

# 一种基于 InSAR 相干系数的 SAR 阴影提取方法

王 健<sup>1,2</sup> 向茂生<sup>1</sup> 李绍恩<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室,北京市北四环西路 19 号,100080)  
(2 中国科学院研究生院,北京市玉泉路甲 19 号,100039)

**摘 要:**给出了一种新的阴影提取方法,根据阴影区域在 InSAR 相干系数图上的特性,利用 Sigma 滤波和最优阈值分割算法实现阴影的自动提取。实验结果表明,本方法是一种高效的阴影提取方法。  
**关键词:**SAR; InSAR; 阴影; 相干系数; Sigma 滤波; 最优阈值化  
**中图法分类号:**TP751

阴影是合成孔径雷达(SAR)图像上一类普遍存在的现象,它是由地形遮掩效应引起的。SAR 图像中阴影区域的存在对图像的解译有利有弊,过多的阴影会造成信息的丢失,但阴影区域也可以提供关于地面目标的形状、相对位置、高度等信息<sup>[1]</sup>,这些信息在城区建筑物定位和重建中有着重要的应用<sup>[2]</sup>。在干涉 SAR(InSAR)数据处理中,阴影也有着很重要的影响。例如,由于阴影区域无雷达回波,通过相位解缠得到的阴影区域的相位是无效的数据,这就需要在相位解缠时对阴影区域的相位作特殊处理<sup>[2]</sup>。

目前,阴影区域的计算机自动提取存在着许多困难。尽管从成像原理上来说,阴影区域没有回波信号的暗区域,但由于相干斑(Speckle)等乘性噪声的影响,简单的阈值分割算法是无法将阴影区域从 SAR 图像上分离出来的。已有的阴影提取方法主要是利用各种滤波算法(如多视平滑、中值滤波、Lee MMSE、Frost、Kuan 等等)抑止 SAR 图像斑块噪声,再通过 SAR 图像上平滑阴影区域或锐化阴影与非阴影区域的边界来分离阴影。但这些算法大多只注重提取阴影区域的大概边缘和形状,对细节保留不够好。

## 1 相干系数分析

在干涉 SAR 处理中,干涉相干<sup>[3]</sup>是一个非常

关键的量值。复数影像之间用相干性来衡量影像之间的相似程度和干涉条纹图的质量,它也提供了地面散射体的重要信息。对于两幅复干涉影像  $s_1$  和  $s_2$ ,其相干系数的测度定义为:

$$\gamma = \frac{|E[s_1 s_2^*]|}{\sqrt{E[|s_1|^2]E[|s_2|^2]}} \quad (1)$$

对上式进行分解,可得:

$$\gamma = \gamma_{\text{SNR}} \cdot \gamma_{\text{Temporal}} \cdot \gamma_{\text{Spatial}} \quad (2)$$

式中, $\gamma_{\text{SNR}}$ 表示由附加噪声引起的去相干; $\gamma_{\text{Temporal}}$ 表示在获取干涉图像对期间,由于地面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干; $\gamma_{\text{Spatial}}$ 表示由于视角的不同造成两幅图像投影的差异引起的空间去相干。假设两幅影像的信噪比分别为  $\text{SNR}_1$  和  $\text{SNR}_2$ ,则有:

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \text{SNR}_1^{-1})(1 + \text{SNR}_2^{-1})}} \quad (3)$$

即信噪比越高,其相干系数越大。

对于机载双天线的 InSAR 系统,在时间去相干  $\gamma_{\text{Temporal}}$ 可以忽略不计,配准精度比较高的情况下,两幅复图像之间的相干系数一般都很高。但对于阴影区域来说,由于没有雷达回波信号,信噪比非常低,所以相干系数通常比较低。因此,从相干系数图上提取阴影区域,首先必须找到一种滤波算法,它能有效地滤除点状噪声,平滑块状区域,同时还要能保持阴影的边缘和细节信息,然后再根据分割算法将阴影区域分离出来。

2 算法原理

2.1 Sigma 滤波

Sigma 滤波<sup>[4]</sup>是一种原理简单但却非常有效的噪声平滑滤波算法。设像素点 $(x,y)$ 滤波前的灰度值为 $x_{i,j}$ ,滤波后的灰度值为 $\hat{x}_{i,j}$ ,且图像噪声均值为零,标准差为 $\sigma$ 。Sigma 滤波算法可描述如下。

