

噪声消除算法在干涉 SAR 相位解缠中的应用研究

边 勇,周荫清

(北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100083)

摘 要: 本文把噪声消除算法应用在干涉 SAR 相位解缠中,分析了该算法的特点.为了更好地解缠干涉 SAR 数据,提出了一种改进的方法.在原有两点规则的基础上,提出了三点规则,并提出把两点规则和三点规则结合起来提高相位解缠稳健性的混合算法.该方法有效地解决了噪声消除算法在解缠质量差干涉相位图时不收敛的问题,在保持了算法的计算精度的同时提高了算法的稳健性.对仿真和真实干涉 SAR 数据的实验结果验证了本文方法的有效性.

关键词: 噪声消除算法;干涉 SAR;相位解缠

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2021-05

A Research on the Noise-Immune Algorithm for the Phase Unwrapping of InSAR Data

BIAN Yong, ZHOU Yin-qing

(School of Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The Noise-immune algorithm is applied to unwrap the InSAR data. The characteristic of the Noise-immune algorithm is analyzed. In order to get a better result in the unwrapping of the InSAR data using the Noise-immune algorithm, a refinement is presented. Based on the two-point criterion, the three-point criterion is presented. In order to improve the stability of phase unwrapping, we present a hybrid algorithm which is formed by combining the two-point criterion and three-point criterion. When unwrapping the interferogram of bad quality, the two-point method may be not convergent, the hybrid algorithm can solve this problem. The hybrid algorithm can improve the stability of phase unwrapping without losing the accuracy. The computer simulation result of the simulated data and true InSAR data proves the validity of our algorithm.

Key words: noise-immune algorithm; interferometric SAR; phase unwrapping

1 引言

干涉 SAR 相位解缠是干涉 SAR 应用中的重要技术,相位解缠的精度直接影响数字高程图的精度.由于干涉 SAR 数据中存在噪声、遮挡效应、坏数据的影响,使得相位解缠难以得到理想的结果.

目前的干涉 SAR 相位解缠方法主要有分枝截断法^[1,2]、最小均方法^[2~5]、加权最小均方法^[5]、区域生长法^[6]、有限元法^[7]、细胞自动机法^[8]、格林公式法^[9]、多重网格法^[10]等.文献[11]提出了一种新的相位解缠方法——噪声消除法(noise-immune algorithm),该方法基于条纹移动理论^[11],在消除噪声的同时解缠相位.文献[11]只给出了在电子斑点模式干涉中应用该方法的结果,没有说明该方法能否适用于干涉 SAR 的相位解缠.

本文给出了噪声消除法的实现方法和解缠干涉 SAR 数

据的仿真结果,并对该方法在干涉 SAR 相位解缠中的应用进行了研究.由于在遮挡效应等情况存在时,噪声消除法解缠存在不收敛的情况,本文改进了该方法,在原有两点规则的前提下,提出了三点规则;单纯的两点规则和三点规则在相位解缠时都有缺点,本文提出了把两点规则和三点规则结合使用的混合算法,提高了相位解缠的稳健性.

2 两点规则噪声消除法

本节简单介绍 MJ Huang 提出的噪声消除法^[11],同时给出把该方法应用于干涉 SAR 相位解缠时的计算机仿真结果.

2.1 两点规则噪声消除法^[11]

在采用相位加解缠时的解缠方法为^[11]:

设 $i_{m,n}$ 为第 i 次迭代时位于 (m, n) 处的相位值.当存在一组 a, b, c, d, e, f 的值满足式(1)或式(2)时 $i_{m,n} = i_{m,n}^{-1} + 2$, 否则 $i_{m,n} = i_{m,n}^{-1}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-a, n-b \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-2a, n-2b \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-c, n-d \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-2c, n-2d \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-a, n-b \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-2a, n-2b \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-e, n-f \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i-1 \\ m-2e, n-2f \end{array} \right. \begin{array}{l} i-1 \\ m, n \end{array}$$

其中 a, b, c, d, e, f 在下列的四组数中取值:

- $a=0, b=1, c=-1, d=1, e=1, f=1;$
- $a=-1, b=0, c=-1, d=-1, e=-1, f=1;$
- $a=0, b=-1, c=1, d=-1, e=-1, f=-1;$
- $a=1, b=0, c=1, d=1, e=1, f=-1.$

由于上述方法是对距待解缠像素两点范围内的数据进行判断的,即根据图 1 的待解缠像素周围的 $A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1、D2、E1、E2、F1、F2、G1、G2、H1、H2$ 点来判断的.为了与本文提出的方法对照,作者称其为两点规则.

