

# 相关系数图分类及其在干涉 SAR 二维相位展开中的应用<sup>1</sup>

云日升 彭海良 王彦平  
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要:** 二维相位展开是干涉 SAR 数据处理中的关键步骤。该文在讨论干涉 SAR 相关系数图分类与二维相位展开之间关系的基础上, 将相关系数图分类应用于干涉 SAR 二维相位展开。提出了基于 K-均值-Markov 随机场的干涉 SAR 相关系数图组合分类算法。在相位展开时对特定类别的区域作相应的处理, 避免了不含有效相位区域的相位误差在相位展开过程中的传播。实验结果证实了该方法的有效性。

**关键词:** 干涉 SAR, 二维相位展开, 相关系数图分类, K-均值分类, Markov 随机场

**中图分类号:** TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1449-06

## Coherence MAP Classification and Its Application in Two-Dimensional Phase Unwrapping

Yun Ri-sheng Peng Hai-liang Wang Yan-ping

(Institute of Electron., Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Based on the analyzing of the relation between interferometric SAR coherence map classification and two-dimensional phase unwrapping, coherence map classification is applied in two-dimensional phase unwrapping. A K-mean and Markov random field combined classification algorithm is presented for the coherence map classification. The classified coherence map is used to confine the propagation of the local phase errors of low coherence regions during the two-dimensional phase unwrapping. The experiments on airborne X-band InSAR data show the validity of this approach.

**Key words** Interferometric SAR, Two-dimensional phase unwrapping, Coherence map classification, K-mean classification, Markov random field

### 1 引言

干涉 SAR 通过两部空间分开的天线接收地面同一目标的回波信号并从中提取相位差, 经过处理获得地表的高度信息<sup>[1]</sup>。干涉相位图中各点的相位值位于  $(-\pi, \pi]$  之间, 模为  $2\pi$ 。相位展开是将干涉相位由相位主值恢复真实相位值的过程。雷达信号的低信噪比、地形起伏引起的叠掩、阴影以及其它各种原因造成的去相关都会造成干涉相位的不连续, 使得二维相位展开成为干涉 SAR 数据处理中最为困难的问题之一。

传统的相位展开算法在相位展开时不考虑观测区域内的地形分布特征, 以及是否存在叠掩和阴影的区域。在水域、湿地以及存在叠掩和阴影的区域内通常包含大量密集的残余点, 而且这些区域由于相关系数极低实际上并不含有有效的相位信息。通过分类算法来获取这些区域的分布信息并将其应用于干涉 SAR 的相位展开可以避免不含有效相位区域的相位误差在相位展开过程中的传播, 并可以根据地形分布信息指导展开相位的后处理。

对于确定波段和信噪比的 SAR 传感器, 干涉 SAR 的相关系数主要决定于分辨单元内的散射介质的特性, 因此可以利用相关系数图的分类来获得地形分布特征以及确定雷达阴影和叠掩

<sup>1</sup> 2003-05-07 收到, 2003-08-28 改回

国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (No.2001AA132010)

的区域。本文提出一种 K-均值-Markov 随机场组合分类算法用于对干涉 SAR 相关系数图进行分类。将 K-均值预分类后的相关系数图作为 Markov 随机场, 通过最小化 Markov 随机场的能量函数使相关系数随机场收敛到稳定的状态, 这种稳定状态对应于反映地形特征的分类结果。最后将相关系数图分类结果应用于二维相位展开。在干涉相位图上去除相关系数极低的不含有效相位的地形特征类所对应的区域, 避免了相位误差在相位展开过程中对其周围区域的影响, 并可以对相位展开图上的区域根据地形特征不同进行标记。

## 2 干涉 SAR 相关系数图分类与二维相位展开

### 2.1 干涉 SAR 相关系数及其特性

干涉 SAR 的相关系数可以表示为 [2]

$$\gamma = \gamma_{\text{SNR}} \cdot \gamma_{\text{temporal}} \cdot \gamma_{\text{baseline}} \cdot \gamma_{\text{volume}} \quad (1)$$

