

利用 ICA 算法进行全极化 SAR 影像滤波研究

余 洁^{1,2} 刘利敏² 李小娟¹ 赵 争³

(1 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京市西三环北路 105 号,100048)

(2 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 中国测绘科学研究院,北京市莲花池西路 28 号,100039)

摘 要:提出了一种基于 ICA 算法的全极化 SAR 的滤波方法。首先对全极化 SAR 的四通道 dB 强度影像进行 ICA 变换,分离出信号及噪声分量,将噪声设为极小值,然后利用混合矩阵混合得到滤除噪声后的强度影像,结合原始相位信息,计算滤波后的散射矩阵。采用 Foulum 地物的 EMISAR 数据进行试验,并采用相干斑指数、均方差指数、边缘保持系数以及极化相关系数进行评价。结果表明,该方法不但能有效滤除影像的噪声,在边缘等细节信息保持上也具有较大优势。此外,滤波后影像虽散射特性发生改变,但维持了地物间的差异,在基于统计特性的精细分类、边缘信息及小目标检测方面仍具有较好的应用潜力。

关键词:全极化 SAR;ICA 算法;滤波;相干斑;细节信息保持;散射矩阵

中图法分类号:P237.3

全极化 SAR 影像记录了地物在 4 种极化状态下的散射回波^[1],被广泛应用于对地观测中,但 SAR 影像受相干斑噪声的影响严重,目标检测、识别及后续处理困难增加。成像后的滤波方法主要分空间域和极化域滤波两类^[2]。以 Lee^[3]滤波及 Boxcar 滤波为代表的空间域滤波利用像素间的空间统计特性进行滤波处理,去除噪声时易导致边缘模糊和细节信息丢失^[4],为此,先后提出的多种自适应处理方法大部分是针对单极化影像的。以 Novak^[5]提出的 PWF 滤波器为代表的极化域滤波是利用数据的极化特性,通过复极化测量元素的最优组合来构造一幅图像^[4],滤波后相位差信息丢失,极化特性没有得到很好地保留。随着 SAR 影像应用的拓展,去斑的同时能较好保持极化和边缘等细节信息的滤波方法是近年来的研究热点^[4]。

独立分量分析(independent component analysis,ICA)算法是一种盲信号分离算法^[5],能有效将多维混合信号中潜在的差异信息分离开,该算法已在多极 SAR 滤波中得到应用^[5-9]。纪建^[8]和 Wang^[9]等人分别利用 ICA 算法对多极化 SAR 相干斑抑制开展研究,研究结果均表明 ICA 能有

效滤除噪声,且具有较好的边缘保持能力。但该方法与处理普通光学影像一样,将相干斑指数最小的幅度影像作为最终滤波结果^[8],导致极化 SAR 影像特有的极化和相位信息丢失,无法获得隐含的目标物理散射特性,不利于后续应用。对全极化 SAR 影像而言,进行滤波处理,在获得较好的滤波效果的同时,极化信息的保持也十分重要。

ICA 算法虽在多极 SAR 滤波中研究较多,却鲜见用于全极化 SAR 滤波的文献。本文在 ICA 算法的多极化 SAR 滤波的基础上进行改进,将该算法引入全极化 SAR 滤波中,以期得到较好的滤波效果的同时,保留极化和相位信息的散射矩阵,供后续应用。

1 基于 ICA 的多极化 SAR 滤波

ICA 算法从观测信号出发,以随机变量的非高斯性和相互独立性为分析目标,利用高阶统计量统计独立的原则,通过优化算法分解得到源信号的相互独立的成分^[9-10]。

在基于 ICA 算法的多极化 SAR 滤波中,一

收稿日期:2012-12-13。

项目来源:国家 863 计划资助项目(2011AA120404)。

组极化 SAR 数据被视为对同一场景提供的多幅影像,目标特性分散在被相干斑噪声污染的影像中,且与噪声相互独立。去斑的过程就是从观测影像中分离出期望的目标信号和相干斑^[3]的过程。极化 SAR 完全发育的相干斑是一种乘性噪声,模型为

$$I(i, j) = R(i, j)F(i, j) \quad (1)$$

其中, $I(i, j)$ 为图像上 (i, j) 点的像素强度; $R(i, j)$ 为该处无噪声污染的期望强度; $F(i, j)$ 为符合高斯分布的相干斑噪声。

