

基于相关系数加权观测矢量的多基线相位解缠方法^{*}

李海^{**} 廖桂生

西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 西安 710071

摘要 提出了一种基于相关系数加权观测矢量的多基线相位解缠方法, 该方法采用联合单像素模型, 构造相关系数加权观测矢量, 同时利用相邻像素的信息, 能够同时完成图像配准、干涉相位噪声滤波和相位解缠, 因此可以在合成孔径雷达(SAR)图像配准精度很差(可以允许达到一个分辨单元)的条件下得到稳健的相位解缠性能, 仿真结果证明了此方法的有效性。

关键词 多基线 相位解缠 配准误差 联合单像素 相关系数加权

干涉合成孔径雷达(InSAR)是获取地面数字高程模型(digital elevation model, DEM)的重要遥感技术^[1,2]。InSAR 技术中的三大关键处理步骤是 SAR 图像配准、干涉相位噪声滤波和相位解缠(即估计绝对干涉相位)。传统的单基线 InSAR 系统受干涉相位模糊和高程层叠(layerover)等严重影响, 大大限制了单基线 InSAR 系统对高复杂地形(包含大斜坡和不连续区域, 例如山谷、悬崖等)的高精度测绘能力^[3]。在单基线相位解缠算法中, 比较典型的两类算法是最小范数法(如 LS 算法^[4])和路径跟踪法(即基于路径的积分法, 如 Goldstein 枝切法^[5]、质量指导的路径跟踪法^[6]、Mask-cut 法^[7]和区域生长法^[8])。但这些算法都受到单基线 InSAR 系统固有缺点即相位解缠的可靠性和高程测量精度不能兼顾的影响^[9]。多基线 InSAR 系统的一个最大优点就是可以充分利用其长短基线获取的信息来大大提高相位解缠的可靠性(短基线的优点)而不会降低高程测量精度(长基线的优点)。探索利用多基线 InSAR 系统来提高相位解缠(即多基线相位解缠)的可靠性和获取高质量的 DEM, 已经成为一个热点领域。因此多基线系统更具吸引力, 是未来发展的趋势^[10,11]。

针对多基线 InSAR 系统, 文献 [12] 提出先对

多基线干涉相位进行加权平均(基线重定标), 然后再直接利用传统的相位解缠方法(例如最小均方误差方法)来对干涉相位进行解缠。Thompson 等提出利用级联迭代方法来进行多基线 InSAR 干涉相位解缠^[13], 即先利用较短基线对干涉相位进行解缠以减少相位解缠误差, 然后再利用较长基线来进一步进行相位解缠以提高高程测量精度, 这样既利用了短基线较好的相位解缠性能, 又保持了长基线高程测量的高精度性。Kim 和 Griffiths 利用 Kalman 滤波技术来进行多基线相位解缠^[14]。由于干涉相位是一个随机过程^[2], 其概率分布与相干系数有关, 因此应该利用统计估计技术来研究相位解缠问题。现在更多的研究趋向于用联合统计方法来估计绝对干涉相位(或地形高度), 利用的统计准则包括最大似然方法^[15-17]和最大后验(Bayes)方法^[18-20]。但是上述方法都要求图像配准的精度达到 1/10—1/100 个分辨单元, 否则会严重影响相位解缠性能^[21], 从而影响地形高程测量精度。然而, 对于没有明显地貌特征的 SAR 图像, 精确配准会存在困难。研究对图像配准稳健的相位解缠方法, 具有非常重要的实用价值。

文献 [22] 提出一种基于联合子空间投影的处理方法, 能够在存在配准误差时获得满意的相位解

2007-08-06 收稿, 2007-10-16 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60472097)和教育部新世纪优秀人才基金资助项目

^{**} E-mail: elisha1976@163.com

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

缠结果. 由文献 [21] 的分析可知, 不同的配准误差对应不同的噪声子空间维数, 因此在估计绝对干涉相位(即进行相位解缠)时首先要确定噪声子空间维数, 若噪声子空间维数估计不准, 必定影响绝对干涉相位的估计结果. 但是, 当协方差矩阵的大小特征值区分不太明显时, 确定噪声子空间的维数存在困难. 文献 [23] 中提出了基于加权联合单像素模型的干涉相位估计方法, 虽然可以在存在配准误差时获得满意的干涉相位估计结果, 但是在估计干涉相位时需要首先确定配准误差方向, 并且确定最优权值时需要搜索, 因此计算量较大. 本文对文献 [23] 的方法进行改进和扩展, 提出一种基于相关系数加权观测矢量的多基线相位解缠方法. 该方法采用联合单像素模型, 构造相关系数加权观测矢量, 使得观测矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数几乎不受配准误差的影响(即在存在配准误差的情况下, 能够大大提高观测矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数), 能够同时完成图像配准、干涉相位噪声滤波和相位解缠. 因此能在 SAR 图像配准精度较差的情况下得到准确的相位解缠结果. 本文方法的基本处理步骤如下: 首先, 对 SAR 图像进行粗配准, 构造相关系数加权观测矢量, 用此观测矢量估计协方差矩阵, 用包含绝对干涉相位的导向矢量和估计的协方差矩阵进行波束扫描, 波束形成的输出功率最大值所对应的绝对干涉相位即为估计结果(即多基线相位解缠结果).

$$\mathbf{R}(i, j) = \begin{bmatrix} r_{11}((i, j), (i, j)), r_{12}((i, j), (i, j)), \dots, r_{1M}((i, j), (i, j)) \\ r_{21}((i, j), (i, j)), r_{22}((i, j), (i, j)), \dots, r_{2M}((i, j), (i, j)) \\ \vdots \\ r_{M1}((i, j), (i, j)), r_{M2}((i, j), (i, j)), \dots, r_{MM}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{R}(i, j)$ 称为像素 (i, j) 的相关系数矩阵, $r_{mn}((i, j), (i, j)) (0 \leq r_{mn}((i, j), (i, j)) \leq 1, n=1, 2, \dots, M, m=1, 2, \dots, M)$ 表示像素 (i, j) 在 SAR 图像 m 和 n 之间的相关系数(对角线元素为自相关系数且等于 1, 而非对角线元素为互相关系数), \mathbf{I} 是一个 $M \times M$ 单位矩阵, $E\{\}$ 表示统计平均, 上标 H 表示共轭转置, $\sigma_s^2(i, j)$ 表示像素 (i, j) 的回波功率(对同一像素, 各卫星的统计平均功

