这些误差在空间分布上与地表特征无

关, 并且表现出与涡流相关的 Kolmogorov^{8/3} 幂函数式谱特征。

Zebker 和 Rosen 等^[4] 利用夏威夷的 SIR-C3 个波段的数据, 研究了重轨雷达干涉图的大气影响效应, 并且估计了在典型大气状况下干涉图质量的降低, 评价了在地形图和地壳形变测量中大气影响的严重性, 并且指出在潮湿地区将多个独立的干涉图进行平均是降低大气误差的唯一办法, 这种平均只是简单的无权重平均。根据滤波理论, 当各种噪声的方差不相等时, 简单的将数据相加后平均并不是最优的去噪方法。

本文中, 我们利用大气偏差的特殊频率趋势, 在小波域中直接从数据估计每一个干涉图的噪声和大气的误差功率, 用权重平均的方法把 DEM 进行合成。这样, 每一个干涉图中不相关的大气和噪声相位偏差就被平均, 从而减少了高程误差, 使结果 DEM 更加可靠。

2 干涉图相位偏差的大气项特征

我们只考虑造成相位误差的两项因素, 相位白噪声误差项 w 和大气误差项 a

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + w + a \quad (1)$$

其中 Δr 是两雷达天线到目标的距离差。

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49989001), 国家 863 计划课题(2001AA132040)及中国科学院创新工程(KZCX2-312)资助。

作者简介: 岳焕印(1975—), 男, 1999 年毕业于南京大学地球科学系, 获硕士学位, 现于中国科学院遥感应用研究所攻读博士学位, 主要从事雷达遥感研究。

相位噪声项 w 来源于几个不同的因子^[5], 包括热噪声、图像对配准误差、处理过程中的人为引入误差、时相和基线去相关。所有这些噪声源都会增大干涉相位值 ϕ 的偏差, 从而增加了 DEM 的误差。噪声功率 σ_w^2 可以由局部相干性的绝对值 $|\gamma|$ 估计。这可以在图像数据每一个像元的邻域内进行空间平均计算所得, 假定这样的处理过程具有遍历性并在一个小的估计窗内是稳定的。

a 项主要是由于大气中水蒸汽的时空变化引起的。其它如对流层的压力、温度变化和电离层现象也会引入误差, 但其影响量较小。相反, 空气中水汽团的涡流行为会造成极大的相位影响。Goldstein^[3] 发现利用 SIR-C 获得的加利福尼亚 Mojave 沙漠的数据生成的干涉图, 从干涉数据上减去地形影响以突出可能的大气影响, 其中包含的大气误差在空间上与地表特征并不相关, 对于 C 波段数据, 相应的 rms 相位噪声为 0.63 rad, 其空间谱表现为与涡流现象有关的 $-8/3$ 幂函数特性^[6]

$$S_a(f) \propto \frac{\sigma_a^2}{f^{8/3}} \quad (2)$$

式中 f 为空间频。

Ferretti 等^[7] 利用意大利 Sicily Etna 山的 ERS-1/2 串行数据形成 6 个独立的干涉图, 为了降低相位噪声项, 他们选择了一个高相干区, 从干涉数据上减去地形影响以突出大气影响, 与 6 个独立的干涉图相关的相位误差功率 σ_a^2 大小为 0.38—1.5 rad 平方之间。另外, 这些误差图与地面特征是无关系的, 并且都表现为与含水汽的涡流大气相关的 $-8/3$ 幂函数谱特征。

因此在 InSAR DEM 重建过程中, 大气的影响因素是不能忽略的。除了相位噪声项之外, 还必须考虑这一误差源。在湿润地区, 它的误差功率很容易超过相位噪声误差功率。 a 项在频率域中可以很好的表征, 它在频率域中表现为 $1/f$ 型谱特性, $1/f$ 大气过程和噪声同时存在是 InSAR DEM 合成中的关键问题。

在对地形没有经验信息并只有一张干涉图时, 是无法对所获得的 DEM 精度进行评价的, 一个多干涉图处理过程得到的不仅是一张 DEM, 也是对其精度进行估计的唯一可能途径。现在, 我们在频率域内进行权重平均, 对于每一个数据集的相位噪声和大气项因素, 在频率域内, a 和 w 很容易刻画。

