

文章编号: 1000-6893(2001)S0-S115-05

干涉 SAR 相位展开算法的比较和改进

李笑郁, 毛士艺

(北京航空航天大学 电子工程系 203 教研室, 北京 100083)

COMPARISON AND DISCUSSION OF INTERFEROMETRIC SAR PHASE UNWRAPPING ALGORITHMS

LI Xiao-yu, MAO Shi-yi

(Faculty 203, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 基于残差理论深入分析和比较了 2 种最主要的干涉 SAR 相位展开方法积分路径法和最小均方法的策略及性能。对加权最小均方算法从初始值和权值进行了讨论, 给出了一种合成加权多重网格算法。该算法结合了分支阻断方法简单快速并有一致解的特点, 使它为多重网格最小均方算法提供初始值, 加速了多重网格算法的收敛; 并采用由相位导数方差生成的二值质量图替代相关系数作为权值输入, 增强了算法的适应能力及可靠性。实际 X-SAR 数据的相位展开处理结果验证了本文的分析和结论。

关键词: 干涉 SAR; 相位展开算法; 相位导数方差加权; 合成加权多重网格算法

中图分类号: V243.2 **文献标识码:** A

Abstract: From the residue theory point of view, this paper gives a thorough study on the two kinds of mainly used phase unwrapping algorithms as well as a comparison. And then, the initial values and weights of weighted least squares algorithms are discussed and a synthetic weighted multigrid algorithm is given, which employs the fast and reliable output of Branch Cut method as the input of the multigrid algorithm to accelerate the convergence and uses a binary quality map derived from the phase derivative variance as the weights to make the algorithm more robust and reliable. Phase unwrapping results of X-SAR data have shown the validation of the analysis.

Key words: interferometric SAR; phase unwrapping; phase derivative; variance; synthetic multigrid algorithm

干涉合成孔径雷达(IFSAR)最主要的应用是利用同一地区的至少 2 幅在不同轨道位置或不同时间获取的复数 SAR 图像形成干涉图像, 重建地形拓扑图, 它已被公认为是全天候条件下获得大测绘带宽地球表面高度信息的强大手段^[1]。由于系统的原因, 干涉相位被限制(缠绕)在 $(-P, P]$ 之间。如何恢复模糊的相位周期, 得到与数字高度图(DEM)相关的真实解缠相位, 即相位展开(或称相位解缠)处理(Phase Unwrapping), 成为干涉 SAR 处理的最关键步骤之一。实际 SAR 图像相位中存在的噪声、欠采样、SAR 图像遮挡(Shadow)和重叠(Layover)等引起的相位不一致现象, 即残差现象, 使得对测量相位梯度进行简单的积分会得到与路径相关的相位展开结果, 导致误差的传递与积累。在 2 类最主要的干涉 SAR 相位展开方法中, 积分路径方法(Path-following

method)建立在残差定理的基础上, 试图实现与路径无关的 1D 路径积分相位展开。其代表算法包括 Goldstein 的分支阻断(Branch Cut)法^[2], Xu 和 Cumming (1996) 的区域生长(Region Growing)法等。而第 2 类主要的相位展开方法则基于最小均方意义, 其思想是最小化测量相位梯度与解平面梯度的均方差, 主要工作集中在 Romero, Franceschetti 及 Lanari(1996) 的格林函数法, Ghiglia, Romero 的先验条件共轭梯度法(PCG)^[3], 及 Pritt 于 1996 年提出的加权多重网格算法^[4]。本文首先从残差理论的角度对以 Goldstein 的分支阻断方法为代表的积分路径相位展开方法及先验条件共轭梯度法(PCG)和加权多重网格方法为代表的加权多重网格方法进行了深入的分析比较。在此基础上给出了合成加权多重网格最小均方算法, 结合分支阻断方法计算速度快且通常有可靠解的优势, 使之成为加权多重网格方法提供初始值, 以提高算法的收敛速度; 进而讨论了加权最小均方算法权值的选取准则, 采用基于干涉相位导数方差的稳定的二值质

收稿日期: 2000-05-16; 修订日期: 2001-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(69831040)