1 统计模型

假定所有 SAR 图像已精确配准, 且已去平地相位, 对同一像素, 其坐标为 (i, j) (对应于同一地面单元)的复数据排成矢量(即观测矢量) $s(i, j)$ 可以写为下式^[19]:

$$s(i, j) = [s_1(i, j), s_2(i, j), \dots, s_M(i, j)]^T = \mathbf{a}(\varphi_{(i,j)})^* [x_1(i, j), x_2(i, j), \dots, x_M(i, j)]^T + \mathbf{n}(i, j) = \mathbf{a}(\varphi_{(i,j)})^* \mathbf{x}(i, j) + \mathbf{n}(i, j) \quad (1)$$

$$\text{其中 } \mathbf{a}(\varphi_{(i,j)}) = [1, e^{j\varphi_{(i,j)}}, e^{j\frac{B_{13}}{B_{12}}\varphi_{(i,j)}}, \dots, e^{j\frac{B_{1M}}{B_{12}}\varphi_{(i,j)}}]^T \quad (2)$$

称为像素 (i, j) 的阵列导向矢量, $B_{1m} (m=2, 3, \dots, M, M$ 为 SAR 图像数, 即卫星数)为第 $m (m=2, 3, \dots, M)$ 颗卫星与卫星 1(参考卫星)之间的垂直基线(perpendicular baseline), $\varphi_{(i,j)}$ 为第二颗卫星和参考卫星之间的绝对干涉相位(非模糊相位), $s_m (m=1, 2, \dots, M)$ 为卫星 $m (m=1, 2, \dots, M)$ 所对应的复图像数据, $\mathbf{x}(i, j)$ 为卫星阵列接收的像素 (i, j) 的复后向散射系数矢量(不包含两者的波程差), T 表示转置操作, $()^*$ 为 Hadamard 积, $\mathbf{n}(i, j)$ 为加性热噪声. 其协方差矩阵 $\mathbf{C}_s(i, j)$ 由下式给出:

$$\mathbf{C}_s(i, j) = E\{s(i, j)s^H(i, j)\} = \mathbf{a}(\varphi_{(i,j)}) \cdot \mathbf{a}^H(\varphi_{(i,j)})^* E\{\mathbf{x}(i, j)\mathbf{x}^H(i, j)\} + \sigma_n^2 \mathbf{I} = \sigma_s^2(i, j) \mathbf{a}(\varphi_{(i,j)}) \mathbf{a}^H(\varphi_{(i,j)})^* \mathbf{R}_s(i, j) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (3)$$

率相同), σ_n^2 表示噪声功率.

当 SAR 图像精确配准且相关系数足够高时, 我们可用波束形成的方法来估计绝对干涉相位(即进行相位解缠), 代价函数如下式所示^[3]:

$$J_1 = \mathbf{a}^H(\varphi_{(i,j)}) \mathbf{C}_s(i, j) \mathbf{a}(\varphi_{(i,j)}) \quad (5)$$

$$\text{式中 } \mathbf{a}(\varphi_{(i,j)}) = [1, e^{j\varphi_{(i,j)}}, e^{j\frac{B_{13}}{B_{12}}\varphi_{(i,j)}}, \dots, e^{j\frac{B_{1M}}{B_{12}}\varphi_{(i,j)}}]^T,$$

上面的代价函数达到最大值时所对应的 $\phi_{(i,j)}$ 即为绝对干涉相位估计 (即相位解缠) 结果即 $\phi_{(i,j)} = \varphi_{(i,j)}$.

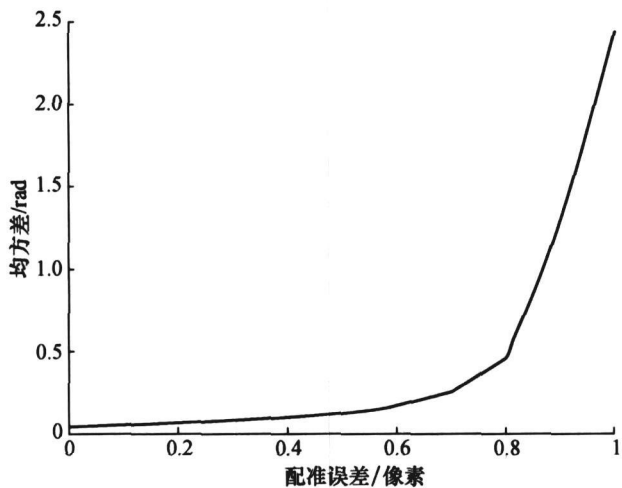


图 1 绝对干涉相位估计 (相位解缠) 结果的均方差随配准误差的变化

但是, 当图像存在配准误差时, (1) 式的观测矢量中其他元素 (非参考元素即 $s_m(i, j)$, $m=2, 3, \dots, M$) 与参考元素 ($s_1(i, j)$) 的相关系数将随之降低, 此时若采用 (5) 式进行绝对干涉相位估计, 将得不到准确的估计结果. 图 1 所示为采用 (5) 式进行绝对干涉相位估计时的估计结果的均方差随配准误差的变化, 可见, 绝对干涉相位估计 (相位解缠) 结果的均方差随着配准误差的增加而增大.

由前面的分析可见, 绝对干涉相位估计 (即相位解缠) 结果受观测矢量中其他元素 (非参考元素) 与参考元素的相关系数影响较大, 相关系数越高, 估计结果越准确, 相关系数越低, 估计结果越差. 本文提出一种基于相关系数加权观测矢量的绝对干涉相位估计 (相位解缠) 方法, 该方法能够大大提高观测矢量中其他元素 (非参考元素) 与参考元素的相关系数, 因此可以精确获得对图像配准误差稳健的相位解缠结果. 为了讨论方便, 以 3 幅干涉 SAR 图像为例时的相关系数加权观测矢量构造方法如图 2 所示 (一个圆环代表一个 SAR 像素).