相位噪声项 w 和大气项 a 是统计无关的(因为它们来源于截然不同的物理过程), 具有不同的谱特

征: a 项在低频起主导, w 项在高频起主导。我们所要解决的问题如下: 利用同一地区的多个干涉图, 必须分辨出背景大气的误差功率和去相关噪声功率, 为了进行误差功率估计, 从而进行 DEM 融合, 我们利用了 $1/f$ 过程特性和小波变换。

3 多时相干涉 SAR 数据融合

选择一块实验区, 如果可以得到由 InSAR 数据生成的 N 个独立的 DEM, 计算每一对之间的差我们可以生成 $NE = \binom{N}{2}$ 个研究区域的误差图, 误差平均功率可以由 4 个独立因子组成

$$P_{ij} = \sigma_{ai}^2 + \sigma_{aj}^2 + \sigma_{wi}^2 + \sigma_{wj}^2 \quad (3)$$

式中 w 和 a 分别是噪声和大气的贡献量, i 和 j 是用于生成误差图的 DEM 编号。

如果我们知道每一个 DEM 的噪声功率 σ_w^2 的确切值, 并且 $N > 2$, 我们很容易解得未知大气畸变功率 $\{\sigma_{ai}^2, i = 1, \dots, N\}$ 。

在我们的算法过程中, 大气畸变功率和白噪声功率都是从误差图估计的。

3.1 大气和白噪声信号的参数估计

对于高斯噪声和 $1/f$ 过程, 我们考虑的都是一维情况下的结果, 但由此可直接推至二维。再者, 对于我们所研究的情况, 高斯模型也是与实际情况相符的, 为举例说明, 图 1 给出了下节中实验区两 DEM 之间的误差直方图。

设 $a(t)$ 是一零均值高斯 $1/f$ 过程, 其特征谱为

$$S_a(f) \propto f^{-\alpha} \quad (4)$$

如果 $1 < \alpha < 3$, 此过程有一个稳定的增量, 对许多一定尺度上的地球物理场, 通常是这种情况。仅考虑大气和高斯白噪声误差, 我们有以下形式

$$r(t) = a(t) + w(t) \quad (5)$$

其中 $w(t)$ 是一零均值高斯白噪声, 由此分解出一组小波系数

$$r = \{r_n^m, m \in M, n \in N(m)\} \quad (6)$$

其中 m 和 n 为伸缩和平移指数, $M \{1 \dots M\}$ 是所涉及的尺度(子带), $N(m)$ 是每一子带的样本数。 M 受数据的样本总数和滤波器长度限制^[8]。假定分析小波有足够的消失矩, 这些量就是高度不相关的、互相独立的零均值高斯随机变量^[1]。方差是尺度的函数

$$\text{var } r_n^m = \sigma_m^2 = \sigma_a^2 \cdot 2^{-\gamma m} + \sigma_w^2 \quad (7)$$

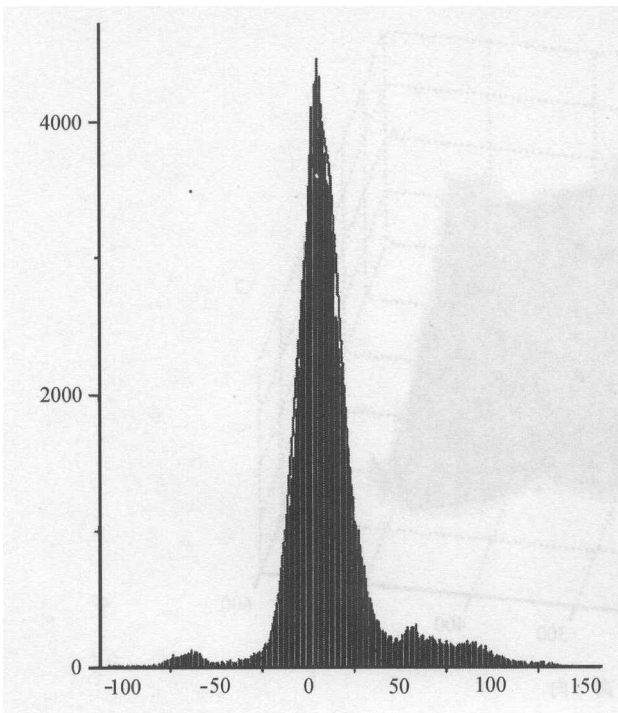


图 1 由 InSAR 所提取的两 DEM 的误差直方图 (所加曲线为高斯拟合曲线,标准差为 11m)

