

多基线 InSAR 干涉相位的自适应估计*

聂俊岚, 杨敏

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 针对不均衡噪声下相位解缠稳健性低的缺点, 采用加权联合数据矢量作为信号模型, 利用构造的噪声协方差矩阵进行自适应去噪处理, 进而对相位进行估计, 有效地改善了不均衡噪声下多基线相位估计的效果。仿真数据的处理结果表明, 该算法提高了不均衡噪声下相位估计的稳健性。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 多基线相位估计; 噪声协方差矩阵; 误差矩阵范数; 高程数据

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)05-1928-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.05.093

Adaptive estimate method for multi-baseline InSAR phase

NIE Jun-lan, YANG Min

(College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: Aiming at the low robustness of the phase unwrapping algorithm under uneven noise conditions, constructed a new adaptive covariance matrix based on the model of the multibaseline optimal weighted data (MOWJD) vector, and removed the noise by noise covariance matrix. Then reduced the uneven noise impact on phase unwrapping. The experimental results show that the phase unwrapping robustness is improved.

Key words: interferometric synthetic aperture radar; multibaseline phase unwrapping; noise covariance matrix; error matrix; elevation data

目前卫星的多基线干涉合成孔径雷达 (M-InSAR) 系统在获取高质量的地面高程数据方面具有极高的应用价值, 已成为 InSAR 信号处理领域的一个重要发展方向^[1,2]。但现有的相位估计算法在多基线 InSAR 系统中噪声不均衡的条件下, 大多不能对相位干涉 (即相位解缠) 进行准确估计。因此, 非均衡噪声下的相位解缠就成为了研究 M-InSAR 获取地形高度的关键。

在多基线相位解缠方面, Ghiglia 等人^[3]提出先对干涉相位加权平均, 再利用传统的相位解缠方法对多基线相位进行解缠, 为多基线相位解缠提供了新的途径, 但相位解缠的精度较低。随着研究的深入, 对多基线相位干涉集中于以下两种解缠方法: 一种是首先获得多幅 SAR 图像的精确配准, 然后再进行相位解缠^[4], 但获取精确配准的图像较为困难; 另一种是首先用粗精度的地形高程估计干涉相位的模糊数, 然后用干涉相位的主值和模糊数进行相位解缠^[5], 但这种方法计算过程较为繁琐。2009 年, Mao 等人^[1]采用加权联合数据矢量的方法解决了维数估计的问题, 在一定程度上改善了多基线相位解缠的精度, 虽然采用对观测测量加权的方法, 对噪声有一定的抑制, 但由于是在假设噪声功率相同的前提下进行研究的, 相位估计的稳健性不高。

为满足多基线 InSAR 系统中不均衡噪声条件下相位解缠的需要, 在前人的基础上提出一种自适应协方差矩阵的多基线相位解缠算法。在相位解缠的过程中, 根据不同卫星同一像素噪声的大小剔除不均衡噪声, 并提高相位解缠的稳健性。

1 信号模型

根据相位干涉的随机特性, 采用加权联合数据矢量作为信号模型进行研究, 可以满足在低配准精度条件下进行相位解缠的要求。

假设 P 幅 SAR 图像已得到粗配准, 且已去平地相位, 对于坐标为 i 的同一像素, 加权观测矢量 $X(i, w)$ ^[1] 在不均衡噪声下的定义为:

$$X(i, w) = [x_1(i, w), x_2(i, w), \dots, x_K(i, w)] = A_i \odot S(i, w) + N(i, w) \quad (1)$$

其中: $x_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 为第 k 颗卫星所对应的加权复图像数据。

$$A_i = [a_i(\varphi_1), a_i(\varphi_2), \dots, a_i(\varphi_k)] \quad (2)$$

表示像素 i 的阵列导向矩阵, 其中, 第 k 个方向向量 $a(\varphi_k)$ 具有以下结构: $a(\varphi_k) = [1, e^{j\varphi_k}, e^{j\frac{B_{13}\varphi_k}{B_{12}}}, \dots, e^{j\frac{B_{1K}\varphi_k}{B_{12}}}]^T$ 。 $B_{1k} (k = 2, 3, \dots, K)$ 表示第 k 颗卫星与第 1 颗卫星 (即参考卫星) 之间的垂直基线, φ_k 为第 k 颗卫星与第 1 颗卫星之间的绝对干涉相位。 $S(i, w) = [s_1(i, w), s_2(i, w), \dots, s_K(i, w)]$ 表示像素 i 的加权复后向散射系数矩阵。经重新定义, $N(i, w)$ 为噪声不均衡条件下的加权噪声矩阵, T 表示转置, \odot 为 Hadamard 积。