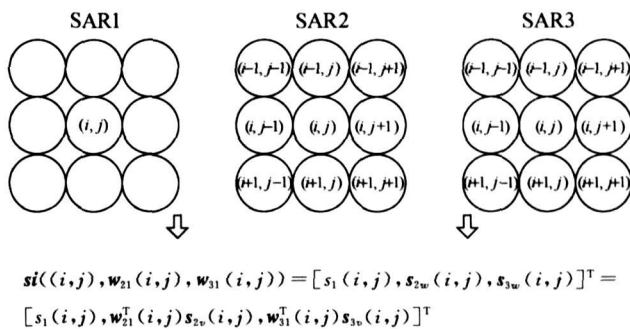


图 2 相关系数加权观测矢量构造方法

其中

$$s_{2v}(i, j) = [s_2(i-1, j-1), s_2(i-1, j), s_2(i-1, j+1), s_2(i, j-1), s_2(i, j), s_2(i, j+1), s_2(i+1, j-1), s_2(i+1, j), s_2(i+1, j+1)]^T \quad (6)$$

$$w_{21}(i, j) = [r_{21}((i-1, j-1), (i, j)), r_{21}((i-1, j), (i, j)), r_{21}((i-1, j+1), (i, j)), r_{21}((i, j-1), (i, j)), r_{21}((i, j), (i, j)), r_{21}((i, j+1), (i, j)), r_{21}((i+1, j-1), (i, j)), r_{21}((i+1, j), (i, j)), r_{21}((i+1, j+1), (i, j))]^T \quad (7)$$

$$r_{21}((i+p, j+q), (i, j)) = \frac{E\{s_2(i+p, j+q)s_1^*(i, j)\}}{\sqrt{E\{|s_2(i+p, j+q)|^2\}E\{|s_1(i, j)|^2\}}} \quad (p=-1, 0, 1 \quad q=-1, 0, 1) \quad (8)$$

$$s_{3v}(i, j) = [s_3(i-1, j-1), s_3(i-1, j), s_3(i-1, j+1), s_3(i, j-1), s_3(i, j), s_3(i, j+1), s_3(i+1, j-1), s_3(i+1, j), s_3(i+1, j+1)]^T \quad (9)$$

$$w_{31}(i, j) = [r_{31}((i-1, j-1), (i, j)), r_{31}((i-1, j), (i, j)), r_{31}((i-1, j+1), (i, j)), r_{31}((i, j-1), (i, j)), r_{31}((i, j), (i, j)), r_{31}((i, j+1), (i, j)), r_{31}((i+1, j-1), (i, j)), r_{31}((i+1, j), (i, j)), r_{31}((i+1, j+1), (i, j))]^T \quad (10)$$

$$r_{31}((i+p, j+q), (i, j)) = \frac{E\{s_3(i+p, j+q)s_1^*(i, j)\}}{\sqrt{E\{|s_3(i+p, j+q)|^2\}E\{|s_1(i, j)|^2\}}} \quad (p=-1, 0, 1 \quad q=-1, 0, 1) \quad (11)$$

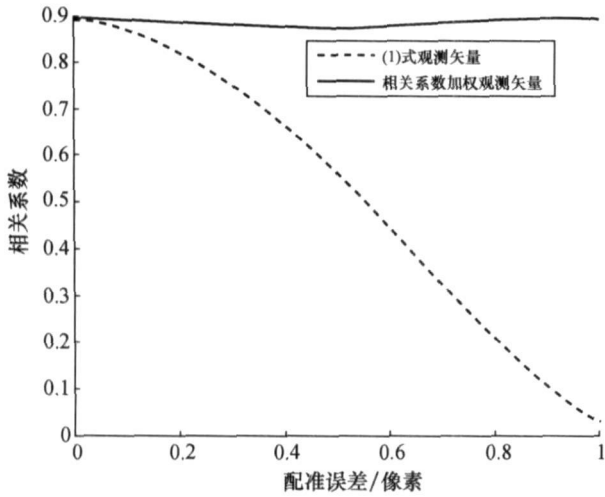


图3 不同观测矢量构造方法的相关系数随配准误差的变化情况

相关系数加权观测矢量 $\mathbf{s}_i((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))$ 的协方差矩阵可写为下式(证明过程见附录):

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{s_i}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j)) &= \mathbf{E}\{\mathbf{s}_i((i, j), \\ &\mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))\mathbf{s}_i^H((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \\ &\mathbf{w}_{31}(i, j))\} = \sigma_s^2(i, j)\mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)})\mathbf{a}_i^H(\varphi_{(i, j)})^* \circ \\ &\mathbf{R}_{s_i}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j)) + \sigma_s^2 \mathbf{I} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)}) = [1, e^{j\varphi_{(i, j)}}, e^{j\frac{\beta_{13}}{\beta_{12}}\varphi_{(i, j)}}]^T \quad (13)$$

其中 $\mathbf{R}_{s_i}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))$ 称为像素 (i, j) 的加权相关系数矩阵。

图3所示为采用不同的观测矢量构造方法时((1)式的观测矢量构造方法和本文的相关系数加权观测矢量)观测矢量中其他元素(非参考元素)与参

考元素的相关系数随配准误差的变化, 由仿真结果可见, (1)式的观测矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数随配准误差的增加而减小, 但本文的相关系数加权观测矢量可使得观测矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数几乎不受配准误差的影响, 即在存在配准误差的情况下, 大大提高观测矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数。

2 绝对干涉相位估计(即相位解缠)方法

2.1 波束形成

当我们用基于相关系数加权观测矢量的波束形成算法来估计绝对干涉相位(即相位解缠)时, 代价函数如下式所示:

$$J_2 = \mathbf{a}_i^H(\varphi_{(i, j)})\mathbf{C}_{s_i}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))\mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)}) \quad (14)$$

$$\mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)}) = [1, e^{j\varphi_{(i, j)}}, e^{j\frac{\beta_{13}}{\beta_{12}}\varphi_{(i, j)}}]^T \quad (15)$$

(14)式的代价函数取得最大值时所对应的即为绝对干涉相位估计结果即 $\hat{\varphi}_{(i, j)} = \varphi_{(i, j)}$ 。

2.2 最优波束形成(capon)

最优波束形成的权矢量由下式进行计算:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_{\text{capon}}} \{ &\mathbf{w}_{\text{capon}}^H \mathbf{C}_{s_i}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))\mathbf{w}_{\text{capon}} \} \\ \text{s. t. } &\mathbf{w}_{\text{capon}}^H \mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)}) = 1 \quad (16) \end{aligned}$$

假设协方差矩阵 $\mathbf{C}_{s_i}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))$ 的逆矩阵存在, 对上式进行求解, 可得最优波束形成的权矢量为:

$$\mathbf{w}_{\text{capon}} = \frac{\mathbf{C}_{s_i}^{-1}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))\mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)})}{\mathbf{a}_i^H(\varphi_{(i, j)})\mathbf{C}_{s_i}^{-1}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))\mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)})} \quad (17)$$

最优波束形成滤波器的输出功率为:

$$\sigma_{\text{capon}}^2(\varphi_{(i, j)}) = \frac{1}{\mathbf{a}_i^H(\varphi_{(i, j)})\mathbf{C}_{s_i}^{-1}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))\mathbf{a}_i(\varphi_{(i, j)})} \quad (18)$$

(18)式的代价函数取得最大值时所对应的即为绝对干涉相位估计(即相位解缠)结果即 $\hat{\varphi}_{(i, j)} = \varphi_{(i, j)}$ 。