滤波处理前,需对多极化 SAR 三个通道的强度影像进行对数量化处理,使相干斑乘性模型转化为线性混合模型,待处理的影像数据为线性混合数据,此时的观测数据为

$$X = [I_{hh_db}; I_{hv_db}; I_{vv_db}] \quad (2)$$

其中, I_{hh_db} 、 I_{hv_db} 及 I_{vv_db} 分别为 HH、HV 及 VV 极化通道对数化后组成的一维向量。

图像信号一般都服从非高斯分布,且与噪声相互独立,则对数量化后的极化 SAR 影像满足 ICA 算法要求的模型假设条件,故可采用 ICA 算法进行信号和噪声的分离,达到滤去噪声的目的。在分离得到的多个分量中,只有一个为无污染的图像信号,其余视为噪声信号。由于 ICA 的独立分量的顺序是不确定的,在基于 ICA 算法的滤波试验中,分离得到三个分量 $Y = [ICA1, ICA2, ICA3]$ 后,对各分量进行相干斑指数计算,最小的分量为图像信号,其余为噪声。这种方法在有效去斑的同时,较好地保持了图像的空间分辨率及细节纹理信息,但最大的缺陷是滤波处理后得到的是一幅丧失极化和相位信息的强度图像,后续应用范围有限。

2 基于 ICA 的全极化 SAR 滤波方法

本文结合全极化 SAR 影像特点,对 ICA 方法进行改进并将其引入到全极化 SAR 影像的滤波处理中,在获得较好的滤波效果的同时,得到细节信息保持较好的散射矩阵,可供特征分解、目标检测等后续的应用。

利用 ICA 进行全极化 SAR 滤波,输入数据为全极化 SAR 影像四极化通道的 dB 强度影像,对满足 $S_{HV} = S_{VH}$ 的互易情况,只需对 HH、HV 及 VV 这三种极化方式下的幅度影像进行 ICA 变换,得到三个独立分量,将 HV 极化方式获得的结果赋予 VH 即可。文中针对更一般的情况,

为获得去噪后的散射矩阵,进行以下步骤:

1) 噪声信息的识别。

将对数变换后的 4 通道的幅度影像组成矩阵 X_1 ,进行 ICA 变换,计算得到解混矩阵 W 、混合矩阵 A ,变换得到独立分量组成矩阵 Y_1 ,即

$$Y_1 = W \times X_1 \quad (3)$$

2) 去噪后的四极化通道的强度影像的获取。

由于观测量 X_1 是由包含信号和噪声的分量组成的矩阵 Y_1 按混合矩阵 A 线性混合得到,即

$$X_1 = A \times Y_1 \quad (4)$$

基于 ICA 算法的全极化 SAR 滤波模型中,四极化通道的极化 SAR 数据被视为对同一场景提供的多幅影像,且对固定观测视角和目标场景,信号和噪声的混合方式应是固定的。为消除观测时噪声的影响,将 Y_1 中的噪声分量设为一个极小值变形得到矩阵 Y_2 ,然后将归为极小值的噪声分量和图像信号按照混合矩阵 A 进行线性混合,重构得到的 X_2 应为无噪声影响下的观测量,且 X_2 中各极化通道的排列顺序同初始观测量 X_1 。即

$$X_2 = A \times Y_2 \quad (5)$$

由于 Y_2 是将 Y_1 中的噪声分量归为极小值变形得到的,其信号分量保持不变,因此可认为是 Y_1 的近似。

3) 滤波后的散射矩阵 S 的解算。

对全极化 SAR 的 S 矩阵来说,忽略绝对相位值, S 矩阵可视为由 5 个独立参数、三个振幅量和两个相位量 φ_{11} 、 φ_{22} 构成^[11]

$$S = e^{j\varphi_{11}} \begin{bmatrix} |S_{11}| & |S_{12}| e^{j(\varphi_{12} - \varphi_{11})} \\ |S_{21}| e^{j(\varphi_{21} - \varphi_{11})} & |S_{22}| e^{j(\varphi_{22} - \varphi_{11})} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于 5 个参数相互独立,则强度信息的变化可视为不影响对应极化方式下的相位。