Fig.1 Histogram of the error between two InSAR DEM's computed for the test area

通常,需要估计参数集 $\Theta = \{\alpha, \sigma_a^2, \sigma_w^2\}$,通过上节介绍的参数估计算法就可以得到其最大似然解。在我们所研究的情况下,因为处理的是大气湍流现象,我们认为 α 是已知的,并等于 $8/3$ 。这只是一个近似,因为 α 会因位置的不同在平均值附近做波动。因此便有以下公式

$$\hat{P}_{ij}^m = (\sigma_{ai}^2 + \sigma_{aj}^2) \cdot 2^{-(8/3)m} + (\sigma_{wi}^2 + \sigma_{wj}^2) \quad (8)$$

其中

$$\hat{P}_{ij}^m = \frac{1}{N(m)} \sum_{n \in N(m)} (r_n^m)^2$$

$m \in M, N(m)$ 为尺度 m 的样本数, i, j 是用于生成误差图的 DEM 编号,如果 $N > 2, NE > N$,我们就有足够

的方程解出 $\{\hat{\sigma}_{ai}^2, \hat{\sigma}_{wi}^2 | i = 1 \cdots N\}$ 。

3.2 小波域权重平均

上节所述的过程可以得到对应于每一 DEM 的噪声功率的估计值,也可得到大气畸变功率,一旦得到了 $\{\hat{\sigma}_{ai}^2, \hat{\sigma}_{wi}^2, i = 1 \cdots NI\}$,就可以通过权重平均的方法得到合成地形。最后一步同样也在小波域中进行。

设第 i 个 DEM 的小波系数,来自 3 个分量

$$(d_n^m)_i = t_n^m + (a_n^m)_i + (w_n^m)_i \quad (9)$$

t_n^m 为地形分量, a_n^m 为大气分量, w_n^m 为噪声分量,由于高斯变量 a_n^m 和 w_n^m 的方差可以由(8)式计算, t_n^m 可以由最大似然高斯估计得到

$$\hat{t}_n^m = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(d_n^m)_i}{\sigma_{\min}^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{\min}^2}} \quad (10)$$

其中

$$\sigma_{\min}^2 = \hat{\sigma}_{ai}^2 \cdot 2^{-\gamma m} + \hat{\sigma}_{wi}^2 \quad (11)$$

再者,地形本身也可以看作 $1/f$ 过程,系数 t_n^m 也是高度不相关的,我们可以独立处理每一样本。

4 试验数据结果

将试验区选在河北省尚义县地区约 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的一块区域,图 2 是 1984 年出版的玫瑰营子幅和黄茂营幅的 1:5 万地形图经数值化后该地区的三维图,作为参考 DEM。使用 12 景 ERS-1 和 ERS-2 的 SAR 数据生成 6 张 DEM,如图 3(a)–(f)所示,有关 SAR 数据的轨道号、获取日期和干涉对的垂直基线长度列在表 1 中。在数据的处理过程中,我们在方位向以 6 个像元进行了平均。DEM 的大小均为 512×512 ,6 张 DEM 和参考 DEM 经过了严格的配准。

表 1 试验所用的数据集 (Track: 304, Frame: 2781)

Table 1 InSAR data set

DEM 编号	主图像			辅图像			垂直基线长度/m
	传感器	轨道号	日期	传感器	轨道号	日期	
DEM1	ERS-1	32356	1997-09-22	ERS-2	12683	1997-09-23	- 367.4
DEM2	ERS-1	08465	1993-02-27	ERS-1	08966	1993-04-03	- 154.8
DEM3	ERS-1	09968	1993-06-12	ERS-1	10469	1993-07-17	128.4
DEM4	ERS-1	09467	1993-05-08	ERS-1	09968	1993-06-12	- 404.7
DEM5	ERS-2	16190	1998-05-26	ERS-2	16691	1998-06-30	492.5
DEM6	ERS-2	32356	1997-09-22	ERS-2	16691	1998-06-30	- 209.9