从上面的推导结果可以看出, 由于本文采用联合单像素模型, 构造相关系数加权观测矢量, 使得观测

矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数几乎不受配准误差的影响, 因此能在配准误差较大的情况下得到准确的绝对干涉相位估计(即相位解缠)结果。

为了得到协方差矩阵 $C_{si}((i, j), w_{21}(i, j), w_{31}(i, j))$, 也要用样本平均. 即将图 2 中的像素 (i, j) 作左、右和上、下移动, 以得到估计 $C_{si}((i, j), w_{21}(i, j), w_{31}(i, j))$ 所需的一组观测矢量样本. 应当指出, 由于所处理的相邻像素区域已去平地相位, 则不同位置处的空间导向矢量是相同的(当地形比较陡峭时, 我们可用文献 [24] 的方法对所处理的区域进行补偿, 使得不同位置处的空间导向矢量相同), 而且各像素的复反射系数相互独立, 因此这些样本可以看作是独立同分布的。

3 处理步骤

第一步, 图像粗配准 众所周知, 传统的 In-SAR 处理方法中的图像配准分两步: 粗配准和精配准(即图像配准的精度必须达到亚像素级(1/10 到 1/100 像素)). 而对图像进行精配准就必须进行插值处理(插值处理的运算量是非常大的). 本文方法中, 我们只要求对成像处理后的 SAR 图像用传统的相关法进行粗配准^[1,2] 即图像配准精度达到像素级(允许达到一个分辨单元)就够了, 因此大大减轻

了图像配准的难度, 同时也大大降低了图像配准的计算量。

第二步, 估计协方差矩阵 我们按图 2 所示相关系数加权观测矢量 $si((i, j), w_{21}(i, j), w_{31}(i, j))$ 估计相应的协方差矩阵 $C_{si}((i, j), w_{21}(i, j), w_{31}(i, j))$. (12)式的统计协方差矩阵在实际中一般用样本协方差矩阵进行估计, 我们可以从相邻(包括距离向和方位向)的像素中获得独立同分布的样本. 样本协方差矩阵 $C_{si}((i, j), \hat{w}_{21}(i, j), \hat{w}_{31}(i, j))$ 由下式进行估计:

$$C_{si}((i, j), \hat{w}_{21}(i, j), \hat{w}_{31}(i, j)) = \frac{1}{(2L+1)(2K+1)} \cdot \sum_{l=-L}^L \sum_{k=-K}^K si((i+k, j+l), \hat{w}_{21}(i, j), \hat{w}_{31}(i, j)) \cdot si^H((i+k, j+l), \hat{w}_{21}(i, j), \hat{w}_{31}(i, j)) \quad (19)$$

其中

$$\hat{w}_{21}(i, j) = [r_{21}((i-1, j-1), (i, j)), r_{21}((i-1, j), (i, j)), r_{21}((i-1, j+1), (i, j)), r_{21}((i, j-1), (i, j)), r_{21}((i, j), (i, j)), r_{21}((i, j+1), (i, j)), r_{21}((i+1, j-1), (i, j)), r_{21}((i+1, j), (i, j)), r_{21}((i+1, j+1), (i, j))]^T \quad (20)$$

$$\hat{r}_{21}((i+p, j+q), (i, j)) = \frac{|\sum_{l=-L}^L \sum_{k=-K}^K s_2(i+p+k, j+q+l) s_1^*(i+k, j+l)|}{\sum_{l=-L}^L \sum_{k=-K}^K |s_2(i+p+k, j+q+l)|^2 \sum_{l=-L}^L \sum_{k=-K}^K |s_1(i+k, j+l)|^2} \quad (p=-1, 0, 1 \quad q=-1, 0, 1) \quad (21)$$

$$\hat{w}_{31}(i, j) = [r_{31}((i-1, j-1), (i, j)), r_{31}((i-1, j), (i, j)), r_{31}((i-1, j+1), (i, j)), r_{31}((i, j-1), (i, j)), r_{31}((i, j), (i, j)), r_{31}((i, j+1), (i, j)), r_{31}((i+1, j-1), (i, j)), r_{31}((i+1, j), (i, j)), r_{31}((i+1, j+1), (i, j))]^T \quad (22)$$

$$\hat{r}_{31}((i+p, j+q), (i, j)) = \frac{|\sum_{l=-L}^L \sum_{k=-K}^K s_3(i+p+k, j+q+l) s_1^*(i+k, j+l)|}{\sum_{l=-L}^L \sum_{k=-K}^K |s_3(i+p+k, j+q+l)|^2 \sum_{l=-L}^L \sum_{k=-K}^K |s_1(i+k, j+l)|^2} \quad (p=-1, 0, 1 \quad q=-1, 0, 1) \quad (23)$$

式中 $(2L+1)(2K+1)$ 为从相邻像素中获得的独立同分布样本数。

第三步, 估计绝对干涉相位 (即进行相位解缠) 我们可用如下的代价函数估计绝对干涉相位:

$$J_{BF} = \mathbf{a}^H(\phi_{(i,j)}) \mathbf{C}_{si}((i,j), \hat{w}_{21}(i,j), \hat{w}_{31}(i,j)) \mathbf{a}(\phi_{(i,j)}) \quad (24)$$

$$J_{\text{apopt}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\phi_{(i,j)}) \mathbf{C}_{si}^{-1}((i,j), \hat{w}_{21}(i,j), \hat{w}_{31}(i,j)) \mathbf{a}(\phi_{(i,j)})} \quad (25)$$

上面的代价函数达到最大值时所对应的干涉相位 $\phi_{(i,j)}$ 即为绝对干涉相位估计结果即 $\hat{\phi}_{(i,j)} = \phi_{(i,j)}$ 。

理论上, 根据中国余数定理, 利用两条互质的基线(即三颗卫星)就可以完全对高程相位进行解缠, 即可利用(24), (25)式直接估计每一像素的绝对干涉相位。然而, 实际中由于噪声的存在和基线的随机性分布, 直接估计每一像素的绝对干涉相位并不可靠, 尤其是当卫星数目较少(例如只有3颗)和在相干性较差的区域。类似于区域生长算法, 我们的多基线 InSAR 相位解缠过程如下^[22]: 首先利用(24), (25)式对 SAR 图像中“质量”最好的像素进行解缠, 再对已解缠像素的周围“质量”最好的像素进行解缠, 以此类推, 对整幅 SAR 图像中的像素完成相位解缠。像素的“质量”好坏由估计的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{si}((i,j), \hat{w}_{21}(i,j), \hat{w}_{31}(i,j))$ (维数 3×3) 的信号特征值(本文中信号特征值只有一个(证明过程可参考文献 [23]))与最大噪声特征值之比决定^[22] (比值越大说明“质量”越好)。