由于本文方法是通过 4 种极化方式的强度影像的变换来滤除噪声的,所以假定滤波前后相位信息保持不变。利用去噪后四通道的 dB 强度影像,采用原始相位求解滤波后的散射矩阵 S 。

假设影像中某一极化方式上 i, j 点的复散射系数为 $S = a + bi$, a, b 未知,则可通过该点在该极化方式下的相位 $pha(i, j)$ 和 dB 强度 $I_{db}(i, j)$ 求解,求解过程如下:

$$pha(i, j) = 180^\circ \times atan(b/a)/\pi, -180^\circ < pha < 180^\circ$$

$$I_{db}(i, j) = 10 \lg(a^2 + b^2)$$

如果 $abs(pha(i, j)) < 90,$

$$\begin{cases} a = \sqrt{10^{(I_{db}(i, j)/10)} / (1 + \tan^2(pha(i, j) \times \pi/180))} \\ b = a \times \tan(pha(i, j) \times \pi/180) \end{cases}$$

如果 $\text{abs}(\text{pha}(i,j)) > 90$,

$$\begin{cases} a = \frac{1}{\sqrt{10^{(\text{abs}(\text{pha}(i,j))/10)} / (1 + \tan^2(\text{pha}(i,j) \times \pi/180))}} \\ b = a \times \tan(\text{pha}(i,j) \times \pi/180) \end{cases}$$

3 试验结果与分析

为验证本文方法的去噪效果及边缘保持能力,采用丹麦 Foulum 地区的 EMISAR 数据进行试验,并以典型滤波算法 Lee 滤波及 Boxcar 滤波作对比试验^[12]。试验区大小为 766 像素×796 像素,包括不同植被构成的均匀区域。由于得到独立分量后需进行重构,白化过程中不进行降维处理。

利用 ICA 算法进行全极化 SAR 影像滤波前,将每幅单极化数据转换为一维行向量,共同构建 $4 \times 609\ 736$ 的观测矩阵 X 。分别对试验区进行本文方法、Lee 及 Boxcar 算法的滤波试验,选取滤波前后的总功率影像 SPAN 进行滤波效果对比。

图 1 分别为未进行滤波、Lee 滤波、Boxcar 滤波及本文方法滤波后得到的 SPAN 影像。对比图 1 的 4 幅影像,三种滤波方法均能滤除一定的相干斑噪声,滤波后的 SPAN 影像同质区域更为一致,地物更分明,且本文滤波方法的去噪能力稍差于基于空间统计特性的 Lee 滤波以及 Boxcar 滤波。从边缘和细节信息来看,ICA 算法不但能滤除边缘和细节处的噪声,且保证影像分辨率不变;而 Lee 及 Boxcar 滤波在滤波时降低了影像分辨率,故本文方法边缘细节信息保持较好,图 1(d)效果优于图 1(b)及图 1(c)效果。

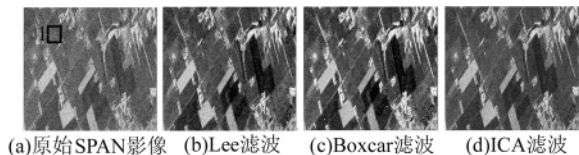


图 1 Foulum 地区数据滤波前后的 SPAN 影像

Fig. 1 Comparison of SPAN Image Before and After Filtering

选择相干斑指数、均方差指数和边缘保持指数三个指标对本文方法进行定量分析。相干斑指数 β 是影像上同质区域的像素值的标准差与均值的比值, β 值越小,像素间差异越小,噪声越弱,滤波能力越强;均方差指标 MSE 表示影像上同质区域滤波前后差值的平方和的均值,值越大,滤波性能越强。

分别对图 1 的 4 幅影像的区域 1 所示的同质

区域进行 β 、MSE 计算,结果如表 1 所示。

表 1 不同方法滤波效果指数以及前后边缘保持指数对比

Tab. 1 Comparison of Speckle Reduction Index and Edge Preservation Index

	原始 SPAN	Lee 滤波	Boxcar 滤波	ICA 滤波
β	0.157 9	0.095 1	0.090 2	0.099 2
MSE	0	1.827 4	1.876 3	1.764 1
垂直 ESI	1.000 0	0.541 9	0.502 9	1.095 6
水平 ESI	1.000 0	0.593 8	0.562 1	1.342 7