2.2 使用两点规则解缠干涉 SAR 数据的计算机仿真

仿真机载干涉 SAR 数据,仿真参数如表 1 所示.

由于视角较大,有较严重的遮挡效应,图 2(a) 右侧的数据没有有效的相位信息.采用两点规则的解缠结果如图 2(b)~(e) 所示,图 2 的大小均为 256×256 ,后面文中除三维图外与此大小相同.

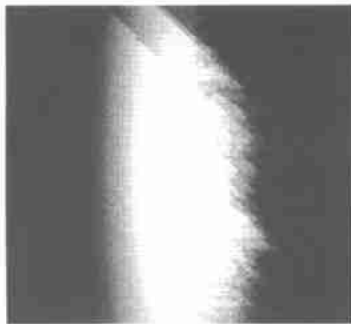
从图 2 的解缠结果可以看出,由于仿真数据中存在严重的遮挡效应,解缠时该方法出现了不收敛的现象,解缠效果不好,可见在此情况下两点规则的解缠稳健性不够好.解缠时发生不收敛的原因是由于解缠时两点规则只判断与待解缠像素点相距两点内的像素有相位跳跃就进行相位加操作,判断条件比较宽松,在相位质量差时会比较容易地受到坏数据的影响.

$H3$			$G3$		$F3$
	$H2$		$G2$		$F2$
		$H1$	$G1$	$F1$	
$A3$	$A2$	$A1$	待解缠 像素点	$E1$	$E2$ $E3$
		$B1$	$C1$	$D1$	
	$B2$		$C2$		$D2$
$B3$			$C3$		$D3$

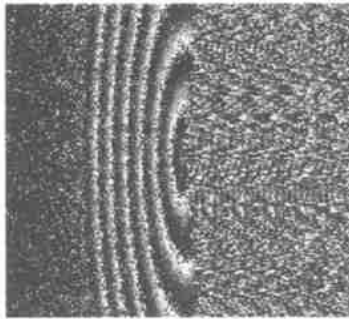
图 1 两点规则和三点规则

表 1 仿真参数

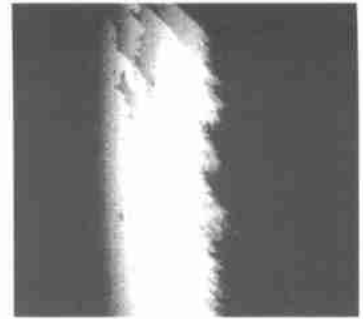
仿真参数	数值	单位
波长	0.02	米
极距基线	6000	米
基线	10	米
载机速度	220	米/秒
载机飞行高度	6600	米
脉冲重复频率	700	Hz
视角	62.5	度



(c) 15次迭代



(a) 干涉纹图



(b) 4次迭代



(d) 50次迭代



(e) 250次迭代

图 2 干涉纹图和采用两点规则的解缠结果

3 三点规则噪声消除法

3.1 三点规则噪声消除法

为了提高两点规则的稳健性,可以扩大信息提取范围,把信息提取范围扩大到与待解缠像素点相距三点的范围.如图 1 所示,根据图 1 的待解缠像素周围的 $A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2、C3、D1、D2、D3、E1、E2、E3、F1、F2、F3、G1、G2、G3、H1、H2、H3$ 点来判断是否进行相位加操作,我们称之为三点规则.