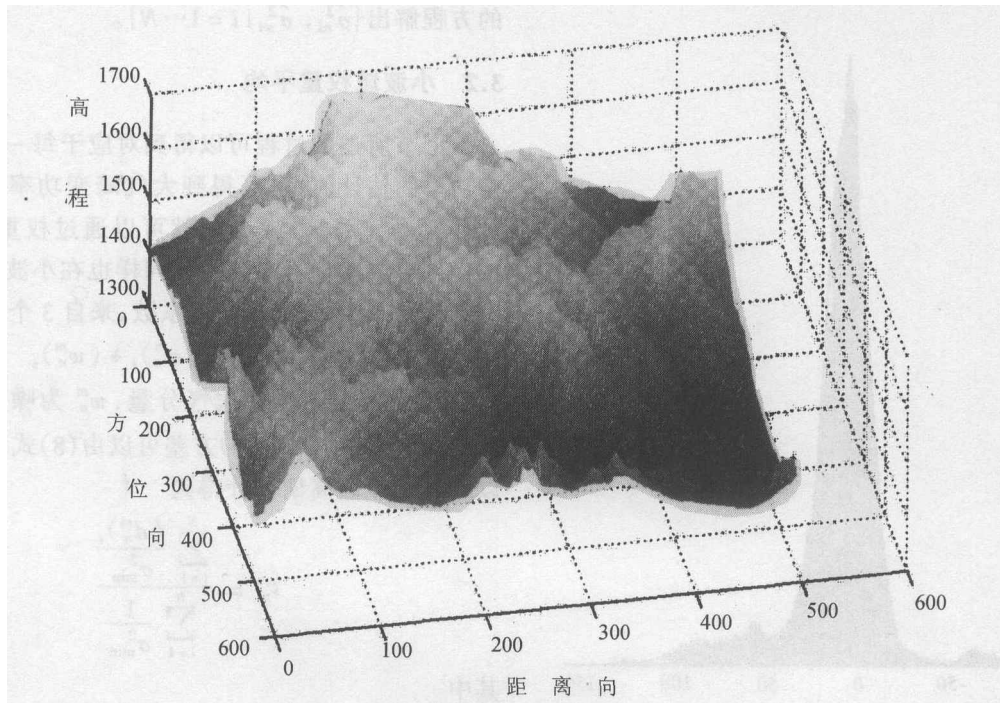


图 2 试验区三维地形(参考 DEM)

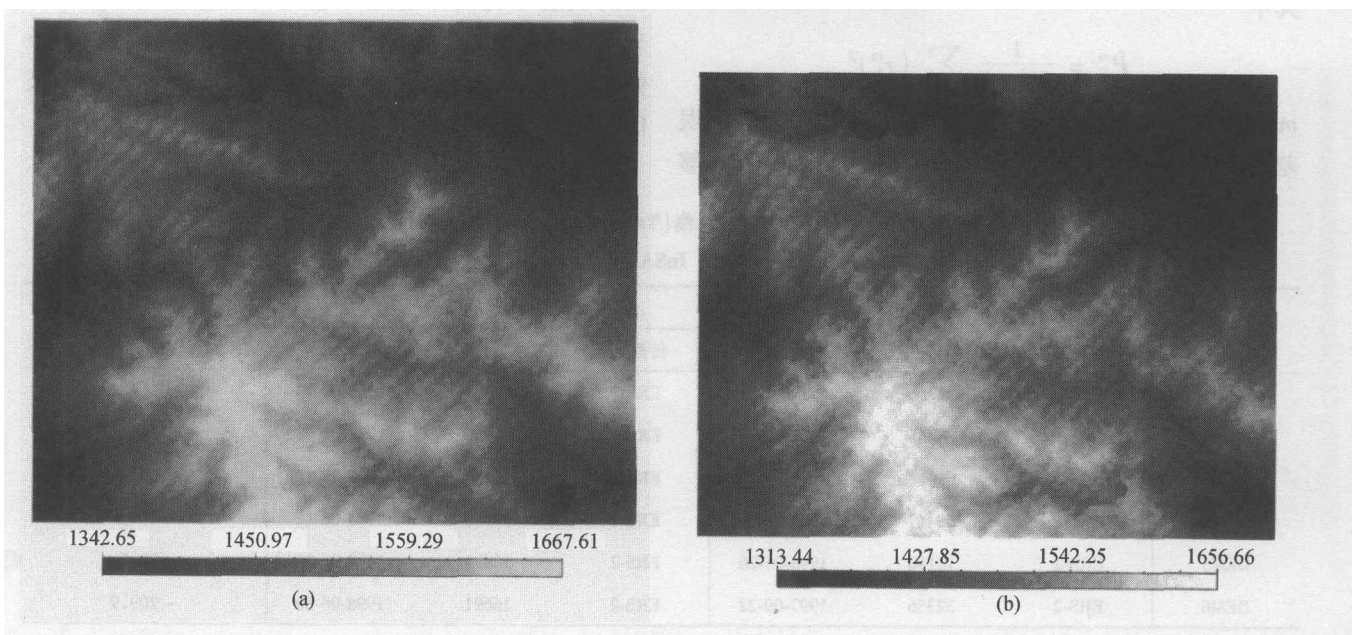
Fig.2 Perspective map of test area(as a reference DEM)