表 1 中 β 、MSE 表明,三种方法均可滤除全极化 SAR 影像上大部分的噪声,但本文方法滤波性能稍逊于 Lee 及 Boxcar 滤波。

边缘保持指数 ESI 以滤波前后边缘区域的梯度比值对滤波后的边缘信息变化程度进行表征,文中从水平和垂直两个方向进行定量评价,值越大,滤波后边缘的差异越大,边缘细节保持越好。

图 2 为试验时用于计算边缘保持指数的区域放大图,由图 2(d)可知,ICA 滤波后,不论是目标或黑框的线状地物均更清晰明显。对该区域进行 ESI 计算,结果见表 1。原始的 SPAN 影像未进行滤波处理,故边缘保持指数为 1;Lee 滤波及 Boxcar 滤波算法在滤波时以牺牲空间分辨率为代价,造成边缘信息模糊,梯度差异变小,边缘指数均小于 1;而本文方法在滤除边缘噪声的同时,维持原始影像的分辨率不变,故滤波后边缘细节更清晰,差异度更大,说明本文方法在边缘细节的保持上具有较大优势。

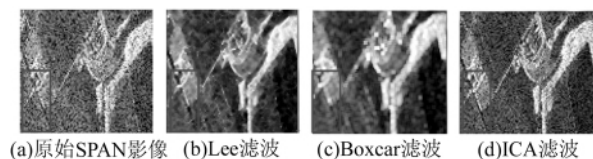


图 2 Foulum 地区数据的边缘放大图

Fig. 2 Edge Enlargement of Foulum Region Data

本文对幅度影像进行 ICA 计算,将噪声分量归为极小值并重构,去噪后会造影像信息的损失,导致散射矩阵极化特性发生变化。而由图 1(d)可知,本文方法虽改变了影像的极化散射特性,但滤波后不同地物的散射特性具有明显差异性,同一地物散射特性具有较强的一致性,滤波并未造成不同地物间分布的混乱。本文方法利用原始相位计算滤波后的散射矩阵,使得滤波后影像的极化相关系数变化极小。对滤波前后影像上同质区域的相关系数进行计算,如表 2 所示。当计算结果保留小数点后 8 位有效数字时,滤波后仅最后两位有效数字发生改变,极化系数变化率

约为 0.000 05%。为表述方便,表 2 中均保留小数点后 4 位有效数字,则滤波后变化率为 0。

表 2 本文方法滤波前后相关系数结果对比

Tab. 2 Correlation Coefficient Comparison Between Before and After Filtering by ICA

极化相关系数	滤波前	ICA 滤波后	滤波后变化率/%
Ro(VV/HH)	0.958 9+0.283 7i	0.958 9+0.283 7i	0
Ro(HV/HH)	-0.428 8 + 0.903 4i	-0.428 8 + 0.903 4i	0
Ro(VH/HH)	-0.428 8 + 0.903 4i	-0.428 8 + 0.903 4i	0

4 结 语

利用 ICA 在盲信号分离时不但能获得相互独立的分量,且不影响空间分辨率的特性,在两个假设的基础上,将该算法引入全极化 SAR 滤波中。试验与分析表明,本文方法滤波后得到相关系数变化极小的散射矩阵;滤波效果虽稍逊于 Lee 及 Boxcar 算法,但由于在滤波时不影响影像的空间分辨率,所以在边缘细节保持上具有较大优势,因而本文方法在基于统计特性的极化 SAR 分类、边缘或小目标检测算法处理领域中具有较好的应用潜力。

本文方法滤波得到的散射矩阵虽然相关系数保持较好,但散射特性的改变势必会对利用散射机理进行分类或者检测的应用造成影响,如何保持极化特性是本文下一步的研究目标。

参 考 文 献

- [1] 韩春明,郭华东,王长林. SAR 图像斑点噪声抑制的本质[J]. 遥感学报,2002,6(6):470-474
- [2] 周晓光,匡纲要,万建伟. 多极化 SAR 图像斑点抑制综述[J]. 中国图形图像学报,2008,13(3):377-385
- [3] Lee J S, Grunes M R, De Grandi G. Polarimetric SAR Speckle Filtering and Its Implication for Classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1999,37(5):2 363-2 373
- [4] 邓少平,李平湘,张继贤,等. 基于乘积模型的极化