此时式(1)、(2)应改为式(3)、(4),其他的条件不变,式

(3)、(4)中符号的意义与式(1)、(2)相同.由于扩大了信息提取范围,解缠的速度降低,但解缠的稳健性大大提高.

$$\left\{ \begin{array}{l} k-1 \\ m, n \end{array} \right. \begin{array}{l} k-1 \\ m-a, n-b \end{array} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k-1 \\ m, n \end{array} \right. \begin{array}{l} k-1 \\ m-2a, n-2b \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k-1 \\ m, n \end{array} \right. \begin{array}{l} k-1 \\ m-3a, n-3b \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k-1 \\ m, n \end{array} \right. \begin{array}{l} k-1 \\ m-c, n-d \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k-1 \\ m, n \end{array} \right. \begin{array}{l} k-1 \\ m-2c, n-2d \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k-1 \\ m, n \end{array} \right. \begin{array}{l} k-1 \\ m-3c, n-3d \end{array}$$

$$\begin{cases} k-1 & k-1 & - \\ m, n & m-a, n-b & - \\ k-1 & k-1 & - \\ m, n & m-2a, n-2b & - \\ k-1 & k-1 & - \\ m, n & m-3a, n-3b & - \\ k-1 & k-1 & - \\ m, n & m-e, n-f & - \\ k-1 & k-1 & - \\ m, n & m-2e, n-2f & - \\ k-1 & k-1 & - \\ m, n & m-3e, n-3f & - \end{cases} \quad (4)$$

3.2 三点规则的计算机仿真

仿真参数与表 1 相同,干涉纹图见图 2(a),采用三点规则的仿真结果如图 3 所示.从图 3 可以看出,三点规则解缠速度慢于两点规则,但解缠稳定性好.对比图 2 和图 3 还可以发现,在干涉条纹密集处两点规则解缠效果较好;在干涉条纹稀疏处三点规则效果较好,但在条纹密集处难以获得正确的解缠结果;另外,两点规则消除噪声效果较好.

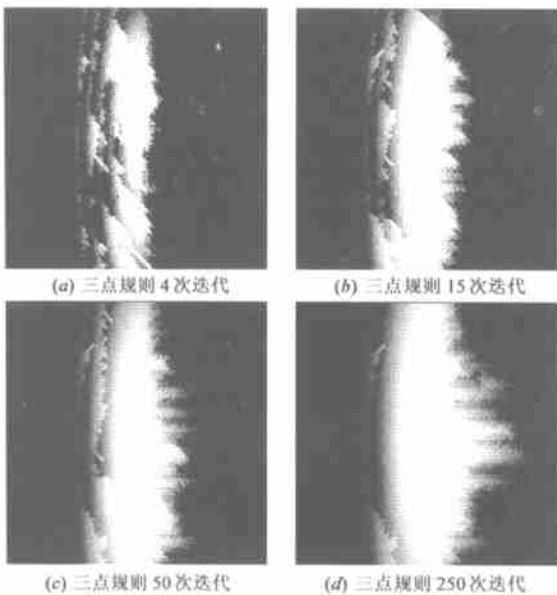


图 3 采用三点规则解缠结果

4 混合噪声消除法

4.1 混合噪声消除法

通过以上分析可知,两点规则方法和三点规则方法各有优缺点,因此如果把两方法结合使用可以发挥各自的优点.由于刚开始解缠时干涉条纹较密,在几次迭代后条纹变稀,可以在前几次采用两点规则,在后面采用三点规则,即为混合噪声消除法.这样在前面几次迭代中消除噪声的影响,在后面发挥三点规则稳健性好的优点,可以取得更好的解缠效果.

4.2 混合噪声消除法的计算机仿真

为了验证以上分析的正确性,仿真实验如下.仿真参数见表 1,干涉纹图见图 2(a).前三次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 200 次.解缠结果如图 4(a) 所示,对应的三维图如图 4(b) 所示.

从仿真结果可知,混合算法可以提高相位解缠的稳健性,得到较好的解缠结果;混合算法既可以解决两点规则在解缠

差质量数据时不收敛的问题,又可以解决三点规则在条纹过密处不能正确解缠的问题.

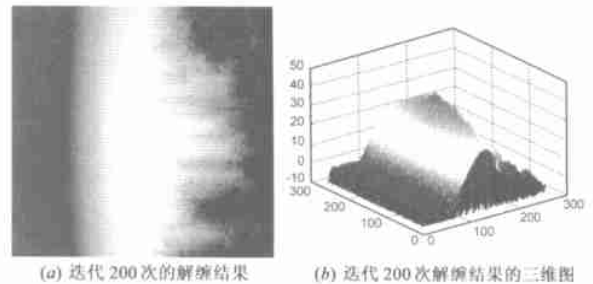


图 4 混合噪声消除法的仿真结果

5 混合噪声消除法的解缠精度分析

5.1 混合噪声消除法解缠精度分析仿真实验

从上面的仿真结果可知,混合算法的解缠稳健性优于两点算法,为了比较混合算法和两点算法在各种条件下的解缠精度,进行计算机仿真实验如下.在实验 1 和实验 2 中采用同样的较稀疏的干涉条纹,实验 2 的噪声大于实验 1.在实验 3 和实验 4 中采用同样的较密的干涉条纹,实验 4 的噪声大于实验 3.