利用上述策略, 对整幅 SAR 图像中的像素从“质量”最好像素到“质量”最不好像素依次解缠后, 就恢复出整幅 SAR 图像的绝对干涉相位图(即相位解缠结果)。

4 处理性能的实验验证

本节利用仿真数据来验证本文方法。

仿真数据描述: 本文仿真假定 3 颗卫星按 Cartwheel 构形进行编队飞行^[20], 我们选择其中某一轨道时刻的卫星位置进行仿真, 对应的垂直基线(双程)分别为: 63.8 m(卫星 1 和 2 之间的基线), 281.46 m(卫星 1 和 3 之间的基线), 345.3 m(卫星 2 和 3 之间的基线)。其他主要仿真参数如表 1 所示。我们利用一幅实测 SAR 图像(图像分辨率为 $3\text{m} \times 3\text{m}$) 作为地面场景背景来产生每一个 SAR 像素的回波功率, 并利用两维 hanning 窗来模拟高程地形, 按照统计模型^[21] 生成分布式卫星接收的干涉 SAR 图

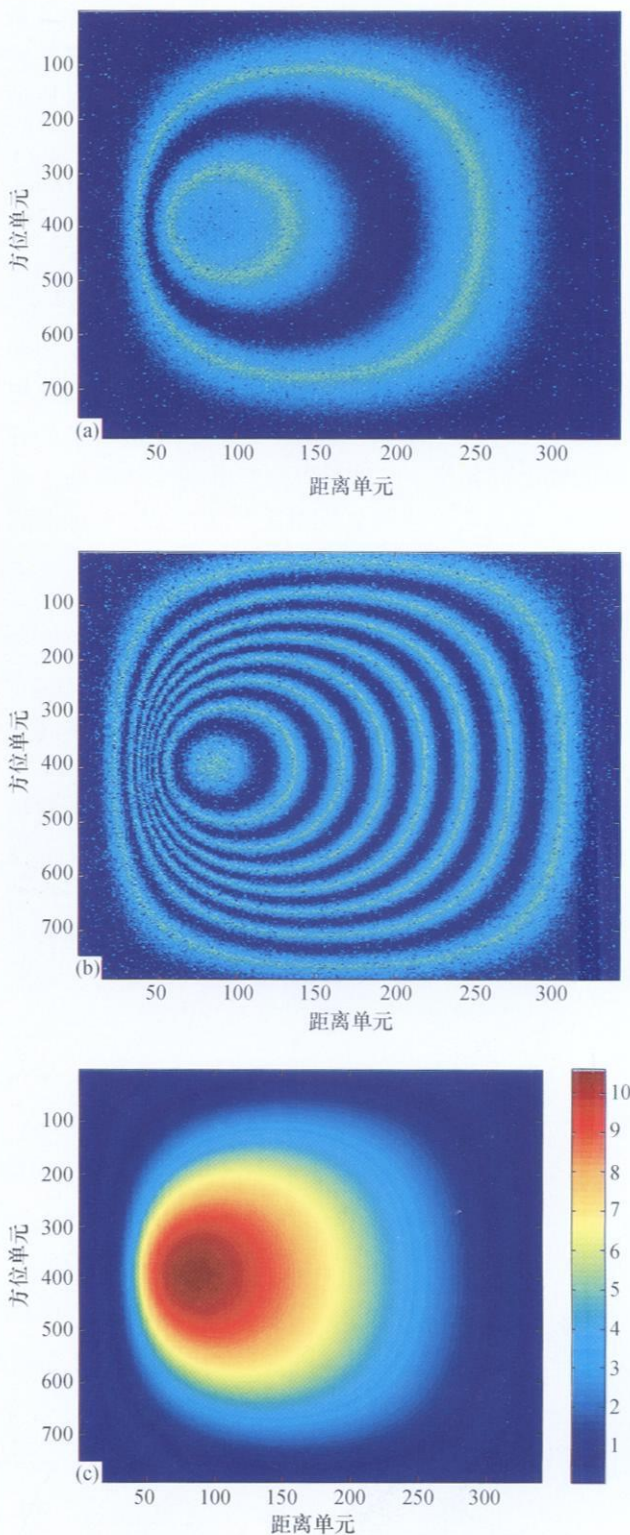


图 4 三幅 SAR 图像精确配准时的处理结果

- (a) 卫星 1, 2 之间的干涉相位图; (b) 卫星 1, 3 之间的干涉相位图;
- (c) 相位解缠结果

像, SAR 图像中的信噪比(SNR)为 23dB^[22]. 相干系数由垂直基线长度、局部地形坡度和 SNR 决定^[2].

表 1 分布式卫星 SAR 仿真参数

| 卫星高度/ km | 下视角/ (°) | 重复频率/ Hz | 波长/ cm | 卫星速度/ (m · s ⁻¹) |
|-------------|-------------|-------------|-----------|---------------------------------|
| 750 | 45 | 2594 | 3 | 7481.5 |

当三幅 SAR 图像精确互配准时, 图 4(c)为本文方法的相位解缠结果(图中单位为 rad), 图 4(a)和图 4(b)分别为卫星 1 和 2 及卫星 1 和 3 之间的干涉相位图.

当三幅 SAR 图像的配准误差分别为 [0, 0.3, 0.5] 像素时(即 SAR 图像 1, 2 和 3 分别相对于

SAR 图像 1 的配准误差), 图 5(a)和图 5(b)分别为卫星 1 和 2 及卫星 1 和 3 之间的干涉相位图, 图 5(c)为本文方法的相位解缠结果, 图 5(d)为此时的相位解缠结果和精确配准时的相位解缠结果之间的误差图(图中单位为 rad)(即图 5(c)和图 4(c)之间的误差图).

当三幅 SAR 图像的配准误差分别为 [0, 0.8, 1.0] 像素时, 图 6(a)和图 6(b)分别为卫星 1 和 2 及卫星 1 和 3 之间的干涉相位图, 图 6(c)为本文方法的相位解缠结果, 图 6(d)为此时的相位解缠结果和精确配准时的相位解缠结果之间的误差图(即图 6(c)和图 4(c)之间的误差图).