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2001/S0/S115/>

Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

量图取代相关系数权值, 增强了算法的适应性和稳定性。实际典型山区 X-SAR 干涉数据的处理结果显示了提出的算法的有效性。

1 干涉相位残差与路径无关的二维相位展开

在干涉处理过程中, 得到的干涉相位 γ 与真实相位 \angle 之间的关系可由下式给出

$$\gamma = W\{\angle\} = \text{mod}\{\angle + P, 2P\} - P \in [-P, P] \quad (1)$$

其中: $W\{\cdot\}$ 为将 \angle 缠绕到区间 $[-P, P]$ 并输出缠绕相位 γ 的缠绕算子。二维相位展开的目的就是找到真实相位 \angle 的估计 $\hat{\angle}$, 使其缠绕相位为 γ 。

于是二维相位展开可表示为如下线积分过程

$$I = \oint_C \hat{F}(r) dr + \angle(r_0) = \int_C \hat{\gamma}(r) dr + \angle(r_0) \quad (2)$$

其中: $\hat{F}(r) = \hat{\gamma}(r) = \hat{\angle}(r) + n^-(r)$; C 为定义域 D 内一条连接 r_0 和 r 的路径; $\hat{\gamma}(r)$ 为真实相位梯度 $\hat{\angle}(r)$ 估计, 称为测量相位梯度; $n^-(r)$ 为由此引入的误差。为实现正确的相位展开, 该积分结果应只与起始点有关而与所选择的路径 C 无关, 即要求

$$\hat{\gamma} \times F \equiv 0 \quad (3)$$

与之等价的另一路径无关充要条件可由格林定理导出^[5]

$$\oint_C \hat{\gamma}(r) dr = 0 \quad (4)$$

然而由干涉 SAR 数据中的噪声、遮挡、重叠及欠采样引起的残差现象使得式(3)不再成立

$$\hat{\gamma} \times \hat{\gamma}(r) = \hat{\gamma} \times n^-(r) \neq 0 \quad (5)$$

此时由 $n^-(r)$ 描述的 D 上的旋转分量场导致了路径相关的相位展开结果, 使得

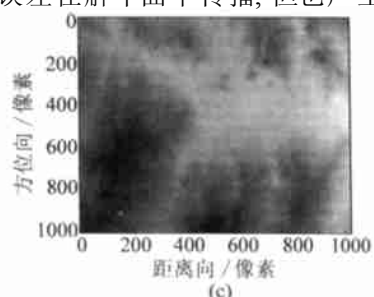
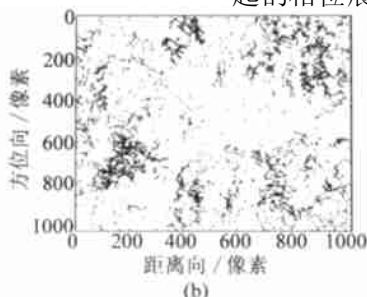
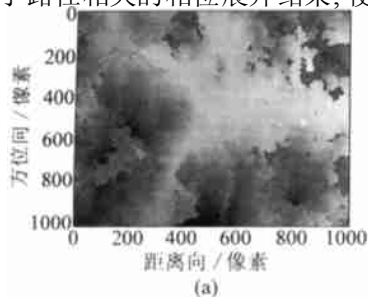


图 1 Goldstein 算法与 PCG 算法的相位展开结果

(a) Goldstein 算法相位展开结果; (b) Goldstein 算法选择的分支; (c) 最小均方 PCG 算法的连续展开平面

Fig. 1 Phase unwrapping results of Goldstein method and PCG method

© 1994-2016 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\oint_C \hat{\gamma}(r) dr = 2P \times (\text{环路环绕的残差极性总和}) \quad (6)$$

式(6)称为二维相位展开的残差定理^[5]。

残差的存在是二维相位展开的充分必要条件。由它造成的非保守场使路径无关的积分(相位展开)变得不可能; 而反过来, 残差的位置和密度决定了相位展开的难度, 同时暗示了相位展开会在什么地方出现问题。

