

基于ICA的极化SAR图像相干斑抑制

陈红艳, 李磊民

(西南科技大学信息工程学院 四川 绵阳 621010)

【摘要】根据极化SAR图像的特点,针对传统空域滤波方法总存在降低相干斑与有效保持边缘纹理信息这一对矛盾,探讨了基于独立分量分析的极化SAR图像相干斑抑制技术,研究了两种基于ICA的极化SAR图像相干斑抑制方法,并分析了其优缺点及应用条件。实验结果表明:基于独立分量分析的方法能有效降低相干斑噪声,较好地保留边缘纹理信息,是一种有效的相干斑抑制方法。

关键词 独立分量分析; 极化SAR; 相干斑; 稀疏编码
中图分类号 TP751 **文献标识码** A

Speckle Reduction in Polarimetric SAR Images Based on Independent Component Analysis

CHEN Hong-yan, LI Lei-min

(College of Information Engineering, SWUST of China Mianyang Sichuan 621010)

Abstract After analyzing the characteristics of polarimetric SAR images, the paper studies two methods of speckle reduction in polarimetric SAR images based on independent component analysis, then analyses advantages and applications of each algorithm. The experiment results show that the image edges are retained and the speckle are removed effectively with the methods of independent component analysis.

Key words independent component analysis; polarimetric SAR; speckle; sparse coding

独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)是一种新的多维数字信号处理技术,通过计算数据的高阶统计信息,可以从观测信号中估计出互不相关且尽可能相互统计独立的、原始的、被未知因素混合的信号估计信号^[1]。该方法在盲源信号分离、图像处理、多用户检测^[2]等领域中已得到较成功的应用。

目前,ICA在遥感技术上的潜在应用也得到检验,尤其在极化合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像处理中,ICA技术可以有效提高图像质量、改善像素分类性能。本文针对传统的空域滤波算法如Frost滤波, Kunitz滤波, Lee滤波等及其改进算法在抑制相干斑的同时总伴随边缘模糊和损失有用信息的缺点,采用两种不同的基于独立分量分析方法对实际极化SAR数据进行相干斑抑制,并对处理效果进行了评估。

1 基本原理

ICA的基本模型表达形式非常简单,不考虑时间因素,只考虑随机变量的形式,则ICA的基本数学模型为

$$X = AS = \sum_{i=1}^m s_i a_i \quad (1)$$

式中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为一组 n 维随机观测向量; $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)^T$ 为 m ($m > n$) 个未知源信号; $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ 为混合矩阵; a_i 是ICA的基向量; A 、 S 未知。对这个模型作基本假设:

(1) 未知源信号 s_1, s_2, \dots, s_m 在统计意义上彼此独立; (2) 源信号中至多只有一个分量服从高斯分布。

这样,可确定基于ICA的系统模型,从而利用ICA方法从观测量中估计出各个独立分量,作为源信号的估计信号。但是,模型中存在一些固有的不确定性问题:各个独立分量幅度的不确定性和独立分量顺序的

收稿日期: 2006-04-03

基金项目: 国防基础科研基金资助项目(A3120060264)

作者简介: 陈红艳(1979-),女,硕士,助教,主要从事雷达信号与图像处理方面的研究; 李磊民(1960-),男,教授,主要从事测控方面的研究。

不确定性。从信号分离的角度出发,这两种不确定性是允许的。

2 基于ICA基本模型的相干斑抑制技术

2.1 极化SAR图像中相干斑特性分析

极化SAR成像中,能同时获得同一场景的不同极化方式的图像数据,为雷达图像中的信息获取和处理提供了更加丰富的目标信息。但是,由于斑点噪声的影响,在SAR图像中出现很大的点与点之间的灰度级波动,直接影响着目标检测、分类和识别等。真实的目标特性分散在这些被相干斑噪声污染的图像中,且与相干斑相互独立^[3]。文献[4]证明了对于乘性噪声,在独立视数足够大(通常 $N>3$)的情况下,Gamma分布的相干斑噪声取对数变换后,其概率密度函数近似服从高斯分布,方差为 $1/N$ 。