5.1.1 计算机仿真实验 1 仿真加高斯噪声数据,噪声方差为 0.3,干涉条纹较稀疏.缠绕前相位如图 5(a) 所示.加高斯噪声的缠绕相位如图 5(b) 所示.采用两点规则和混合算法的解缠精度如表 2 所示.

表 2 仿真实验 1 的解缠精度

	全部采用两点规则,共迭代 100 次	全部采用两点规则,共迭代 200 次	前三次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 100 次	前三次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 200 次
相位解缠的精度(均方误差)	0.1920949	3.447843×10^{-2}	0.1877519	3.445176×10^{-2}

5.1.2 计算机仿真实验 2 仿真加高斯噪声数据,噪声方差为 0.5,干涉条纹较稀疏.缠绕前相位如图 5(a) 所示.加高斯噪声的缠绕相位如图 6 所示.采用两点规则和混合算法的解缠精度如表 3 所示.

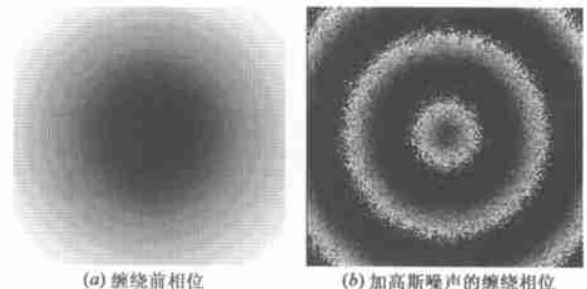


图 5 缠绕前相位和加高斯噪声的缠绕相位

表 3 仿真实验 2 的解缠精度

	全部采用两点规则,共迭代 50 次	全部采用两点规则,共迭代 200 次	前 10 次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 50 次	前 10 次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 200 次
相位解缠的精度(均方误差)	0.3709208	6.538273×10^{-2}	0.3691345	6.472851×10^{-2}

5.1.3 计算机仿真实验 3 仿真加高斯噪声数据,噪声方差为 0.3,干涉条纹较密集. 缠绕前相位如图 7(a) 所示. 加高斯噪声的缠绕相位如图 7(b) 所示. 采用两点规则和混合算法的解缠精度如表 4 所示.

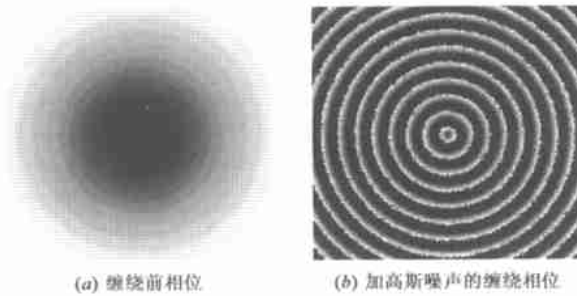


图 7 缠绕前相位和加高斯噪声的缠绕相位

5.1.4 计算机仿真实验 4 仿真加高斯噪声数据,噪声方差为 0.5,干涉条纹较密集. 缠绕前相位如图 7(a) 所示. 加高斯噪声的缠绕相位如图 8 所示. 采用两点规则和混合算法的解缠精度如表 5 所示.