2 积分路径相位展开方法

以上的残差分析构成了整个积分路径相位展开方法的基础, 如果用分支将极性相反的残差相连并使它们达到均衡, 相位可通过任何不穿过这些分支的路径进行展开。此时任何环路总是包围着同样数目的正负残差或根本不包围残差, 由式(6)的残差定理可知任何环路积分均为零, 式(4)中的路径无关条件就得到了满足。于是残差提供了构建分支和选择正确积分路径的线索。

积分路径方法的代表, 由 Goldstein, Zebker, Werner^[2] 提出的分支阻断算法正是基于这种思想。Goldstein 的做法是用分支连接并平衡毗邻的残差点, 即连接成对的极性相反的残差点或是成串的多个成对残差点(残差点还可以通过于图像的边缘相连得到平衡), 并使积分路径绕过分支。在设置分支的过程中 Goldstein 等采用了最短总分支长度策略。

图 1(a) 展示了 Goldstein 等的分支阻断法(简称 Goldstein 算法)对意大利一处典型山区的 X-SAR 数据的相位展开结果, 其中灰度代表了展开相位平面的高度信息。解缠前的干涉相位如图 3(a) 所示。图 1(b) 为该算法产生的分支图, 可以看到分支(黑色像素)的阻断虽然防止了由残差引起的相位展开误差在解平面中传播, 但也产生了

图 1(a)中的相位孤立区域。

Goldstein 法运算快捷且通常有可靠解,运算中需要的输入少(不需要相位质量图),存储空间小,是应该首先被尝试的二维相位展开方法^[5]。

通过观察分支的放置并判断是否有错误放置现象或被孤立的区域,通常可以判断算法的成败。然而,Goldstein 算法为了得到最短的总分支长度,只将最近的残差连接起来,并没有考虑到分支处相位数据的可靠程度,除利用了残差位置信息外缺少干涉相位质量图对分支的选择进行有效指导,由此导致的分支错误放置会造成展开相位中 2π 的不连续错误。在实践中可以看到,最近邻法则并不总是一个好的法则。

当有可靠的干涉相位质量图时,其他基于区域增长的积分路径相位展开算法可以得到更好的分支和积分屏障,从而得到较好的结果(Reigber 和 Moreira 1997, Xu 和 Cumming 1996)^[1]。

3 最小均方相位展开方法

最小均方意义下求解二维相位展开采用了与积分路径方法非常不同的思路。

在最小均方意义下,干涉 SAR 相位展开的解是根据真实相位梯度 $\ddot{\phi}$ 与测量相位梯度 s 之间的均方差最小而确定的,可以表示为

$$L[\phi] = \|\ddot{\phi} - s\|^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

其中: $L[\cdot]$ 表示需要最小化的函数; $\|\cdot\|$ 为范数算子

$$\|\ddot{\phi} - s\|^2 = (\ddot{\phi} - s, \ddot{\phi} - s) = \int_D \ddot{\phi} - s^* dS \quad (8)$$

可以证明二维相位展开问题在最小均方意义下的稳定解就是满足非齐次 Neumann 边界条件的泊松方程的解^[6]

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = s \quad \text{in } D \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} = s \cdot \hat{n} \quad \text{in } C \end{cases} \quad (9)$$

其中: C 是定义域 D 的边界; \hat{n} 为边界 C 的单位外法向量; $\ddot{\phi}$ 为 Laplacian 算子。

在无权的情况下,以上偏微分方程可用直接 FFT 或 DCT 方法实现,计算速度较快;由多重网格算法加速的经典的 Gauss-Seidel 迭代也可以快速解上述泊松方程,它的优点是不再象 FFT 和 DCT 方法一样要求输入的干涉相位数组维数为 2^n 。无权最小均方方法与 Goldstein 算法一样,具有运算迅速、存储空间需求小且不需相位质量图

输入等优点;与 Goldstein 算法不同的是它能够生成连续的相位展开平面,缺点是不能避开相位不一致的残差点,而是穿过残差区域,造成误差在展开相位平面中的传播,进而全面低估相位坡度的幅度。在实际应用中,无权最小均方算法常被用来“快速浏览”由干涉数据产生的数字高度图^[5]。