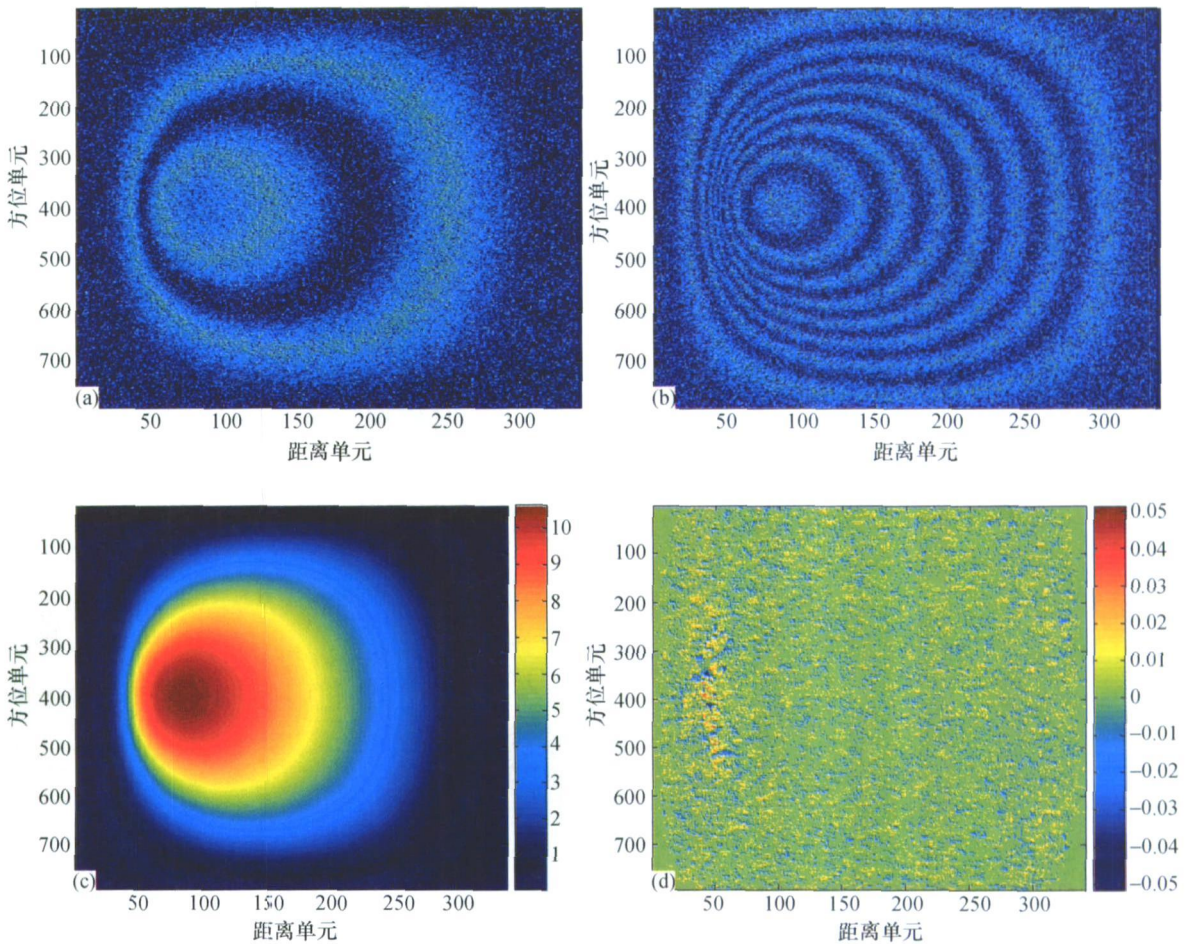


图 5 三幅 SAR 图像的配准误差分别为 [0 0.3, 0.5] 像素时的处理结果
 (a) 卫星 1, 2 之间的干涉相位图; (b) 卫星 1, 3 之间的干涉相位图
 (c) 相位解缠结果; (d) 与精确配准时的相位解缠结果之间的误差图

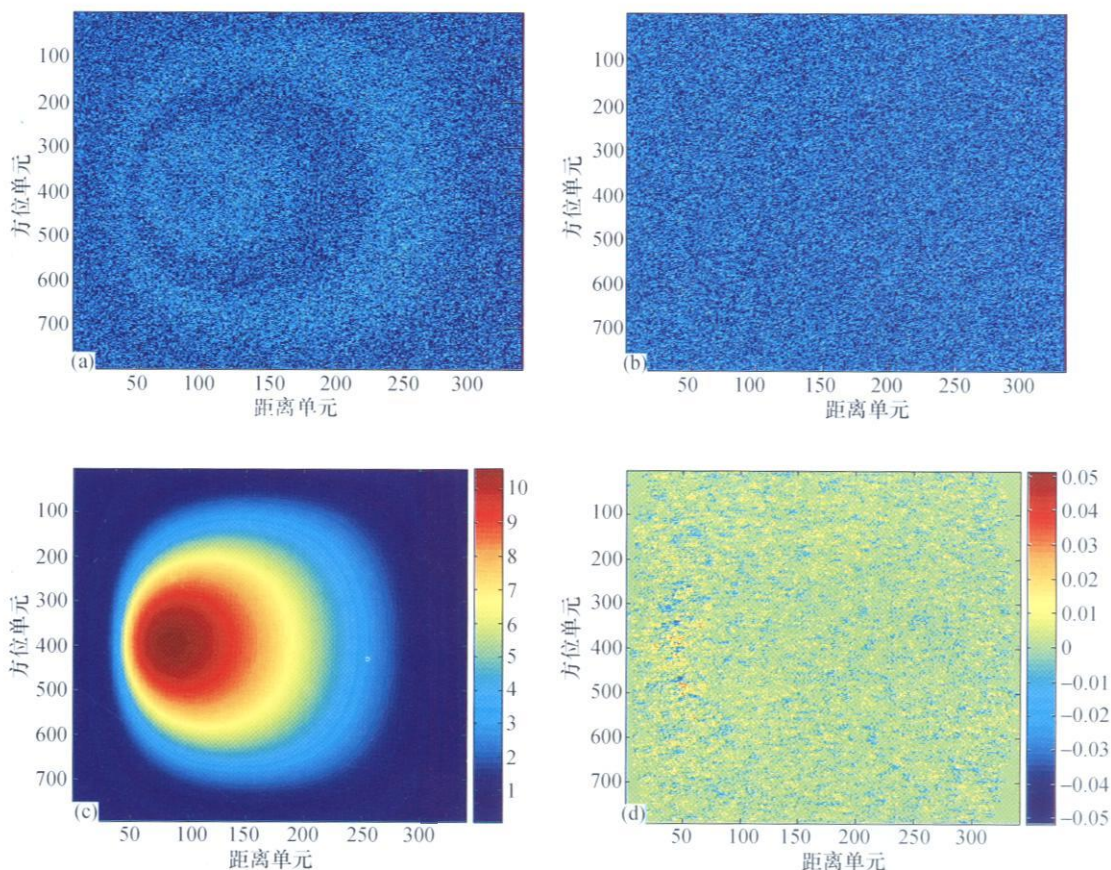


图 6 三幅 SAR 图像的配准误差分别为 [0 0.8 1.0] 像素时的处理结果
 (a) 卫星 1, 2 之间的干涉相位图; (b) 卫星 1, 3 之间的干涉相位图;
 (c) 相位解缠结果; (d) 与精确配准时的相位解缠结果之间的误差图

由图 4—6 的处理结果可见, 本文的多基线相位解缠方法在只对图像进行粗配准(可以允许达到一个分辨单元)的情况下, 仍能获得和精配准时一样的相位解缠结果.