其中  $\gamma_{\text{SNR}}$  表示由热噪声引起的去相关;  $\gamma_{\text{temporal}}$  为两次观测期间由于散射体的散射特性或几何特性发生变化而引起的时间去相关;  $\gamma_{\text{baseline}}$  是由于基线的存在使得两幅 SAR 图像存在视角差异引起的去相关;  $\gamma_{\text{volume}}$  表示与电磁波穿透性相关的体散射去相关。忽略时间去相关和基线去相关的影响, 则对于确定波段和信噪比的 SAR 传感器, 干涉 SAR 的相关系数主要决定于分辨单元内的散射介质的特性。SAR 对于特定的地面特征散射特性具有明显的差异, 可以利用相关系数图分类将具有较大差异的地面特征以及存在阴影和叠掩的区域区分出来, 用于优化干涉 SAR 二维相位展开。

### 2.2 相关系数图分类与二维相位展开

干涉 SAR 相关系数图通常由两幅经过配准的复图像由下式进行估计 [3]:

$$\hat{\gamma} = \left| \sum_{n=1}^N u_1^{(n)} \cdot u_2^{*(n)} \right| / \sqrt{\sum_{n=1}^N |u_1^{(n)}|^2 \sum_{n=1}^N |u_2^{(n)}|^2} \quad (2)$$

其中  $u_1, u_2$  为两幅复图像,  $N$  为估计窗内的像素数, “\*”表示共轭。在遍历性假设条件下, 式 (2) 为相关系数的最大似然估计。由式 (2) 得到的各点相关系数称之为相关系数图。

干涉 SAR 相位展开通常沿相位图中某一路径积分相位梯度得到展开相位。相位图中的相位不连续使得相位展开值依赖于积分路径的选择。相关系数图在干涉 SAR 二维相位展开时通常作为相位质量图 [3] 来指导相位展开。通常直接根据干涉相位图上各点像素的质量值来决定积分路径, 或者将质量图经过二值化处理之后作为相位梯度的权值。但这样处理不能获得观测区域的地形特征类的分布信息, 不能有效地避免相位展开误差在局部的传播。在相关系数很低的区域不含有效相位, 且存在大量密集的残余点。因此应用相关系数图分类在相位展开时将这区域连通、分离并去除, 将提高相位展开的准确性、可靠性和运算效率。这些区域可以在其它区域展开之后, 利用某种插值原理获得该区域的近似展开相位。

## 3 K-均值-Markov 随机场组合分类算法

### 3.1 K-均值算法 [4]

K-均值算法是一种动态的模式分类方法。对于  $K$  个初始分类中心  $m_1^1, m_2^1, \dots, m_K^1$ 。在第  $k$  次迭代时, 依据最小距离准则将样本分配到  $K$  个类中。各分类的中心值为

$$m_j^{k+1} = \frac{1}{n_j} \sum_{m_t \in S_j} m_t \quad (3)$$

式中  $n_j$  为  $S_j$  中所包含的样本数。若  $|m_j^{k+1} - m_j^k| > \varepsilon$ ,  $j = 1, 2, \dots, K$ , 则将全部样本重新分类。重复迭代计算, 直到满足  $|m_j^{k+1} - m_j^k| < \varepsilon$ ,  $j = 1, 2, \dots, K$ 。

### 3.2 Markov 随机场与 Gibbs 分布

设  $X = \{X_{s_1}, X_{s_2}, \dots, X_{s_n}\}$  是定义在位置集合  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  上的随机变量的集合, 其中每个随机变量  $X_{s_i}$  的值域为  $\Lambda_{s_i}$ ,  $X$  称为随机场. 对于  $S$  中不同的位置元素  $s_i$  和  $s_j$ , 如果  $P(X_{s_i} | X_{s_1}, X_{s_2}, \dots, X_{s_n})$  与  $X_{s_j}$  有关, 则  $s_j$  是  $s_i$  的一个邻点. 若  $\eta_{s_i}$  是  $s_i$  的邻点集合, 记  $\eta = \{\eta_{s_i}, s_i \in S\}$  是  $S$  的邻域系统. 邻域系统可以分解为包含若干位置的集合的基团 (clique), 含有  $i$  个元素的基团记作  $c_i$ .