表 4 仿真实验 3 的解缠精度

	全部采用两点规则,共迭代 50 次	全部采用两点规则,共迭代 200 次	前三次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 50 次	前三次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 200 次
相位解缠的精度(均方误差)	0.3386798	2.320946×10^{-2}	0.3390047	2.265564×10^{-2}

表 5 仿真实验 4 的解缠精度

	全部采用两点规则,共迭代 100 次	全部采用两点规则,共迭代 200 次	前五次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 100 次	前五次采用两点规则,后面采用三点规则,共迭代 200 次
相位解缠的精度(均方误差)	0.1759397	2.565310×10^{-2}	0.1796717	2.432183×10^{-2}

5.2 仿真结果分析

通过实验 1 和实验 2 可以检验混合算法和两点算法对条纹稀疏时不同噪声情况下的解缠效果;通过实验 3 和实验 4 可以检验混合算法和两点算法对条纹密集时不同噪声情况下

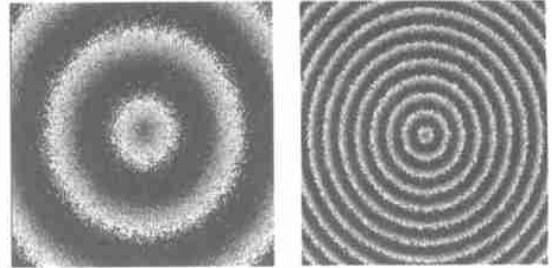


图 6 加高斯噪声的缠绕相位 图 8 加高斯噪声的缠绕相位

的解缠效果. 仿真实验 1 的结果说明在干涉条纹稀疏且噪声不大时,混合算法的精度等于或高于两点规则;从仿真实验 2 的结果可知,在噪声较大的时候,需适当增加两点规则的迭代次数,即增大消除噪声的力度,此时混合算法的解缠精度等于或高于两点规则;仿真实验 3 的结果说明在干涉条纹密集且噪声不大时,混合算法的精度等于或高于两点规则;仿真实验 4 的结果说明在干涉条纹密集且噪声较大时,在调整两点规则的迭代次数后,混合算法的精度等于或高于两点规则. 以上分析说明对于不同的条纹密度和噪声大小,需要调整两点规则的迭代次数,若噪声较小时,应采用较小的迭代次数;若噪声较大时,应增加两点规则的迭代次数. 另外,若两点规则的迭代次数选择不当,会降低相位解缠的精度,此时混合算法的解缠精度有可能略低于两点规则.

由于噪声等因素的影响,干涉条纹的稀疏程度的自动判断方法较为复杂,本文采用人工干预的方法.

从仿真实验可知,混合算法的解缠精确性相当于或略优于两点算法. 因为仿真实验 1~4 考虑了实际干涉 SAR 数据的大部分情况,所以在真实干涉 SAR 相位解缠中混合算法的精确性可以得到保证. 另外,真实干涉 SAR 数据会受到遮挡、噪声等的影响,此时两点算法可能不收敛,而更稳健的混合算法可以得到较好的解缠效果.

5.3 混合噪声消除法的解缠精度与噪声方差、迭代次数的关系

图 9 给出了混合算法的相位解缠精度与噪声方差、迭代次数之间的关系. 从图 9 可以看出:

- (1) 在相同的噪声方差下,在一定的迭代次数范围内,随着迭代次数增加相位解缠精度提高;当迭代次数增大到一定程度后,解缠精度趋于稳定;
- (2) 随着噪声方差的增大,相位解缠的精度降低.

6 ERS-1/2 真实数据的解缠结果

为了更好地验证混合算法的有效性,解缠真实干涉 SAR 数据,采用的数据为 ERS-1/2 数据. 图 10(a) 为去平地后的干涉纹图,干涉数据的噪声较大,没有进行去噪声处理;图 10(b) 为采用混合算法(前 10 次采用两点规则,后面采用三点规则,由于此真实数据的噪声较大,两点规则的迭代次数较多),共迭代 300 次的解缠结果,图 10(c) 为相应的三维图. 从图 10 可以看出,在对真实干涉 SAR 数据相位解缠时,混合算法可以在不采用单独降噪步骤的情况下取得较好的相位解缠效果.