5 结论

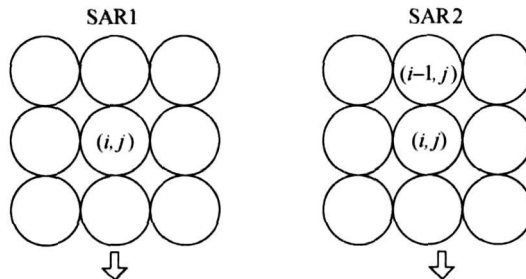
本文研究了多基线 InSAR 相位解缠问题, 提出了一种新的多基线相位解缠方法. 本文方法采用联合单像素模型, 构造相关系数加权观测矢量, 能够同时利用相邻像素的相干信息, 使得观测矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数几乎不受配准误差的影响(即在存在配准误差的情况下, 能够大大提高观测矢量中其他元素(非参考元素)与参考元素的相关系数), 因此具有自动图像配准、干涉相位噪声滤波和相位解缠功能. 仿真结果表明本文方法不但可以获得很好的相位解缠结果, 而且

还可以大大降低对 SAR 图像配准精度的要求.

附 录

证明(12)式成立

为了讨论方便, 我们先讨论比较简单情况, 即当相关系数加权观测矢量 $ss((i, j), w_s(i, j))$ 的构造方法如图 A.1 所示(一个圆环代表一个 SAR 像素)时的情况.



$$ss((i, j), w_s(i, j)) = [s_1(i, j), w_s^T(i, j)ss_2(i, j)]^T$$

图 A.1 相关系数加权观测矢量的构造方法

其中

$$\mathbf{ss}(i, j) = [s_2(i-1, j), s_2(i, j)]^T \quad (\text{A.1})$$

$$\mathbf{w}_s(i, j) = [r_{21}((i-1, j), (i, j)), r_{21}((i, j), (i, j))]^T \quad (\text{A.2})$$

$$r_{21}((i+p, j), (i, j)) = \frac{E\{s_2(i+p, j)s_1^*(i, j)\}}{\sqrt{E\{|s_2(i+p, j)|^2\}E\{|s_1(i, j)|^2\}}} \quad (p = -1, 0) \quad (\text{A.3})$$

相关系数加权观测矢量 $\mathbf{ss}((i, j), \mathbf{w}_s(i, j))$ 的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{ss}((i, j), \mathbf{w}_s(i, j))$, 可写为下式:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{ss}((i, j), \mathbf{w}_s(i, j)) &= E\{\mathbf{ss}((i, j), \mathbf{w}_s(i, j))\mathbf{ss}^H((i, j), \mathbf{w}_s(i, j))\} = \\ &= E\{[s_1(i, j), \mathbf{w}_s^T(i, j)\mathbf{ss}_2(i, j)]^T [s_1(i, j), \mathbf{w}_s^T(i, j)\mathbf{ss}_2(i, j)]^*\} = \\ &= \begin{bmatrix} E\{s_1(i, j)s_1^*(i, j)\}, & E\{s_1(i, j)\mathbf{w}_s^H(i, j)\mathbf{ss}_2^*(i, j)\} \\ E\{\mathbf{w}_s^T(i, j)\mathbf{ss}_2(i, j)s_1^*(i, j)\}, & E\{\mathbf{w}_s^T(i, j)\mathbf{ss}_2(i, j)\mathbf{w}_s^H(i, j)\mathbf{ss}_2^*(i, j)\} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} E\{s_1(i, j)s_1^*(i, j)\}, & E\left\{s_1(i, j)\left(r_{21}^*((i-1, j), (i, j))s_2^*(i-1, j) + r_{21}^*((i, j), (i, j))s_2^*(i, j))\right)\right\} \\ E\left\{\begin{matrix} (r_{21}((i-1, j), (i, j))s_2(i-1, j) \\ + r_{21}((i, j), (i, j))s_2(i, j))s_1^*(i, j) \end{matrix}\right\}, & E\left\{\begin{matrix} (r_{21}((i-1, j), (i, j))s_2(i-1, j) + r_{21}((i, j), (i, j))s_2(i, j)) \\ (r_{21}^*((i-1, j), (i, j))s_2^*(i-1, j) + r_{21}^*((i, j), (i, j))s_2^*(i, j)) \end{matrix}\right\} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} E\{s_1(i, j)s_1^*(i, j)\}, & \begin{bmatrix} r_{21}^*((i-1, j), (i, j))E\{s_1(i, j)s_2^*(i-1, j)\} \\ + r_{21}^*((i, j), (i, j))E\{s_1(i, j)s_2^*(i, j)\} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} r_{21}((i-1, j), (i, j))E\{s_2(i-1, j)s_1^*(i, j)\} \\ + r_{21}((i, j), (i, j))E\{s_2(i, j)s_1^*(i, j)\} \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} |r_{21}((i-1, j), (i, j))|^2E\{s_2(i-1, j)s_2^*(i-1, j)\} \\ + |r_{21}((i, j), (i, j))|^2E\{s_2(i, j)s_2^*(i, j)\} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} r_{11}((i, j), (i, j)), & \begin{bmatrix} r_{21}^*((i-1, j), (i, j))r_{12}((i, j), (i-1, j))e^{-j\varphi_{(i,j)}} \\ + r_{21}^*((i, j), (i, j))r_{12}((i, j), (i, j))e^{-j\varphi_{(i,j)}} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} r_{21}((i-1, j), (i, j))r_{21}((i-1, j), (i, j))e^{j\varphi_{(i,j)}} \\ + r_{21}((i, j), (i, j))r_{21}((i, j), (i, j))e^{j\varphi_{(i,j)}} \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} |r_{21}((i-1, j), (i, j))|^2r_{22}((i-1, j), (i-1, j)) \\ + |r_{21}((i, j), (i, j))|^2r_{22}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \sigma_n^2 \mathbf{I} = \\ &= \begin{bmatrix} r_{11}((i, j), (i, j)), & \begin{bmatrix} r_{21}^*((i-1, j), (i, j))r_{12}((i, j), (i-1, j)) \\ + r_{21}^*((i, j), (i, j))r_{12}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} r_{21}((i-1, j), (i, j))r_{21}((i-1, j), (i, j)) \\ + r_{21}((i, j), (i, j))r_{21}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} |r_{21}((i-1, j), (i, j))|^2r_{22}((i-1, j), (i-1, j)) \\ + |r_{21}((i, j), (i, j))|^2r_{22}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \\ &= \sigma_s^2(i, j)\beta(\varphi_{(i,j)})\beta^H(\varphi_{(i,j)})\mathbf{R}_{ss}((i, j), \mathbf{w}_s(i, j)) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (\text{A.4}) \\ &= \begin{bmatrix} r_{11}((i, j), (i, j)), & \begin{bmatrix} r_{21}^*((i-1, j), (i, j))r_{12}((i, j), (i-1, j)) \\ + r_{21}^*((i, j), (i, j))r_{12}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} r_{21}((i-1, j), (i, j))r_{21}((i-1, j), (i, j)) \\ + r_{21}((i, j), (i, j))r_{21}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} |r_{21}((i-1, j), (i, j))|^2r_{22}((i-1, j), (i-1, j)) \\ + |r_{21}((i, j), (i, j))|^2r_{22}((i, j), (i, j)) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5}) \end{aligned}$$