$\Omega = \{x = (x_{s_1}, x_{s_2}, \dots, x_{s_n}) : x_{s_i} \in \Lambda_{s_i}, 1 \leq i \leq n\}$  是随机场  $X$  中所有可能状态的集合. 若对任意  $s_i \in S$  和  $x \in \Omega$  有

$$P(x) > 0, \forall x \in \Omega \tag{4}$$

$$P(x_{s_i} | \{x_{s_j}, s_j \neq s_i, s_j \in S\}) = P(x_{s_i} | \{x_{s_j}, s_j \in \eta_{s_i}\}) \tag{5}$$

同时成立, 则称  $X$  是关于领域系统  $\eta$  的 Markov 随机场 [5].

$S$  上的随机变量集合  $X$  相对于  $\eta$  称为 Gibbs 随机场当且仅当其结构服从 Gibbs 分布:

$$\pi(x) = Z^{-1} \times e^{-\frac{1}{T}U(x)} \tag{6}$$

其中  $T$  为常数,  $U(x) = \sum_{c \in C} V_c(x)$  为能量函数.  $C$  表示  $\eta$  中基团的集合,  $V_c(x)$  是基团  $c$  的势函数 (potentials).  $Z = \sum_{x \in X} e^{-\frac{1}{T}U(x)}$  为正规化的常数.

Markov 随机场和 Gibbs 分布是一致的 [6], 即当且仅当  $\pi(x) = P(x)$  是关于  $\eta$  的 Gibbs 分布时,  $X$  是关于  $\eta$  的 Markov 随机场.  $\pi(x)$  的条件概率可由势函数得到: 设  $x^{s_s}$  表示一结构, 它在点  $s$  处为  $x_s$ , 在其余处与  $x$  一致, 有

$$P(x_s | \{x_r, r \in \eta_s\}) = \frac{1}{Z_s} \exp \left[ -\frac{1}{T} \sum_{c \in C} V_c(x) \right] \tag{7}$$

其中  $Z_s = \sum_{x_s \in \Lambda_s} \exp[-\frac{1}{T} \sum_{c \in C} V_c(x^{s_s})]$  是局部归一化函数. 选择势函数为二阶时, 能量具有二阶形式:

$$U(x) = \sum_{s_i \in S} V_1(x_{s_i}) + \sum_{s_i \in S} \sum_{s_j \in \eta_i} V_2(x_{s_i}, x_{s_j}) \tag{8}$$

### 3.3 相关系数图的 K-均值 - Markov 随机场组合分类

将相关系数图分割为  $M$  个大小相等的子块. 分别计算  $M$  个子块的均值  $m_i^0 (i = 1, 2, \dots, M)$  和方差  $\sigma_i^0 (i = 1, 2, \dots, M)$ . 选取  $K$  个子块作为初始分类中心进行迭代, K-均值分类后可以得到  $K$  类均值  $\bar{m}_i (i = 1, 2, \dots, K)$  和方差  $\bar{\sigma}_i (i = 1, 2, \dots, K)$ . 按正态分布求取相关系数图上  $(i, j)$  点属于第  $l (l = 1, 2, \dots, K)$  类的概率  $P_l(i, j)$ . 以概率最大作为相关系数图上该点的预分类.

经过预分类处理之后的相关系数图上的像素点被标记为  $K$  类. 由于噪声的随机性, 预分类之后的相关系数图还需要进行再分类处理实现相关系数图的局部不连通区域的融合.