加权是最小均方方法消除坡度低估效应、提高精度的必需选择,此时 FFT 与 DCT 等快速变换不再适用,而只能采用共轭梯度法和 Gauss-Seidel 法等较慢的经典迭代方法,因此先验条件共轭梯度法(PCG)和加权多重网格算法被用来提高算法的收敛速度^[3,4]。前者采用了无权最小均方算法的结果作为每次迭代的先验条件,从而提高了收敛速度;后者则采用了多重网格技术来加速 Gauss-Seidel 迭代的收敛,得到了较 PCG 方法更快的收敛速度。权值的选择对以上 2 种算法均有重要的影响,不仅直接影响算法的精度,甚至能决定算法的成败。为了得到正确的展开相位,零权值必须被放置在类似于 Goldstein 算法中的连结残差的分支处,这就使得加权最小均方算法中对权值的确定从某种意义上等同于积分路径方法中对分支的设定。无论对积分路径法还是对最小均方方法,残差的位置永远是不可绕行的难题和方案。

图 1(c)给出了用最小均方算法中具有代表性的共轭梯度法得到的第 2 节所述同一区域干涉数据的相位展开结果。较图 1(a)中分支阻断算法的结果,它显然具有连续解的优势。

4 干涉相位导数方差加权的合成多重网格最小均方算法

第 3 节中讨论到在干涉 SAR 的相位展开算法中,加权最小均方算法只能利用经典的迭代方法如 Gauss-Seidel 迭代求解。经典的 Gauss-Seidel 迭代算法是基本的局部平滑算子,少数几步迭代就可以获得解的高频(即在更粗一级网格不能表现出来的信息)细节信息,但是对于低频信息(即在更粗一级网格仍能表现出来的信息)特征的恢复却是特别缓慢,其计算量为 $O(N^4)$,对于大型矩阵来说运算量是相当巨大的。Pritt 于是将一种高效的迭代算法多重网格算法引入到加权最小均方算法中^[4]。

多重网格算法的基本思想是将 Gauss-Seidel 松弛算法应用于更粗的网格上,通过网格粗化将解向量中的大尺度信息局部化,借鉴 Gauss-Seidel 等经典的松弛迭代方法利于恢复细节成分的

优势而取得快速收敛的效果。在解决椭圆型偏微分方程的问题上,多重网格方法在 $N \times N$ 网格上的计算量为 $O(N^2 \lg N)^{[4]}$ 。多重网格算法具体数学表示请见文献[4]。

Pritt 在文献[4]中给出的加权多重网格算法相位以 0 为迭代初值,并且根据干涉图像的相干性作为权值的计算根据。其计算量大,由于初值提供时未充分利用可利用的信息,势必增加迭代的次数。为提高计算的效率,本文从初始值及权值的设定两方面对该方法进行了改进和讨论,给出了合成加权多重网格算法。首先,考虑到 Goldstein 等的分支阻断方法具有速度快,结果较可靠的优势,用 Goldstein 算法的解作为多重网格算法的初值。利用了先验信息的初值,可以明显提高多重网格算法的收敛速度。

图 2 表现了无权多重网格算法(UWGD)与合成加权多重网格算法(SYNWMGD)的叠代收敛情况,给出了它们各自的 RMS 误差与叠代次数之间的关系。通过对图 2 的曲线的观察可以看到 SYNWMGD 较 UWGD 有更快的收敛效率。

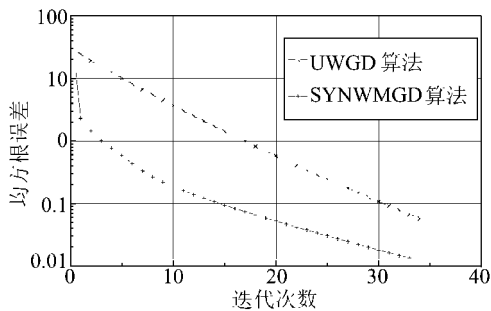


图 2 RMS 误差与迭代次数关系图

Fig. 2 Relation between RMS error and iterative times

另外,作为一种加权的均方算法,权值的输入与处理极大地影响着多重网格算法的性能,甚至决定了算法的成败^[5]。加权的均方方法试图用零权值抵销由相位梯度估计误差造成的残差影响。