2.2 基于ICA基本模型的降斑方法

图像处理前,通常对SAR原始数据采用对数量化的方法,使相干斑乘性噪声转化为加性噪声,同时可使噪声近似服从高斯分布,且与目标信号相互独立。极化SAR可为同一场景提供多幅图像,这相当于观测信号的个数大于独立源个数。另外,由于图像信号一般都服从非高斯分布,使得在这些观测信号中,最多只有一个源服从高斯分布。因此,极化SAR图像数据经对数量化后,满足ICA算法的应用条件,可以利用ICA算法从这些极化SAR图像中分离出多个独立分量,其中某一分量即为待求的降噪后的图像。

实验数据采用的是航天飞机在1994-10-4SIR-C雷达L波段香港地区的图像数据,大约5.23视,从中截取了相对均匀的即有岛屿又有海洋的部分,L波段三种极化方式如图1所示。图1a为HH极化、图1b为HV极化、图1c为VV极化图像。实验中采用基于正交对称矩阵的快速定点算法(FastICA)^[5]实现源信号分离。

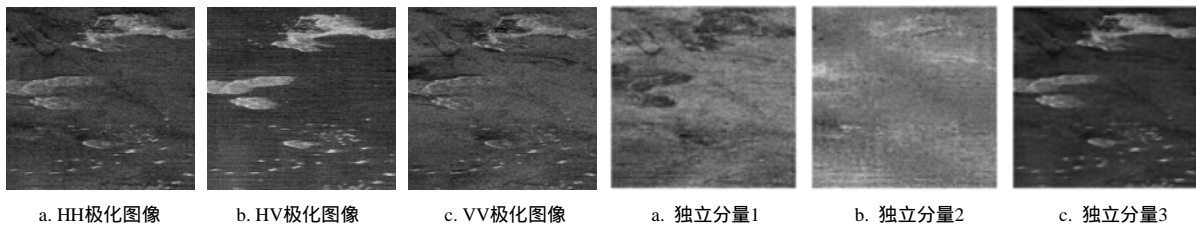


图1 L波段三种极化方式原始图像

图2 ICA处理后图像

利用ICA进行极化SAR图像相干斑抑制具体实现步骤如下:

(1) 数据预准备:对每幅 256×256 像素的图像数据逐行按像素位置首尾相连转化成 1×65536 的向量,由这三幅图像得到一个 3×65536 的矩阵,记为 X ,再对其进行归一化处理。(2) 数据预处理:对预准备后的数据进行中心化和白化处理。(3) ICA算法分离噪声:采用FastICA求解解混矩阵 W ,计算 $U = WX$, U 即为源信号 S 的估计。将 U 的各行向量转化为 256×256 的二维图像数据,计算相干斑指数,取值较小者为降噪后的SAR图像,其余为噪声。

实验步骤(2)中,ICA处理前没有利用PCA原理进行降维处理,因此,图像分离后得到3个独立源。处理后的图像如图2所示。从图中的视觉上看,图2c具有更好的图像质量,即为无相干斑噪声污染的源图像信号的估计。本文采用相干斑指数对SAR图像质量进行定量评估,即图像的标准差与均值的比值为:

$$\beta = \sqrt{\text{var}(I)} / E(I) \quad (2)$$

式中 I 是SAR图像中点的强度。 β 越小,相干斑噪声越小,相干斑抑制能力越强。表1定量地分析了图1和图2中的一块相对均匀区域的相干斑指数,经FastICA处理后的独立分量3具有更低的指数值,分量1、2均为噪声。从表中可以看出,在极化SAR图像中,ICA表现出了较好的噪声分离和较高的相干斑抑制能力,同时,很好的保留了点目标、边缘和纹理细节特征。

但是,该算法认为极化SAR图像源中只有一个是真实场景图像,不同极化通道的图像看作是多个观测量,这样,图像分离后仅获得一幅有用的增强图像,丢失了极化信息。而对同一场景,不同的极化方式会包含一些不同的细节特征,可为多极化图像带来更加丰富的目标信息、增强抗干扰能力、提高目标检测能力等,因此,有必要保留这些极化信息。