采用 Markov 随机场分类器来实现对经过预分类处理之后的相关系数图的再分类. 像素位置为规则网格  $S = \{(i, j) : 1 \leq i \leq N_1, 1 \leq j \leq N_2\}$ ,  $X$  为定义在  $S$  上取值在类别集合  $\Lambda = \{1, 2, \dots, K\}$  的随机场. 选取二阶 Markov 能量函数作为分类器. 对于预处理之后的相关系数图中的每一像素点分别在  $\{1, 2, \dots, K\}$  中取值, 利用式 (7) 计算条件概率  $P(x_s | \{x_r, r \in \eta_s\})$ . 多次循环后当各点收敛到稳定点时, 最小化了能量函数, 完成了相关系数图的分类.

经过  $K$  均值 - Markov 随机场联合分类算法之后, 相关系数图被分为各自连通的  $K$  类区域, 分别对应于观测区域内  $K$  类地形特征。

#### 4 实验结果与结论

局部最小生成树二维相位展开算法<sup>[7]</sup>是路径跟踪算法的一种。该算法首先采用自动阈值算法对质量图进行二值化并使用数学形态学的膨胀算法对二值化质量图进行膨胀形成相互隔离的局部区域, 然后在干涉相位图上对应的局部区域上分别生成最小生成树, 使分支总长度达到局部最小的基础上避免了连接残余点的分支形成闭合区域。本文提出的相关系数图分类算法可以作为局部最小生成树二维相位展开算法的预处理过程应用于干涉 SAR 的二维相位展开。

利用机载双天线 X 波段干涉 SAR 获得的干涉数据, 从中选取  $210 \times 210$  像素大小的区域进行实验。该区域干涉复图像对的幅度图像的其中一幅如图 1 所示。对应的干涉相位图如图 2 所示。由图 1 可知, 所选区域中大部分是相对平坦的区域, 这些区域在干涉相位图上对应于距离向平行的条纹。幅度图像中左下部为丛林的一部分, 并且存在较大范围的阴影区域。在干涉相位图上丛林区域的相位受到一定程度的噪声破坏, 而在阴影区域的相位则表现为随机噪声的特性。

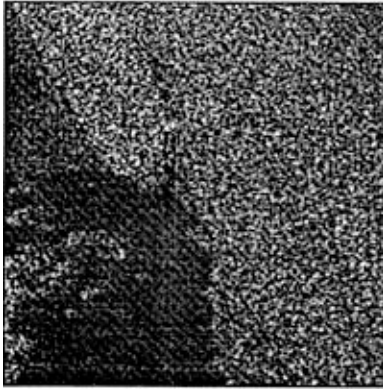


图 1 干涉幅度图像

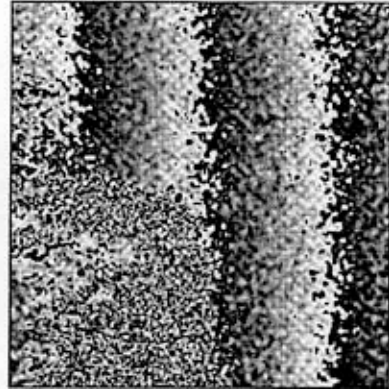


图 2 干涉相位图

图 3(a) 为相关系数图。由图可知在幅度图像上比较平坦的裸地区域相关系数相对较高, 大部分像素点的相关系数大于 0.8; 阴影区域的相关系数很低, 大部分像素点的相关系数低于 0.3; 而丛林区域的相关系数分布介于二者之间。因此在相关系数图分类处理中, 将相关系数图分为 3 类, 分别对应于平地、丛林和阴影 3 类地形特征。图 3(b) 为对相关系数图进行  $K$ -均值预分类处理之后的结果。经过预分类之后相关系数图大致确定了 3 类不同区域的分布。但由于去相关噪声的随机性, 因此各类区域不能得到明确的区分。图 3(c) 为经过 Markov 随机场进行类别融合后的结果。经过融合处理后不同区域都成为各自独立的连通区域, 分别对应于平地、丛林和阴影 3 类地形特征。将相关系数图的分类结果应用于相位展开时, 将阴影特征类作为干涉相位图的掩模; 将丛林特征类在相位展开图中进行标记。图 3(d) 为残余点分布图, 由图可知约 80% 的残余点分布在阴影区域内。