现在我们讨论比较复杂的情况, 即当相关系数加权观测矢量 $\mathbf{si}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))$ 如图 2 所示时, 我们用类似的方法可证明, 此时的协方差矩阵可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{si}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j)) &= E\{\mathbf{si}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \\ &= \mathbf{w}_{31}(i, j))\mathbf{si}^H((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))\} = \sigma_s^2(i, j) \\ &= \mathbf{ai}(\varphi_{(i,j)})\mathbf{ai}^H(\varphi_{(i,j)})^* \mathbf{R}_{si}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \\ &= \mathbf{w}_{31}(i, j)) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (\text{A.6}) \end{aligned}$$

$$\mathbf{ai}(\varphi_{(i,j)}) = [1, e^{j\varphi_{(i,j)}}, e^{j\frac{B_{13}\varphi_{(i,j)}}{B_{12}}}]^T \quad (\text{A.7})$$

其中 $\mathbf{R}_{si}((i, j), \mathbf{w}_{21}(i, j), \mathbf{w}_{31}(i, j))$ 称为像素 i 的加权相关系数矩阵.

参 考 文 献

- 1 Rosen PA, Hensley S, Joughin IR, et al. Synthetic aperture radar interferometry. In: Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333-382
- 2 Li F, Goldstein. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. IEEE Trans On GRS, 1990,

- 28: 88—97
- 3 Lombardini F, Montanari M, Gini Fulvio. Reflectivity estimation for multibaseline interferometric radar imaging of lay over extended sources. *IEEE Trans On SP*, 2003, 51(6): 1508—1519
 - 4 Pritt MD, Shipman JS. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's. *IEEE Trans On GRS*, 1994, 32(3): 706—708
 - 5 Goldstein RM, Zebker HA, Werner CL. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci*, 1988, 23(4): 713—720
 - 6 Bone DJ. Fourier fringe analysis: The two-dimensional phase unwrapping problem. *Applied Optics*, 1991, 30(25): 3627—3632
 - 7 Flynn TJ. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map. *Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Lincoln, Nebraska. IEEE, Piscataway, 1996, 2057—2059
 - 8 Xu W, Cumming I. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping. *IEEE Trans On GRS*, 1999, 37(1): 124—134
 - 9 李真芳. 分布式小卫星 SAR-InSAR-GMTI 的处理方法. 西安电子科技大学博士论文, 西安, 2006
 - 10 Ferretti A, Prati C, Rocca F. Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction. In: *Proc 3rd ERS Symp Space at the Service of Our Environment*, Florence, Italy, 1997, 1809—1820
 - 11 Krieder G, Fiedler H, Mittermayer J, et al. Analysis of multi-static configurations for spaceborne SAR interferometry. *IEE Proc-Radar Sonar Navig*, 2003, 150(3): 87—96
 - 12 Ghiglia DC, Wahl DE. Interferometric synthetic aperture radar terrain elevation mapping from multiple observations. In: *Digital Signal Processing Workshop*, Sixth IEEE, Albuquerque, NM, USA, 1994, 33—36
 - 13 Thompson DG, Robertson AE, Arnold DV, et al. Multi-baseline interferometric SAR for iterative height estimation. In: *Proc IGARSS99*, UT, USA, 1999, 251—253
 - 14 Kim MG, Griffiths HD. Phase unwrapping of multibaseline interferometry using Kalman filtering. In: *Seventh IEE Int Conf on Image Processing and Its Appli*, London, UK, 1999, 813—817
 - 15 Lombardo P, Lombardini F. Multi-baseline SAR interferometry for terrain slope adativity. In: *IEEE National Radar Conference*, Rome Univ, Italy, 1997, 196—201
 - 16 Pascazio V, Schirinzi G. Multifrequency InSAR height reconstruction through maximum likelihood estimation of local planes parameters. *IEEE Trans On Image Processing*, 2002, 11(12): 1478—1489
 - 17 Fomaro G, Pauciuolo A, Sansosti E. Phase difference based multiple acquisition phase unwrapping. In: *Proc IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symp 2003*, Toulouse, France, 2003, 948—950
 - 18 Fomaro G, Pauciuolo A, Sansosti E. Bayesian approach to phase-difference-based phase unwrapping. In: *Proc IEEE Thirty-sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Napoli, Italy, 2002, 1391—1396
 - 19 Poggi G, Ragozini APR, Servadei D. A Bayesian approach for SAR interferometric phase restoration. In: *Proc. IEEE Int Geoscience and Remote Sensing Symp 2000*, Naples Univ, Italy, 2000, 3202—3205
 - 20 Ying L, Munson DC, Koetter R, et al. Multibaseline InSAR terrain elevation estimation: A dynamic programming approach. In: *Proc IEEE Int Conf on Image Processing*, Univ of Illinois, USA, 2003, 1522—4880
 - 21 Li ZF, Bao Z, Li H, et al. Image auto-coregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection. *IEEE Trans On GRS*, 2006, 44(2): 288—297
 - 22 Li ZF, Bao Z, Suo ZY. A joint image coregistration, phase noise suppression and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems. *IEEE Trans On GRS*, 2007, 45(3): 584—591
 - 23 李海, 廖桂生. InSAR 自适应图像配准的干涉相位估计方法. *电子学报*, 2007, 35(3): 420—425
 - 24 李海, 李真芳, 廖桂生, 等. InSAR 干涉相位图生成的图像配准自补偿方法. *中国科学, E 辑*, 2006, 36(2): 191—201