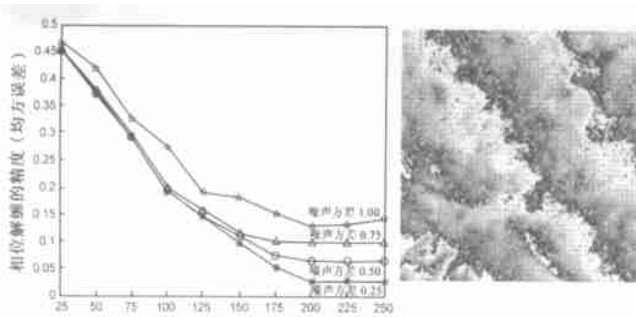


图 9 采用混合算法时相位解缠精度与噪声方差、迭代次数之间的关系

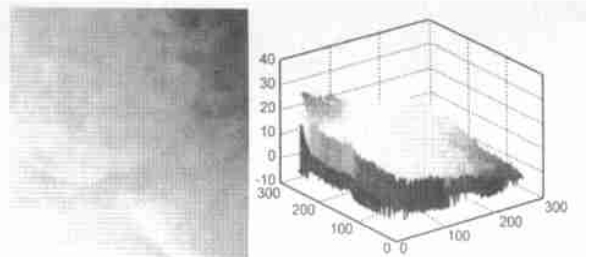


图 10 解缠 ERS-1/2 数据的结果

7 结论

本文对噪声消除法在干涉 SAR 相位解缠中的应用进行了研究,针对原有算法解缠差质量干涉 SAR 数据时存在稳健性差的问题进行了改进.在原有两点规则的基础上,提出了三点规则,并提出了混合算法.

两点规则在干涉条纹较密的地方解缠效果较好,但在存在遮挡效应等数据质量不好的情况下可能不收敛.三点规则在干涉条纹稀疏的地方解缠效果较好,但在干涉条纹较密的地方解缠效果差.为了取得更好的解缠效果,提出把两点规则和三点规则结合使用的混合算法,在前几次(一般为三次)迭代中使用两点规则,先利用两点规则消除噪声,经过几次迭代,噪声减少了,干涉条纹也变稀了.具体采用几次两点规则根据噪声大小决定,在噪声较大时适当增加两点规则迭代次数;反之,减少两点规则迭代次数.由于两点规则具有很好的消除噪声作用,可以免去单独的降噪步骤.在使用两点规则后使用三点规则,利用三点规则在干涉条纹稀疏处解缠效果稳定的优点,可以解决单纯使用两点规则解缠差质量数据时不收敛的问题.混合噪声消除法可以在保证算法精度的同时取得更稳健的相位解缠结果.仿真数据和 ERS-1/2 真实数据的计算机仿真实验验证了本文方法的有效性.对于干涉条纹稀疏程度的自动判断方法以及何时采用两点或三点规则的判据的研究,是我们下一步研究的内容.

参考文献:

- [1] Richard M Goldstein, Howard A Zebker, Charles L Werner. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping [J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713 - 720.
- [2] Howard A Zebker, Yanping Lu. Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms [J]. J Opt Soc Am A, 1998, 15(3): 586 - 598.
- [3] Hiroaki Takajo. Noniterative method for obtaining the exact solution for the normal equation in least-squares phase estimation from the phase difference [J]. J Opt Soc Am A, 1988, 5(11): 1818 - 1827.
- [4] Mark D Pritt, Jerome S Shipman. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 706 - 708.

- [5] Dennis C Chiglia, Louis A Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(1): 107 - 117.
- [6] Wei Xu, Ian Cumming. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 124 - 134.
- [7] G Fornaro, G Franceschetti, R Lanari, D Rossi, M Tesauro. Interferometric SAR phase unwrapping using the finite element method [J]. IEEE Proc Radar, Sonar Navig, 1997, 144(5): 266 - 274.
- [8] D C Chiglia, G A Masin, L A Romero. Cellular-automata method for phase unwrapping [J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(1): 267 - 280.
- [9] G Fornaro, G Franceschetti, R Lanari. Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(3): 720 - 727.
- [10] Mark D Pritt. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(3): 728 - 738.
- [11] M J Huang, Ciar-Jhih Lai. Phase unwrapping based on a parallel noise-immune algorithm [J]. Optics & Laser Technology, 2002, 34: 457 - 464.

作者简介:



边 勇 男, 1972 年 10 月生于辽宁省北宁市, 现在北京航空航天大学电子信息工程学院攻读博士研究生, 专业为通信与信息系统, 研究方向为信息获取与处理、通信中的信号处理方法、阵列信号处理、数字图像处理等。



周荫清 男, 1936 年生于湖南省湘潭市, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 现在北京航空航天大学电子信息工程学院工作, 长期从事通信中的信号处理方法、信息获取与处理、阵列信号处理等方面的研究工作。