图 4 为直接展开相位和将相关系数图分类应用于相位展开的结果比较。图 4(a) 为采用局部最小生成树相位展开算法直接展开相位的分支连接图。由图可知, 大部分分支聚集在阴影特征类对应区域中。且阴影特征类对应的区域中残余点极性未得到平衡的分支向该区域以外延伸, 使得不含有效相位区域的相位误差向外传播。图 4(b) 为图 4(a) 的分支连接对应的相位展开结果。由图 4(b) 可以看出, 直接展开相位时相位展开图的左侧上部和下部区域表现为明显的不连续。图 4(c) 为利用相关系数图分类处理之后进行相位展开的分支连接图。由图可知分支连接大

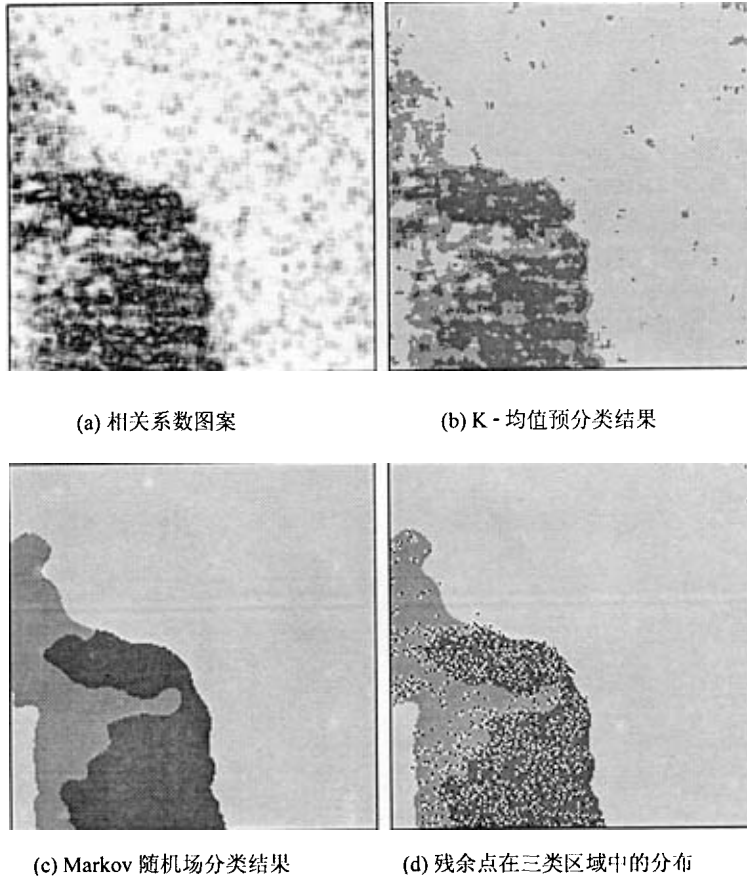


图 3 相关系数图分类结果

为简化，同时保证了可靠的积分路径。图 4(d) 为图 4(c) 的分支连接对应的相位展开图，在阴影特征类对应的区域之外获得了连续的展开相位。

采用下式来对相位展开误差进行评估 [2]：

$$\epsilon = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} w_{i,j}^x |\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x|^p + \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} w_{i,j}^y |\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y|^p \quad (9)$$

式中  $\phi_{i,j}$  为展开相位， $\Delta_{i,j}^x, \Delta_{i,j}^y$  为干涉相位图两个方向上的相位梯度。此处取  $w_{i,j}^x$  和  $w_{i,j}^y$  为两个方向上相位梯度的权值。将干涉相位图上掩模区域像素的权值赋值为 0，其余区域像素赋值为 1。