表1 相干斑指数

原始极化图像			ICA处理后图像		
HH极化	HV极化	VV极化	独立分量1	独立分量2	独立分量3
0.166 4	0.210 6	0.171 5	0.158 0	0.152 8	0.130 6

3 基于ICA-SCS的相干斑抑制技术

3.1 基于ICA的稀疏编码收缩(ICA-SCS)算法

在图像数据的ICA噪声模型中：

$$X = A(S + n) \quad (3)$$

式中 S 为待估计的独立分量, 其中各个分量 s_i (S 的行向量) 服从超高斯分布, 本文假设服从典型的稀疏分布(Laplace分布); n 为独立于 S 的高斯噪声, 方差矩阵记为 $\sigma^2 I$ 。当解混矩阵 W 为正交矩阵时, 解混变换后 S 的估计量 $U = WX$ 中混有的噪声方差仍为 $\sigma^2 I$, 即分量 u_i (U 的行向量) 为超高斯分布的待估计变量与高斯随机变量(方差为 σ^2) 的和, 那么待估计量 s_i 的最大似然估计 \hat{s}_i 有如下形式:

$$\hat{s}_i = f(u_i) = \text{sign}(u_i) \max(0, |u_i| - \sqrt{2}\sigma) \quad (4)$$

对解混得到的每个分量 u_i 都运用式(4)进行收缩运算, 将其中取值较小的元素置零, 便可消除噪声在编码中的影响, 保留图像的本质特征。具体算法步骤如下:

(1) 使用和待处理数据具有相同统计特性的无噪声图像数据作为训练样本, 估计稀疏编码变换矩阵 W : 利用ICA模型估计混合矩阵 A , 然后对其正交化, 记为 W^T , 求逆, 即得 W 。(2) 计算含噪声数据在稀疏基 W 上的投影 $U = WX$, 得到相应的含噪声的分量 u_i (U 的行向量)。用非线性函数 $f(\cdot)$ 对每个分量 u_i 进行收缩运算: $s_i = f(u_i)$ 。(3) 反变换回原始数据空间, 得到无噪声的原始图像的估计 $X = W^T S$ 。

3.2 基于稀疏编码收缩算法的相干斑抑制实验

实验数据同2.2小节, 独立视数 $N > 3$, 因此图像中的斑点噪声近似服从高斯分布, 满足稀疏编码收缩算法的应用条件。本文选取的训练样本是13幅具有代表性的自然图像, 从中随机截取一系列 8×8 的子图像, 按像素位置首尾相连构成 1×64 的列向量, 实验中选取10 000个这样的样本, 形成 $64 \times 10\ 000$ 的训练样本, 经预处理后作为FastICA的输入样本。ICA处理后, 获得 64×64 维的图像块分离矩阵 W_i 和混合矩阵 A , 其中 A 的每列为 64×1 的列向量, 对应一个 8×8 的基图像, 如图3所示。另外, 重建原始图像时, 该步骤是对图像中相互重叠的每个子窗口单独处理的, 相当于每个像素被重建了64次, 对其取平均即可, 处理后的图像如图4所示。

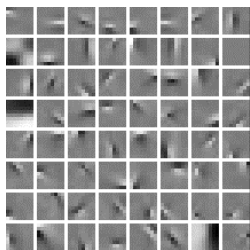


图3 实验中提取的基图像



图4 经稀疏编码收缩算法处理后的极化图像

表2 相干斑指数

	HH极化	HV极化	VV极化
原始图像	0.166 4	0.210 6	0.171 5
处理后图像	0.084 2	0.103 6	0.114 5

比较图1和图4, 后者中各个极化通道的图像质量得到明显改善。计算同样均匀区域的相干斑指数如表2所示, 可以看出, 该算法具有较强的相干斑抑制能力。由于实验中提取的基向量是基于描述图像本质特征的高阶统计信息, 收缩运算仅消除了编码中的噪声, 且认为每个极化通道获得的极化图像中都包含独立源信息, 因此, 图像重建后, 获得三幅有用的增强图像, 保留了极化信息, 而且相干斑得到较大程度的抑制。