根据式 (1), 观测矢量 $X(i, w)$ 的加权协方差矩阵为

$$C_s(i, w) = E\{X(i, w)X^H(i, w)\} = A_i R_s(i, w) A_i^H + Q(i, w) \quad (3)$$

其中: $R_s(i, w)$ 为像素 i 的相关系数矩阵; $Q(i, w)$ 为噪声协方

收稿日期: 2009-09-06; 修回日期: 2009-11-23 基金项目: 国家“863”计划资助项目

作者简介: 聂俊岚 (1962-), 女, 湖北人, 教授, 博士, 主要研究方向为空天信息可视化、计算机仿真; 杨敏 (1984-), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为空天信息可视化 (ymyhome@126.com)。

差矩阵; $E\{\}$ 表示 $x(i,w)$ 的期望。

2 自适应相位解缠

由于受到大气抖动、卫星的飞行姿态、地球自转等多种因素的影响,不同卫星之间很难保证有相同的噪声功率,而在噪声功率不均衡时,相位解缠的结果就会明显受噪声功率的影响,甚至会导致解缠失败。

2.1 构造自适应协方差矩阵

根据 M-InSAR 系统噪声分布的不均衡性,采用自适应协方差矩阵进行相位解缠,以达到抑制不均衡噪声的目的。

首先对样本协方差矩阵进行估计,以获得自适应协方差矩阵的初值:

$$C_1(i,w) = \frac{1}{2M+1} \sum_{m=-M}^M X(i+m,w) X^H(i+m,w) \quad (4)$$

其中; $2M+1$ 为从相邻(包括距离向和方位向)像素中获得独立同分布的样本数,且满足 $2M+1 \geq 2K+1$ 。

经过 $t-1$ 次迭代,噪声协方差矩阵 $Q_{t-1}(i,w)$ 按照 $[L,L, M-2L]$ (其中 $L = (K - K \bmod 3)/3$) 进行分块,则有 $Q_{t-1}(i,w) = blk \text{diag}(Q_1, Q_2, Q_3)$ 。

先对噪声协方差矩阵对角线元素的最后 $K-2L$ 个元素进行估计。将 C_{t-1} 按照 $[L,L,K-2L]$ 进行分块为

$$C_{t-1} = \begin{pmatrix} * & * & * \\ C_1 & * & C_3 \\ C_2 & * & C_4 \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中 * 为与计算无关的量。

将 A 的行按 $[L,L,K-2]$ 分块为 $A = [A_1^T, A_2^T, A_3^T]^T$ 。由式(4)分别可得出

$$C_1 = A_2 R_{t-1} A_1^*, C_2 = A_3 R_{t-1} A_1^* \\ C_3 = A_2 R_{t-1} A_3^*, C_4 = A_3 R_{t-1} A_3^* + Q_3$$

经过推导可得

$$Q_3 = C_4 - C_2 C_1^{-1} C_3 \quad (6)$$

下面对噪声协方差矩阵对角线上的前 $2L$ 个元素进行估计。定义转换矩阵 $T = [I_{3L \times 3L}, 0_{3L \times (K-3L)}]$ 。其中, $I_{3L \times 3L}$ 为单位矩阵, $0_{3L \times (K-3L)}$ 为零矩阵,则有

$$C'_{t-1} = T C_{t-1} T^T = T A R_{t-1} A^H T^T + T Q T^T = B R_{t-1} B^H + Q'_{t-1}$$

将 C'_{t-1} 进行分块为 $C'_{t-1} = \begin{pmatrix} C_{11} & X_1 & X_2 \\ X_3 & C_{22} & X_4 \\ X_5 & X_6 & C_{33} \end{pmatrix}$, 并且 $B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}$,

则 $Q'_{t-1} = \begin{pmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{pmatrix}$ 。可以得出

$$C_{11} = Q_1 + B_1 R_{t-1} B_1^*, C_{22} = Q_2 + B_2 R_{t-1} B_2^* \\ X_4 = B_2 R_{t-1} B_3^*, X_5 = B_3 R_{t-1} B_1^*。$$

由此可得:

$$Q_1 = C_{11} - X_2 X_4^{-1} X_3 \quad (7)$$

$$Q_2 = C_{22} - X_3 X_2^{-1} X_6 \quad (8)$$

根据式(6)~(8)可以得出,第 $t-1$ 次迭代所得噪声协方差矩阵的近似估计值为

$$Q_{t-1}(i,w) = \begin{bmatrix} C_{11} - X_2 X_4^{-1} X_3 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} - X_3 X_2^{-1} X_6 & 0 \\ 0 & 0 & C_4 - C_2 C_1^{-1} C_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则第 t 次迭代所得自适应协方差矩阵可用下式进行计算

$$C_t = Q_t^{-1/2} C_{t-1} Q_t^{-1/2} \quad (10)$$

2.2 构造误差矩阵范数

根据噪声的不均衡性,在噪声水平较高处,噪声剔除的力度要大,迭代的次数就会多;而噪声水平较低处,噪声剔除力度要小,迭代次数就会少。

采用误差矩阵范数判别迭代次数,控制不同像素点噪声的剔除力度。误差矩阵范数定义如下:

$$\lambda = \|U\|_{m_1} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K |c_{t(i,j)} - c_{t-1(i,j)}| \quad (11)$$