SAR 滤波[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(10):1 168-1 171

- [5] Novak L M, Burl M C. Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR Imagery[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst,1990,26(2):293-305
- [6] Wu Dingxue, Fang Wenping. Combining ICA with LSSVM for Speckle Reduction of SAR Image[C]. 2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing, Washington D C, 2009
- [7] 张中山,余洁,燕琴,等. 基于核独立成分分析的极化 SAR 图像相干斑抑制[J]. 测绘学报,2011,40(3):289-295
- [8] 纪建,田铮. 极化 SAR 图像相干斑抑制的 ICA 方法与分析[J]. 中国图像图形学报,2008,13(8):1 437-1 442
- [9] Wang H, Pi Y, Liu G. Applications of ICA for the Enhancement and Classification of Polarimetric SAR Images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008,29(6):1 649-1 663
- [10] 曾生根,王小敏,范瑞彬. 基于独立分量分析的遥感图像分类技术[J]. 遥感学报,2004,8(2):150-157
- [11] 王超,张红,陈曦,等. 全极化 SAR 合成孔径雷达图像处理[M]. 北京:科学出版社,2008
- [12] 巫兆聪,欧阳群东,胡忠文,等. 四分量散射模型在极化 SAR 相干斑滤波用的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(7):763-766

第一作者简介:余洁,教授,博士,博士生导师,研究方向为遥感图像处理。

E-mail:yuj2011@whu.edu.cn

Applications of ICA for Filtering of Fully Polarimetric SAR Imagery

YU Jie^{1,2} LIU Limin² LI Xiaojuan¹ ZHAO Zheng³

(1 State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation, Capital Normal University, 105 North West 3rd Ring Road, Beijing 100048, China)

(2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Chinese Academy of Surveying and Mapping, 28 West Lianhuachi Road, Beijing 100039, China)

Abstract: A new class of filters for fully PolSAR image using ICA algorithm is proposed in this paper. This method, first transforms the four channel dB level intensity images by ICA,

and gets four independent components, then sets noise components to the minimum, third utilizes the mixed matrix to calculate the four intensity image without noise, finally uses the original phase to work out the scattering matrix haven been filtered speckle. For verifying the validity of the method, the EMISAR data of Foulum is tested. Experiment results demonstrate that the method proposed can effectively filter speckle, and also has many advantages in preserving detail information. Even though polarization signatures of the scattering matrix after filtering have changed, differences and distinctive of objects are kept. Therefore, the proposed filter has large potential application in the fields of classification, edge and small target detection based on the statistical characteristics.

Key words: fully PolSAR; ICA; filter; speckle; details preservation; scattering matrix

About the first author: YU Jie, professor, Ph.D, Ph.D supervisor, majors in remote sensing data processing.

E-mail: yuj2011@whu.edu.cn

(上接第 211 页)

3D Reconstruction of Building Rooftops from LiDAR Data and Orthophoto

CHENG Liang¹ LI Manchun¹ GONG Jianya² SHAN Jie^{3,4}

(1 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology,
Nanjing University, 22 Hankou Road, Nanjing 210093, China)

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(4 School of Civil Engineering, Purdue University, Indiana, USA)

Abstract: A method to reconstruct 3D building rooftops by the integration of LiDAR data and orthophoto is proposed. It consists of three main steps: rooftop patch extraction, rooftop line determination and 3D rooftop model reconstruction. Two new algorithms are proposed: a method on rooftop patch detection by integrating triangle clusters and dynamic triangle propagation; an algorithm based on LiDAR data and imagery for precise rooftop line extraction. The results demonstrate that complex building rooftops can be reconstructed well by proposed method. For the reconstructed 3D rooftop models in test area 1 and 2, the correctness are 86%, 90%, respectively; the completeness are 85%, 88%, respectively; the geoposition accuracy are 0.39 m, 0.31 m, respectively.

Key words: 3D reconstruction; building rooftop; LiDAR; orthophoto

About the first author: CHENG Liang, Ph.D, associate professor, majors in LiDAR remote sensing and its application.

E-mail: lcheng@nju.edu.cn