1) 确定一个灰度值范围 $(x_{i,j}-\Delta,x_{i,j}+\Delta)$ , $\Delta=2\sigma$ 。

2) 对大小为 $(2n+1,2m+1)$ 的窗口内所有位于这个灰度范围内的像素点求和,并计算这些像素点的平均值。

3) 取 $\hat{x}_{i,j}$ 等于这个平均值( $2\sigma$ 均值),即有:

$$\delta_{k,l} = \begin{cases} 1, & (x_{i,j}-\Delta) \leq x_{k,l} \leq (x_{i,j}+\Delta) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{x}_{i,j} = \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-m}^{j+m} \delta_{k,l} x_{k,l} / \sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-m}^{j+m} \delta_{k,l} \quad (5)$$

对那些噪声统计特性未知的图像来说,噪声标准差 $\sigma$ 可以通过在 SAR 图像上选取一块平坦区域,计算这块区域的标准差来近似。

在窗口内, $2\sigma$ 范围足够包含绝大部分同样分布的像素,同时又能去除那些高对比度的噪声像素影响,图像的边缘和线性细节信息都被保留下来。主要的缺点是对几个像素点大小的孤立斑点噪声不能很好地滤除。为了克服这一点,可以在当灰度范围内的像素点数目 $M$ 小于某个指定值 $K$ 时,用窗口中心点的直接邻域均值(immediate neighbor average)来代替 $2\sigma$ 均值<sup>[4]</sup>,即步骤 3)可以用如下公式代替:

$$\hat{x}_{i,j} = \begin{cases} \text{two-sigma average}, & M > K \\ \text{immediate neighbor average}, & M \leq K \end{cases} \quad (6)$$

为了滤除孤立的斑点噪声又不损失细节信息, $K$ 值应该慎重选取,当窗口尺寸为 $m \times m$ 时, $K$ 应该不大于 $(m+1)/2$ 。

Sigma 滤波能够在有效平滑图像噪声的同时,保持图像的细节和线性特征,增强边缘信息。通过选择滤波窗口尺寸和 $K$ 值,Sigma 滤波可以有效地去除数据中尺寸小于 $K$ 的点状噪声。

2.2 最优阈值分割

最优阈值分割算法<sup>[5]</sup>将图像数据的直方图用两个或多个正态分布的概率密度来近似,阈值取为离对应于两个或多个正态分布最大值之间的最小概率处的数值。在相干系数的直方图上,阴影

区域和非阴影区域可看作是二模态的,其阈值可用如下迭代算法来确定。

1) 作为第一步,可假设阈值为某个中间值。

2) 在第 $t$ 步,分别计算阴影区域和非阴影区域的均值 $\mu_S^t$ 和 $\mu_B^t$ :

$$\mu_B^t = \frac{\sum_{(i,j) \in \text{background}} f(i,j)}{\# \text{background\_pixels}} \quad (7)$$
$$\mu_S^t = \frac{\sum_{(i,j) \in \text{shadow}} f(i,j)}{\# \text{shadow\_pixels}}$$

其中在第 $t$ 步将相干系数图分割为阴影区域与非阴影区域的阈值是 $T^t$ 。

3) 设

$$T^{t+1} = \frac{\mu_B^t + \mu_S^t}{2} \quad (8)$$

$T^{t+1}$ 提供了一个新的区分阴影与非阴影区域的阈值。

4) 如果 $T^{t+1} = T^t$ ,则停止迭代。否则,返回步骤 2)。

通常迭代 4~10 次就足够了,其结果是具有最小错误的分割(被错误分割的点最少)。

3 实验结果

实验采用中国科学院电子学研究所研制的机载干涉 SAR 系统飞行所得的数据。如图 1 所示,图 1(a)是 SAR 影像图,图 1(b)是对应的相干系数图,图像大小为 $1\,024 \times 768$ ,分辨率为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。数据区域为山区地形,起伏的山脊遮挡信号形成阴影,由于山体高度的起伏参差不齐,阴影区域的形状很不规则,在许多阴影区域中,包含有凸起的山体形成的小块亮区域,这增加了提取阴影的难度。同时,由于影像分辨率比较高,相干系数图中的点噪声也比较明显。

