

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.014

基于三维匹配块的 SAR 图像相干斑抑制研究*

张璇^{1,2,3} 郝明磊³ 行鸿彦^{1,2} 曾祥能³

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044;
2. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044;
3. 北京航空气象研究所 北京 100085)

摘要:合成孔径雷达(SAR)图像中存在相干斑噪声,不能准确反映照射区域的散射特性,增加了信息提取的难度。三维匹配块(BM3D)算法是在变换域中的稀疏表示,将相似的图像块分到一个三维空间中,从而达到去噪的目的。通过对噪声模型特征的分析及参数设置,将适用于加性噪声模型的 BM3D 算法应用到乘性噪声中。采用仿真与传统方法对比表明,利用 BM3D 算法抑制相干斑噪声,其边缘保持指数达到了 0.484 5,在降噪的同时又较好地保存了图像的细节特征,验证了算法的有效性。

关键词:合成孔径雷达图像;相干斑噪声;三维匹配块

中图分类号: TP75; TN957.52 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Research on de-speckling of SAR image based on 3D matching block

Zhang Xuan^{1,2,3} Hao Minglei³ Xing Hongyan^{1,2} Zeng Xiangneng³

1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
3. Air Force Research Institute of Aviation Meteorology, Beijing 100085, China)

Abstract:The speckle noise in synthetic aperture radar (SAR) image is difficult to refract the scattering characteristics of the irradiated area accurately, and increases the difficulty of the target feature extraction. The traditional de-speckle method reduces the noise, but it leads to the loss of the details of the image at the same time. However, the denoising method based on the Three- Dimensional Matching Block (BM3D) utilizes the sparse representation in the transform domain, which divides the image into a three-dimensional space. By analyzing the characteristics of the model and setting the parameters, the BM3D algorithm is applied to the SAR image. Compared with the traditional methods, it is found that the BM3D algorithm can be successfully applied to the SAR image, the edge stay index reaches 0.4845, which can suppress the speckle and preserve the details of the image, and the effectiveness of the algorithm is verified.

Keywords:SAR image; speckle; BM3D

0 引 言

合成孔径雷达(SAR)具有微波成像的能力,同时具有对目标进行全天时、全天候和高分辨率的探测的优势,在军事侦察、地质资源勘探、城市规划、地物分类及海洋

风、浪、内波的反演及污染等方面起到了重要的作用。SAR 是通过发射电磁波并接收目标的回波信号进而成像,然而其散射回波随着散射系数上下浮动,在 SAR 图像中形成斑点即相干斑噪声。该种斑点噪声因其独特的性质,通常被定义为乘性噪声,使得 SAR 图像的的目标散射特征的提取较为困难^[1]。因此,去除相干斑是利用

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

* 基金项目:国家自然科学基金(61671248)、江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA460008)、江苏省“六大人才高峰”计划和江苏省“信息与通信工程”优势学科、国家自然科学基金(F011202)、中国博士后科学基金(2016M602964)资助项目