真实相位梯度 $\nabla \cdot \langle r \rangle$ 的估计误差 $n \cdot \langle r \rangle$ 在真实相位梯度超过 $\pm p$ 时会引入 $2np$ 的残差。地形坡度欠采样与噪声是产生残差的根源。在粗糙的地形区,坡度可能任意的陡峭,从而在没有达到重叠的情况下产生高的相位梯度,所以对 $\nabla \cdot \langle r \rangle$ 的估计存在一个坡度偏差^[1]。于是,相位梯度估计误差 $n \cdot \langle r \rangle$ 是非零均值的,并依赖于地形坡度和系统相干系数,它的幅度随坡度而增加,随相干系数而下降。

若采用相关系数作为加权多重网格算法的权值,有其合理性。但这会对干涉数据的相关系数估计提出要求,计算量也相对较大。另外加权最小均方算法大多在 0-1 二值权值时有更好的表现^[5],容易受到干扰的图像相关系数也增加了生成二值质量图权值的困难,有时甚至不能得到有效的二值质量图。基于此种情况及以上对相位梯度估计的误差分析,采用了一种基于原始干涉相位数据而非复数数据的质量图做为多重网格算法的权值输入。它使用干涉相位导数的统计方差来作为质量评价手段,定义为^[5]

$$Z_{m,n} = \frac{\sum (\$^{i,j} - \overline{\$^{m,n}})^2 + \sum (\$^{i,j} - \overline{\$^{m,n}})^2}{k^2} \quad (10)$$

其中:下标 (i, j) 在以 (m, n) 为中心的 $k \times k$ 的窗口内求和; $\i,j 与 $\i,j 为干涉相位偏导数; $\overline{\$^{m,n}}$ 和 $\overline{\$^{m,n}}$ 为在 $k \times k$ 窗内的干涉相位偏导数的平均。在本文的算法中使用了 3×3 的窗口来计算相位导数方差。实验证明相位导数的方差是在不能得到或不能得到好的相关系数图时的可靠的相位质量评价手段。它直接来源于干涉相位,可直接有效地反映坡度变化不稳定的区域,而这些坡度变化不稳定的区域往往就是坡度陡峭,相干系数较小的区域,也即相位梯度估计容易出现误差的区域。另外它也易于生成二值质量图,是一种有效的加权最小均方算法权值。

以下为合成加权多重网格算法对上述意大利典型山区的处理结果。图 3 显示了 UWGD 对相位坡度的低估现象及 SYNWMGD 对该现象的校正。图 3(a) 为所选区域的干涉相位,图 3(b) 为将 UWGD 对干涉相位的解缠结果进行重新缠绕得到的相位条纹图,从两者条纹间距的差距可以明显看出平均相位坡度被严重低估。图 3(c) 为对采用干涉相位导数方差二值质量图加权的 SYNWMGD 的结果进行重新缠绕处理得到的条纹图,可以看到相位坡度被低估的现象得到了大幅度的校正,证明了基于干涉相位导数方差的权值的有效性。图 4(a) 为所选区域的 SAR 图像反射强度图,由于 SAR 图像成像过程的本身就是一个由三维空间到二维空间的映射过程,从该图中可以观察到坡度变化的大致情况。图 4(b) 是对式(10)得到的干涉相位导数图进行阈值分割后得到的二值相位质量图,也即权值图,可以看到由黑色像素标明的零权值基本上对应了所有坡度变化较陡峭的

区域。比较图 4(b)与图 1(b)可以印证第 3 节中关于积分路径法中分支的确定与最小均方法中权值的设置有相同之处的结论。图 4(c)为图 4(b)加权的 SYNWMGD 得到的真实解缠相位所重构的所选区域的数字高度图。

5 结论

对不同相位展开算法的比较,不仅有助于评

估算法的结果,也有助于深入理解相位展开算法的本质。额外的信息对相位展开来说非常重要,合成加权多重网格算法加入的正确的附加信息和先验知识提高了算法的速度和精度。本文最后对加权最小均方算法权值的讨论也证明了最优的质量图能否作为指导相位展开的先验知识,是提高相位展开算法性能的关键。