其中; $U = C_t - C_{t-1}$; $\| \cdot \|_{m_1}$ 表示矩阵的 m_1 范数; $c_{t(i,j)}$ 为矩阵 C_t 坐标为 (i,j) 的元素。

如果在误差矩阵范数 λ 高于某一给定的允许值 ϵ 时(即 $\lambda > \epsilon$),则认为协方差矩阵不可信,并继续构造新的协方差矩阵,再次计算误差矩阵范数。如果重新计算的误差矩阵范数低于允许值(即 $\lambda \leq \epsilon$),则采用该次迭代结果。

2.3 绝对干涉相位的估计

自适应协方差矩阵得到精确估计后,采用如下代价函数进行估计

$$J = a(\varphi_i)^H C_t(i,w) a(\varphi_i) \quad (12)$$

由式(12)估计绝对干涉相位,该式取得最大值时所对应的 φ_i 即为绝对干涉相位估计结果($\varphi_i = \varphi_i$)。

2.4 相位解缠流程

根据以上模型可以完成自适应噪声协方差相位解缠,基本流程如图 1 所示。

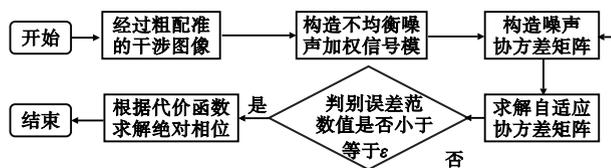


图 1 相位解缠基本流程图

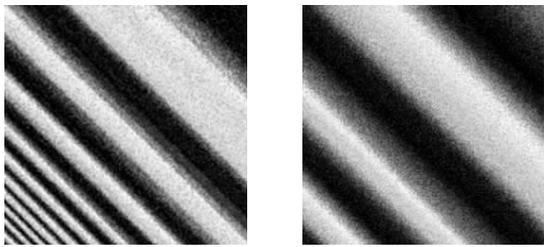
根据图 1 所示的流程,针对 SAR 图像的每一个像素进行相位估计,就可以获得整幅 SAR 图像高精度相位展开的结果。

3 实验结果及分析

实验选择由某斜坡 DEM 模拟得到的三幅 SAR 图像所产生的干涉图像作为仿真相位原始数据,并为其加入均方差分别为 0.21,0.26,0.35 的噪声。对三幅图像进行配准、相位干涉、相位解缠等步骤的处理。干涉图像如图 2 所示。部分仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真基本参数

单位	信号			卫星		
	卫星中心频率 /Hz	视角 /°	卫星高度 /km	信号带宽 /Hz	波长 /m	
数据	7 503	8.9G	45	790	58M	0.16

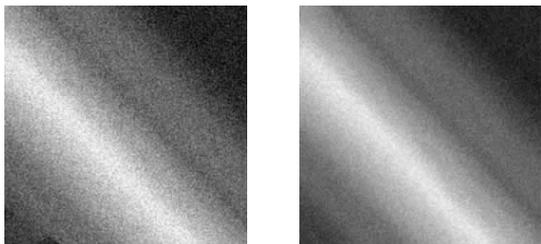


(a) SAR图1、2之间的干涉相位图 (b) SAR图1、3之间的干涉相位图

图2 仿真数据产生的两幅干涉相位图

实验结果如图3、4所示。图3为相位解缠的效果图,图4为解缠后噪声均方差随信噪比变化的曲线图。

图3是对图2干涉相位的解缠结果。从图3(a)可以看出,采用MOWJD算法进行解缠,由于不平衡噪声不能得到抑制,图中存在大量的残余点,相位解缠的水平较低,图的左下角区域局部解缠失败;(b)采用自适应噪声协方差剔除除了随机噪声,与(a)相比较为光滑,同时保持了图像的细节,解缠效果有了明显的提高。



(a) MOWJD算法相位解缠图 (b) ACMOWJD算法相位展开结果

图3 两种算法分别获得的相位展开结果

噪声协方差均方误差随信噪比的变化如图4所示。由图4可以看出,在不均衡噪声条件下,MOWJD算法抗噪性能较差,且随信噪比变化的曲线较为平滑。采用ACMOWJD剔除了噪声后,均方误差较低,可见噪声得到了有效地抑制。在噪声较低时算法性能较为接近,而在信噪比较低时,由于不平衡噪声的影响,MOWJD算法解缠性能严重受到了影响。