4 结束语

基于ICA基本模型的相干斑分离算法, 方法简单, 可用于多频或多时相或多天线获得的同一场景的SAR图像相干斑抑制。基于ICA的稀疏编码收缩算法能保留多个极化通道的信息, 但是需要预先知道无噪声的图

像数据作为训练样本估计稀疏编码变换矩阵,较基于ICA基本模型的相干斑分离算法复杂,并且,只有在视数大于3时,该算法才能去除图像中近似服从高斯分布的相干斑噪声,否则,消除噪声能力非常有限。

从实验结果可以看出,基于ICA的两种方法都能有效减少相干斑,同时,具有较好的保留边缘纹理特征的能力,克服了传统的空域滤波方法在抑制相干斑的同时损失有用信息的缺陷,明显改善了图像质量,而且方法简单,自适应强。可以预见,这些方法将在雷达和遥感图像处理领域获得广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. Independent component analysis[M]. New York: John Wiley, 2001.
- [2] Hyvarinen A, Oja E. Independent component analysis: Algorithms and applications[J]. Neural Networks, 2000, 13(4): 411-430.
- [3] Pi Yi-ming, Yang Xiao-bo, Liu Guo-qing. Polarimetric speckle reduction using multi-texture Maximum likelihood method[J]. IEE Electronic Letter, UK, 2003, 39(18): 1 348-1 349.
- [4] Arsenault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed[J]. Journal Optical Society America, 1976, 66(11): 1 160-1 163.
- [5] Hyvarinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. Neural Processing letters, 1999, 10: 1-5.

编 辑 漆 蓉

(上接第480页)

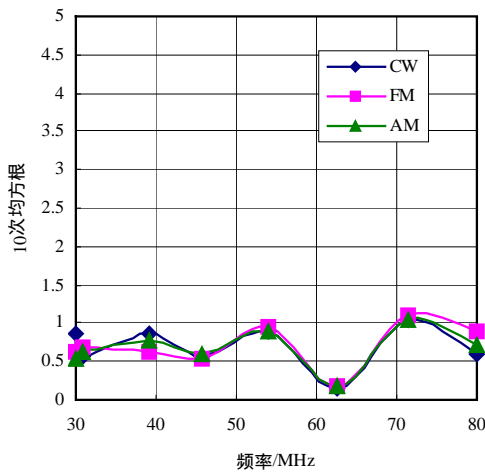


图5 近距离实测数据图

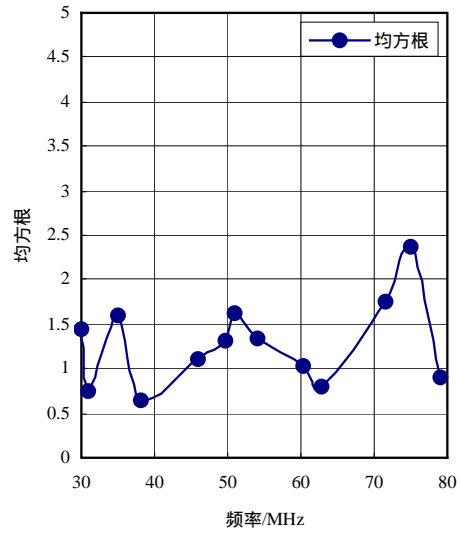


图6 远距离实测数据图

5 结 束 语

本文中的双通道多普勒宽带测向法着眼于设备简单、适应能力强这两个方面,它可以在已有的侦察接收天线和接收机的基础上增加少量设备使之具备测向能力。通过计算机仿真和实测结果显示,采用本文介绍的测向方法可以实现对宽带信号进行多普勒测向。

参 考 文 献

- [1] 鲁道夫 格拉鲍. 无线电测向技术[M]. 平良子译. 成都: 西南电子电信技术研究所, 1993.
- [2] 金克斯 H H. 小孔径无线电测向[M]. 蒋盘林, 钱晓华, 曹国英, 等译. 嘉兴: 电子部第三十六研究所《通信对抗》编辑部, 1995.

编 辑 刘 文 珍