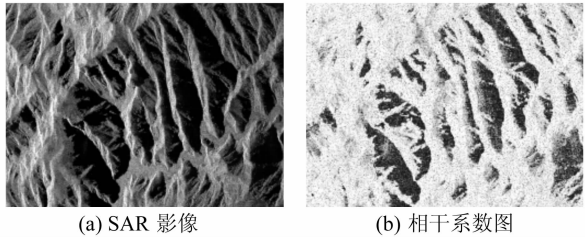


图 1 InSAR 数据

Fig. 1 InSAR Data

将本文方法应用于图 1 中的相干系数图,处理结果如图 2 所示。图 2(a)~2(c)为对相干系数图进行单次 Sigma 滤波结果,窗口尺寸分别为 $3 \times 3$ 、 $7 \times 7$ 、 $11 \times 11$ ,对应的 $K$ 值为 2、4、6,可以看到,太小

的滤波窗口不能有效地滤除噪声,随着窗口尺寸和  $K$  值的增大, Sigma 滤波对噪声的平滑作用越来越明显,但图像的细节信息也丢失越多。图 2(d)~2(e)为对相干系数图进行两次重复 Sigma 滤波后的结果,窗口尺寸分别为  $3\times 3$ 、 $5\times 5$ ,对应  $K$  值为 2、3,可以看出,重复使用 Sigma 滤波 2~3 次,可以选取小的窗口尺寸和  $K$  值,也能有效地去除噪声。图 2(e)使用  $5\times 5$  窗口滤波两次的效果比图 2(b)使用  $7\times 7$  窗口滤波一次的效果要好一

些。图 2(f)是对图 2(e)进行最优阈值分割的结果,所得的阈值很好地分离出了阴影区域。

从处理结果可以看出, Sigma 滤波结合最优阈值化可以有效地从相干系数图上分离出阴影区域。在 Sigma 滤波时,可先从相干系数图上目视估算点噪声的平均尺寸大小,再根据估算的噪声点尺寸大小来选择滤波窗口和  $K$  值的大小,选取尽量小的滤波窗口,进行 2~3 次重复 Sigma 滤波就能得到更好的结果。

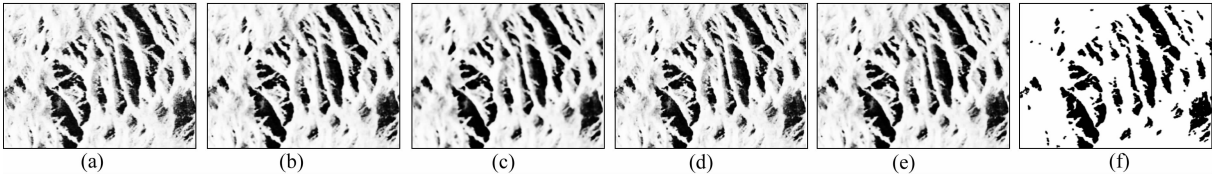


图 2  实际数据处理结果  
Fig. 2  Results of Experiments

4  与其他算法的比较

文献[2]中采用旋转滤波模板,通过计算阴影区域与非阴影区域的边界来提取阴影,将这种算法用于图 1(a)影像图,其处理结果如图 3(a)所示。文献[6]给出了基于等效视数模型的图像 RCS(radar cross section)重构算法进行阴影检测。该算法用于图 1(a),其结果如图 3(b)所示。3 种算法对图 1 数据处理所用时间如表 1 所示(实验环境为 CPU P4 2.4 G,内存 256MB)。

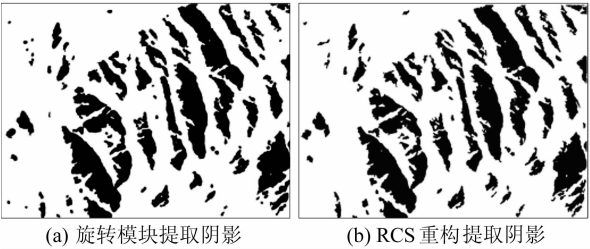


图 3  其他算法提取结果  
Fig. 3  Results of Other Algorithms

表 1  算法速度比较  
Tab. 1  Comparison of Algorithms' Processing Time

所用算法	所需时间/s
Sigma 滤波提取阴影( $5\times 5$ , $K=3$ , 两次)	5
旋转模板提取阴影( $7\times 7$ )	18
RCS 重构提取阴影	20