在我们所用的 6 个时相的数据中,32356 幅与 12683 幅为串行数据,相干性最高(图 4 为其相干系数图),相位噪声较小,在误差分析中,把它和合成后的 DEM 作比较。

我们用 DB5 小波将 6 张 DEM 均进行小波变换至 5 层,在每一层内都进行两两相减形成 15 个误差图。利用上节介绍的方法,由每一层的误差图可以估计大气和噪声的误差功率,再由(10)式估计小波系数的地表分量 t_n^m ,用 t_n^m 重建 DEM,就可以消除噪

声和大气的影响。经融合后的 DEM 如图 5。

我们以参考 DEM 为基准,生成 DEM1 和融合后的 DEM 误差绝对值图,如图 6(a)–(b)所示。比较两图可见,融合后的 DEM 误差绝对值由 101m 降至 68m,范围明显缩小,证明我们针对 $1/f$ 相位噪声和大气误差因素设计的算法对于提高 DEM 的精度是有效的。但是在我们所使用的数据中,其中 5 对不是串行数据,数据对存在大范围的低相干区,这势必影响了融合效果。



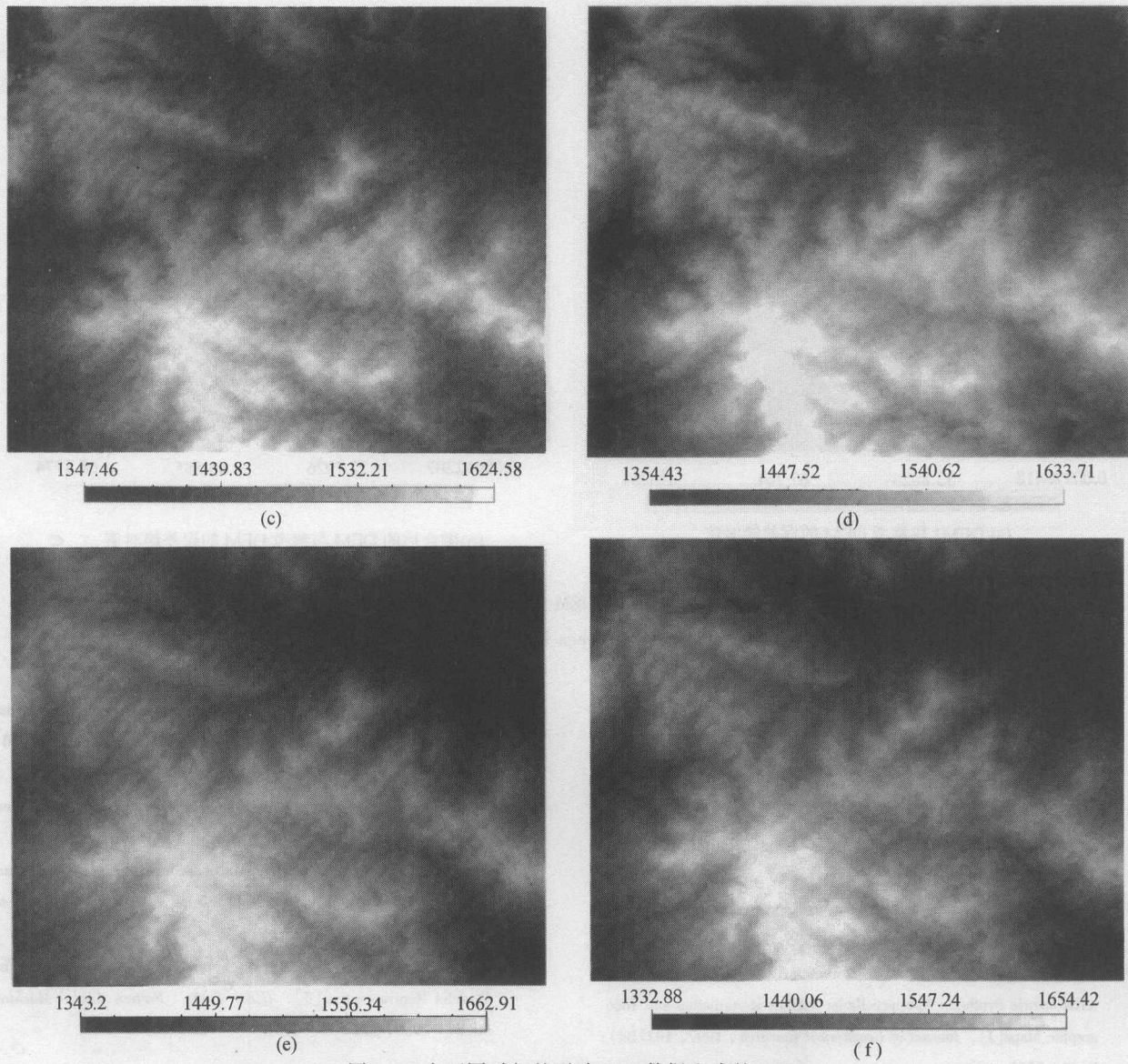


图 3 6 个不同时相的干涉 SAR 数据生成的 DEM
 Fig.3 DEMs extracted from six temporal InSAR data

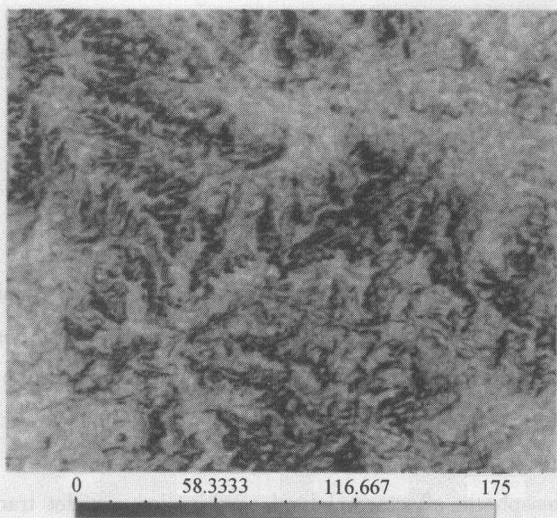


图 4 相应于 DEM1 的相干系数图
 Fig.4 Coherency map related to DEM1

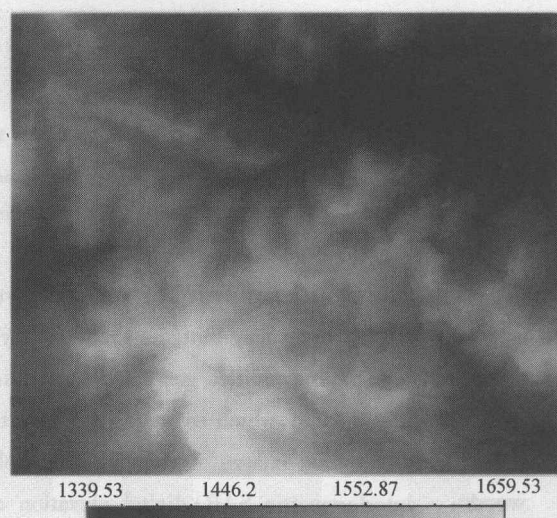


图 5 融合后的 DEM
 Fig.5 Combined DEM

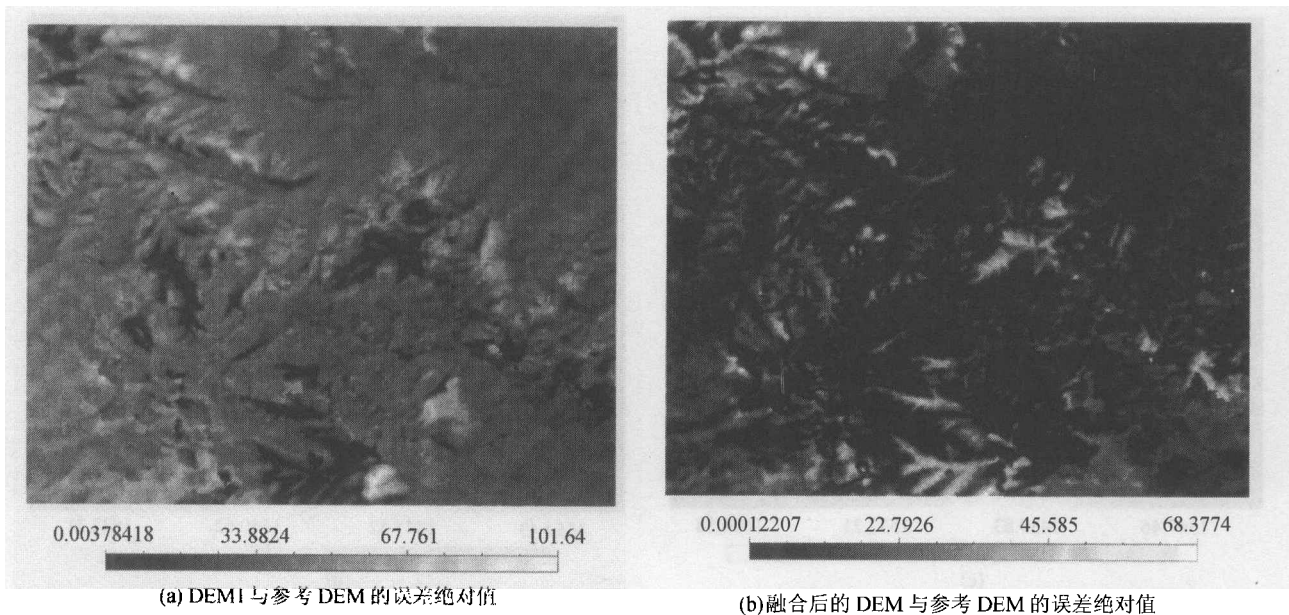


图 6 与参考 DEM 比较的误差图

Fig. 6 Difference (in meters) between InSAR DEMs and reference DEM

参 考 文 献 (References)