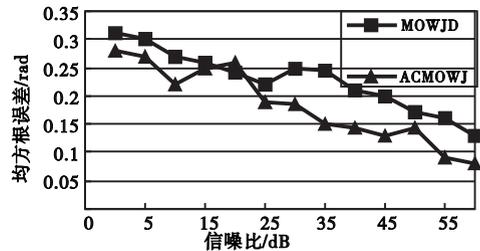


图4 噪声协方差均方误差随信噪比的变化

4 结束语

本文针对不平衡噪声下相位解缠缺乏稳健性的缺点,提出了一种新的多基线相位解缠方法,构造了自适应协方差矩阵并剔除不平衡噪声,构造误差矩阵范数控制噪声剔除的力度,在相位解缠的同时抑制噪声的干扰。仿真结果表明,该算法不但可以获得很好的相位解缠结果,而且可以大大降低对环境硬件的要求,提高了相位解缠的稳健性。

参考文献:

- [1] MAO Zhi-jie, LIAO Gui-sheng. Optimum data vector approach to multibaseline SAR interferometry phase unwrapping [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(1): 42-46.
- [2] LI Zhen-fang, BAO Zheng, SUO Zhi-yong. A joint image coregistration, phase noise suppression and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(3): 584-591.
- [3] GHIGLIA D C, WAHL D E. Interferometric synthetic aperture radar terrain elevation mapping from multiple observations [C]//Proc of Digital Signal Processing Workshop. 1994: 33-36.
- [4] REIGBER A, PRATS P, MALLORQUI J J. Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR interferometry [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 145-149.
- [5] THOMPSON D G, ROBERTSON A E, ARNOLD D V, et al. Multi-baseline interferometric SAR for iterative height estimation [C]//Proc of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S. l.]: Brigham Young University, 1999: 251-253.

(上接第 1924 页)

5 结束语

本文研究了不确定业务量矩阵下的鲁棒路由问题。给定业务量矩阵的变化范围 D 、网络拓扑信息(链路及其容量和延迟)、ISPs 指定的链路使用率门限值 r , 用本文的算法 TSSA, 可以把 D 分割成尽可能少的若干个子集合 $D_1, D_2, \dots, D_k, D^*$ 。对每一个子集合 $D_i (i = 1, 2, \dots, k)$, TSSA 可以分别求出一套最佳路由方案 $R_i (i = 1, 2, \dots, k)$, 这套最佳路由方案 R_i 可以保证 D_i 中出现的所有业务量矩阵的最大链路使用率都不超出链路使用率门限值 r ; 对于子集合 D^* 里面的 TM, 运营商需要进行扩容才能得到最大链路使用率不大于链路使用率门限值 r 的路由方案。

参考文献:

- [1] MITRA D, RAMAKRISHNA K G. A case study of multiservice, multipriority traffic engineering design for data networks [C]// Proc of IEEE GLOBECOM. 1999: 1077-1083.
- [2] ZHANG Chun, LIU Yong, GONG Wei-bo, et al. On optimal routing with multiple traffic matrices [C]// Proc of IEEE Infocom. 2005.
- [3] ZHANG Chun, GE Zhi-hui, KUROSE J, et al. Optimal routing with

multiple traffic matrices tradeoff between average and worst case performance [C]// Proc of the 13th IEEE International Conference on ICNP'05. 2005.

- [4] BEN-AMEUR W, KERIVIN H. Routing of uncertain traffic demands [J]. Optimization and Engineering, 2005, 6(3): 283-313.
- [5] APPELEGATE D, COHEN E. Making routing robust to changing traffic demands: algorithms and evaluation [J]. IEEE/ACM Trans on Network, 2006, 14(6): 1193-1206.
- [6] TABATABAEE V, KASHYAPA, BHATTACHARJEEB, et al. Robust routing with unknown traffic matrices [C]// Proc of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. 2007.
- [7] APPELEGATE D, COHEN E. Making intra-domain routing robust to changing and uncertain traffic demands: understanding fundamental tradeoffs [C]// Proc of ACM SIGCOMM. 2003.
- [8] KANDULA S, KATABI D, DAVIE B, et al. Walking the tightrope: responsive yet stable traffic engineering [C]//Proc of ACM SIGCOMM'05. 2005: 253-264.
- [9] ROUGHAN M, GREENBERG A, KALMANEK C, et al. Experience in measuring backbone traffic variability: models, metrics, measurements and meaning [C]// Proc of ACM IMW. 2002.
- [10] SPRING N, MAHAJAN R, WETHERALL D, et al. Measuring ISP topologies with rocketfuel [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2004, 12(1): 2-16.