3 种算法对阴影细节的保留性能比较如图 4, 图 4(a)为图 1(a)右上角  $280\times 200$  大小区域经过灰度拉伸后的结果,后三幅图为三种算法对应的阴影提取结果。可以看出,由于局部 SAR 影像灰度范围的影响,旋转模板和 RCS 重构算法都扩大了阴影区域的范围,将许多非阴影的区域划为提取的阴影中,如图 4(c)、4(d)中都将右上角区域划为阴影,但实际图像上此区域并非阴影,只是一块暗区域而已。基于相干系数的 Sigma 滤波算法则比较准确地勾勒出阴影的范围。

由相干系数分析可知,阴影区域的相干系数必定很低,但相干系数低的地区不一定全为阴影。水面等一些回波信号比较弱的地方,其相干系数也比较低,表现在 SAR 影像上为一暗区域。对这

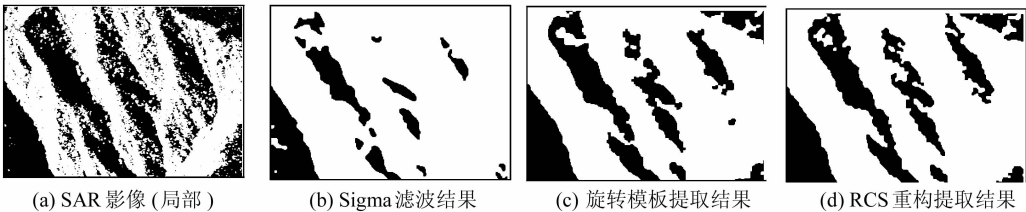


图 4  三种算法提取细节结果比较  
Fig. 4  Comparison of Three Methods' Results

些暗区域,上述三种阴影提取方法都容易将其误判为阴影。这可通过 SAR 影像的成像特性来消除这些误判。对于可形成阴影的遮挡物来说,其影像在阴影之前一般会有一块较亮的 Layover 区域,而水面等目标则没有这种现象,其形成的暗区域周围亮度一般比较均匀。检测可能的阴影区域周边的亮度值和两侧的对比度,可去除一部分虚假阴影区域。

基于 InSAR 相干系数的 Sigma 滤波阴影提取方法是一种 SAR 阴影提取的新思路,通过与文献[5,6]所用方法比较可知,基于相干系数的 Sigma 滤波阴影提取能检测出几乎所有阴影区域,排除了大部分干扰,同时很好地保持了阴影区域的结构信息,算法执行速度也快得多。但这种算法对数据要求比较高,需要提供检测区域的相干系数,而目前大多数情况数据只有 SAR 影像图,这也是本算法的不足之处。

参 考 文 献

1 Bennett A J, Blacknell D, Malvern Q Q. The Benefit

and Detriment of Radar Shadowing in Urban SAR Imaging. In Proceeding of EUSAR 2004, 2004(1):419~422

2 Heopfner K, Hanson A, Riseman E. Recovery of Building Structure from SAR and IFSAR Images. In ARPA Image Understanding Workshop, 1998. 559~563

3 廖明生,林 琿. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京:测绘出版社,2003

4 Lee J S. Digital Image Smoothing and the Sigma Filter. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1983, 24: 255~269

5 Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image Processing, Analysis and Machine Vision (2nd ed.). PWS: PWS Publishing, 1999

6 傅 琨,匡纲要,郁文贤. 一种合成孔径雷达图像阴影和目标检测的方法. 软件学报,2002,13(4):818~826

第一作者简介:王健,硕士生。研究方向为信号与信息处理。  
E-mail:wangj@mails.gscas.ac.cn

A Method for Extracting the SAR Shadow from InSAR Coherence

WANG Jian<sup>1,2</sup> XIANG Maosheng<sup>1</sup> LI Shao'en<sup>1,2</sup>

(1 Stacte National Key Lab. of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronic,Chinese Academy of Science, 19 Beisihuan West Road, Beijing 100080, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, A 19 Yuquan Road, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Shadow is a general phenomenon which occurs in SAR images, and it has many vital applications in various aspects. A new solution of shadow extraction is presented in this paper. By Sigma filter and optimal threshold segmentation algorithm, Shadow can be extracted from InSAR coherence. Both the theoretical analyses and the experimental results indicate that the proposed method is a highly efficient method of shadow extraction.

**Key words:** SAR; InSAR; shadow; coherence; Sigma filter; optimal threshold

About the first author: WANG Jian, postgraduate, majors in signal and information processing.  
E-mail: wangj@mails.gscas.ac.cn