- [1] Wornell G W. Wavelet-based Representations for the $1/f$ Family of Fractal Processes. *Proc. IEEE*[J]. 1993, **81**(10): 1428—1450.
- [2] Massonnet D, Feigl K L. Discrimination of Geophysical Phenomena in Satellite Radar Interferograms[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(12): 1537—1540.
- [3] Goodstein R. Atmospheric Limitation to Repeat-track Radar Interferometry[J]. *Geophysics. Res. Lett.*, 1995, **22**(18): 2517—2530.
- [4] Zebker H A, Rosen P A, Hensley Scott. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Derormation and Topographic Maps[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(B4): 7547—7563.
- [5] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, **30**: 950—959.
- [6] Tatarskii V I. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. New York: Dover, 1961.
- [7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: The Wavelet Approach[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, **37**(2): 705—715.
- [8] Mallat S G. A Theory for Multi-resolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1989, **11**: 674—693.

Multi-temporal Interferometric SAR Data Fusion Based on Wavelet

YUE Huan-yin, GUO Hua-dong, WANG Chang-lin, LIAO Jing-juan, YAN Fu-li

(Laboratory of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing, 100101, China)

Abstract: Interferogram images derived from spaceborne synthetic aperture radar system exhibit artifacts due to noise and atmospheric effects, which may mitigate the accuracy of the result DEM. In this paper, we present a method to combine uncorrelated topographic profiles generated by multi-temporal interferometric SAR data, this weighted combination is carried out in wavelet domain, which estimates the distortion power, of noise and atmosphere and improves the accuracy of final DEM with interferogram images of Shangyi area, Hebei province as test data.

Key words: interferometric SAR; digital elevation model; atmospheric effects; weighted combination wavelet transform, accuracy