由式 (9)，当  $p = 0$  时，未应用相关系数图分类的相位展开误差  $\epsilon = 0.002579$ ；应用相关系数图分类后的相位展开误差  $\epsilon = 0.001884$ 。在本文实验中，应用相关系数图分类比未应用相关系数图分类的相位展开结果准确可靠；直接展开相位在某些区域虽然获得了完整的展开相位，但不能确定哪些像素的相位展开值不含有效相位，必然影响最终反演得到的地形高程的精度；直接展开相位不能在展开相位中对地形特征加以标注；此外，由于阴影特征类中包含了约 80% 的残余点，直接对其进行相位展开极大地影响了相位展开的效率。实验结果表明，利用相关系数图分类可以有效地提高干涉 SAR 二维相位展开的准确性、可靠性和运算效率。不含有效相位值而在相位展开时去除的区域通常利用已展开区域的相位值进行双向插值得到近似的相位展开结果。对于丛林等特征类，可以根据应用的需要作相应的处理。

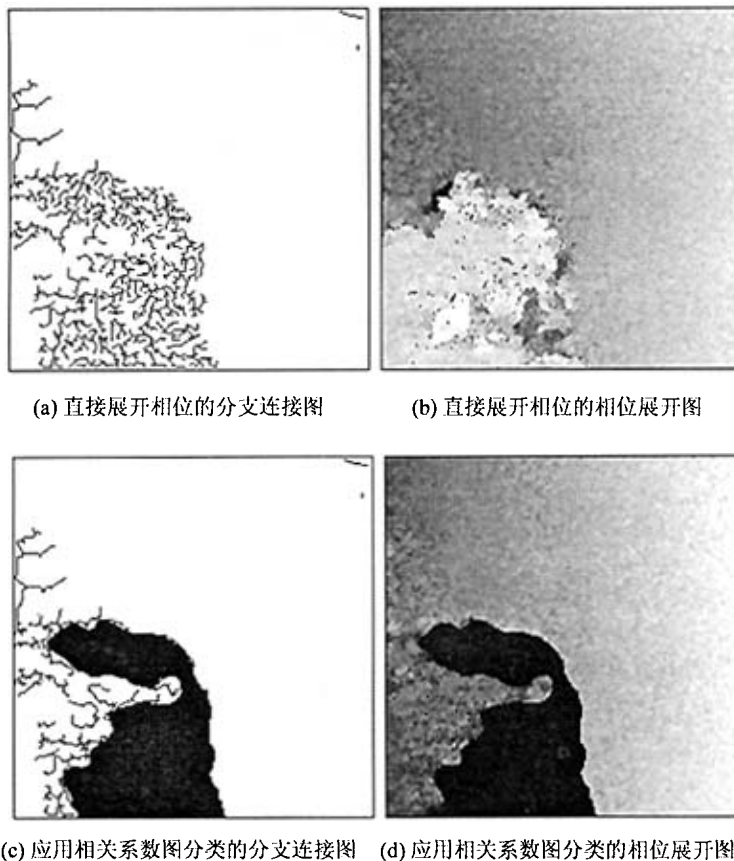


图 4 相位展开结果比较

## 参 考 文 献

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, *et al.*. Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, 2000, 88(3), 330-380.
- [2] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 1998, 14(4): 1-54.
- [3] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1998: 46-310.
- [4] 沈清, 汤霖. 模式识别导论. 长沙: 国防科学技术出版社, 1991: 102-120.
- [5] Li S Z. Markov Random Field Modeling in Computer Vision. New York, Springer-Verlag, 1995: 21-108.
- [6] Besag J. Spatial interactions and the statistical analysis of lattice system, *J. Roy. Statist. Soc.*, 1974, B36(2): 192-236.
- [7] 云日升, 彭海良. 基于局部最小生成树的干涉 SAR 二维相位展开. *电子与信息学报*, 2004, 26(2): 194-199.

云日升: 男, 1974 年生, 博士生, 从事信号与信息处理、干涉合成孔径雷达信号处理.

彭海良: 男, 1939 年生, 研究员, 博士生导师, 从事雷达系统与信号处理、干涉合成孔径雷达研究.