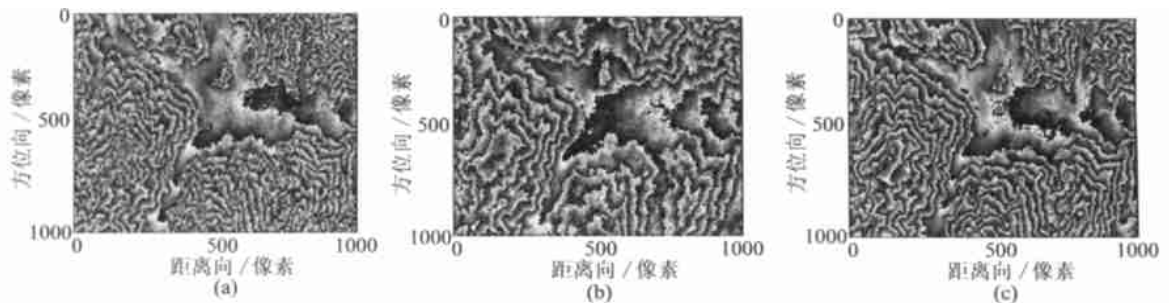


图 3 展开(解缠)相位重缠绕结果与原始干涉缠绕相位的比较

(a)解缠前的干涉相位图; (b)对 UWGD 算法展开相位重缠绕; (c)对 SYNWMGD 算法展开相位重缠绕

Fig. 3 Comparison between the rewrapped unwrapped-phase and the original wrapped phase

(a)original wrapped phase; (b)rewrapped UWGD-unwrapped phase; (c)rewrapped SYNWMGD-unwrapped phase

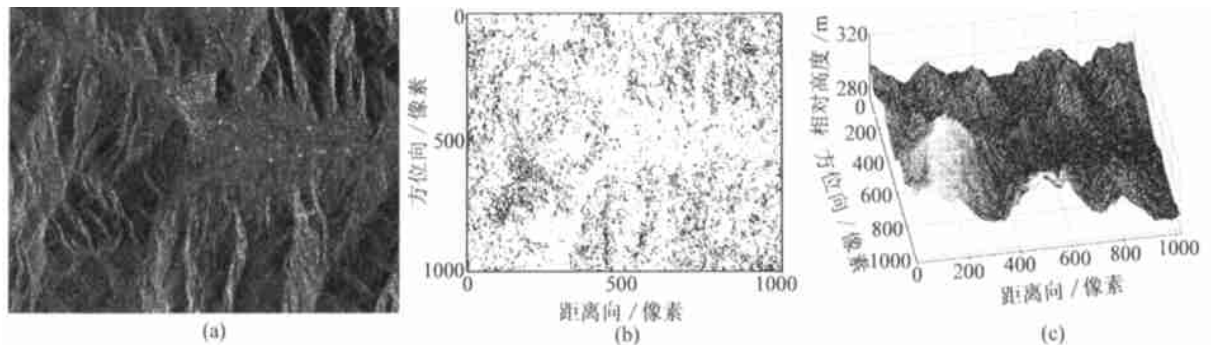


图 4 相位导数方差权值图的有效性及其最终数字高度图

(a)所选山区的 SAR 图像反射强度图; (b)相位导数方差二值质量图即权值图; (c)数字高度图

Fig. 4 Validity of phase-derivative-variance weight and DEM

(a)Intensity image of the test site; (b)mask map of phase derivative variance; (c)digital elevation map

参 考 文 献

- [1] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Inverse Problems, 1998, 14: R1- R54.
- [2] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. Radio Sci, 1988, 23(4): 713- 720.
- [3] Ghiglia D C, Romero L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. J Opt Soc Amer A, 1994, 11(1): 107- 117.
- [4] Pritt M D. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR [J]. IEEE Trans On GRS,

1996, 34(3): 728- 738.

- [5] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software [M]. New York : John Wiley & Sons Inc, 1998.
- [6] Fornaro G, Franceschetti G, Lanari R, et al. Robust phase unwrapping techniques: a comparison [J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(12): 2355- 2366.

作者简介:



李笑郁(1974-),女,河南禹州人,北京航空航天大学通信与电子系统专业在读博士生,从事图像处理与模式识别及干涉合成孔径雷达方向的研究工作。