SAR 数据来分析的极其关键预处理步骤之一^[2-3]。

目前,对 SAR 图像的去噪通常分为 2 种,即成像前的多视处理和直接对成像后的图像降噪处理。多视处理通常是通过降低分辨率达到图像去噪的目的,对于分辨率高要求高的 SAR 图像,多视处理虽降低了噪声但图像变得模糊,同样增加了解译的困难。滤波法常采用较为经典的 Lee、Kuan、Frost 滤波等方法,它们是基于乘性噪声同时利用局部统计对图像进行估计进而去噪。然而该类滤波法有时对噪声假设与实际值有偏差,难以较好的保留图像的边缘^[4]。Buades 等人^[5]摆脱了传统的均值滤波,在更大的范围中寻找相似块,并利用非局部特性对相似图像块进行加权平均从而估算出图像的真实值,即非局部均值滤波(NLM),然而 NLM 算法对图像细节及高频部分处理效果不好,纹理特征容易丢失,而且时间复杂度增大。随后,2007 年,Dabov 等人^[6]对 NLM 算法改进,将变换域及非局部均值法相结合,利用块之间的相似性进行匹配分类,从而提出了三维匹配块(BM3D)算法。由于 NLM 仅是对三维块的其中一个维度进行加权平均,而 BM3D 算法是同时进行多维处理^[6-7]。因此去噪效果比 NLM 更好。然而,该类算法都是通过加性噪声模型得来的,而相干斑噪声则是基于乘性噪声。利用 BM3D 算法去除 SAR 图像的相干斑噪声,需要将乘性噪声模型转换成加性噪声,例如石健等人^[8]利用对数变换将 SAR 图像的乘性噪声转化为加性高斯噪声,然后对图像进行加噪后滤波,其忽略了一个事实,即 SAR 图像的噪声是固有的,因此无法利用该种加噪的形式进行处理^[9]。

本文针对 SAR 图像特有的噪声特性,通过分析噪声机理,并将 BM3D 算法从加性噪声引入到乘性噪声,对 BM3D 的参数进行设置适应于 SAR 图像,从而达到抑制相干斑噪声的效果。

1 相干斑噪声模型及 BM3D 算法

1.1 噪声模型

SAR 属于微波成像,SAR 图像是雷达脉冲回波的相干叠加并在方位向和距离向压缩形成的。而 SAR 图像幅度值、目标的散射回波及相干斑具有复杂的非线性关系^[10],在此情况下,可简单假设观测到的 SAR 图像的信号强度等于目标分辨单元内的平均散射强度与相干斑噪声的乘积,即假设相干斑为乘性噪声,图像的信号强度如下所示:

$$Y = XZ \tag{1}$$

式中: Y 是含噪的图像幅度, X 是理论上无噪声的图像幅度, Z 为相干斑噪声。通过对 SAR 灰度值进行对数变换,相干斑噪声转换成近似高斯噪声,继而利用加性去噪模型进行去噪处理。

$$\log Y = \log(XZ) = \log X + \log Z \tag{2}$$

1.2 三维匹配块算法

三维匹配块算法利用图像的非局部相似性,在变换域中增加了图像的稀疏性。相似块是叠放在一个三维结构中,因此块间会存在重叠区域,利用这种相似块的冗余性估计其他图像块并通过加权整合的方式可以达到去噪的目的^[11-12]。

基于 BM3D 算法的 SAR 图像的去噪流程如图 1 所示。

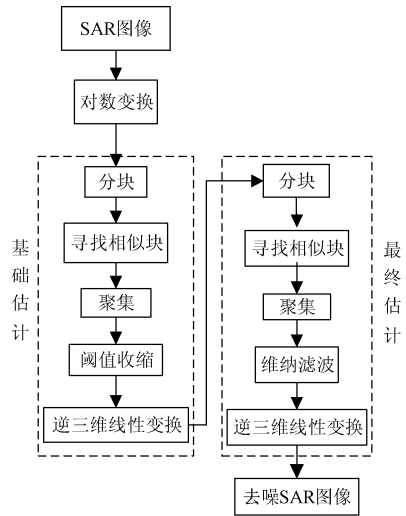


图1 基于 BM3D 算法的 SAR 图像去噪流程

Fig.1 Flow chart of BM3D algorithm based on SAR image denoising

首先利用对数变换将 SAR 图像的乘性噪声转换为近似的加性噪声,继而进行基础估计和最终估计 2 步去噪处理^[13]。

$$X = T_{3d}^{-1}(W(T_{3d}(T_{3d}^{-1}(H(T_{3d}(Y)))))) \tag{3}$$

式中: X 、 Y 分别表示去噪后和去噪前的 SAR 图像, T_{3d} 、 T_{3d}^{-1} 分别表示三维和逆三维线性变换, H 、 W 分别表示硬阈值和维纳滤波。

基础估计:首先对 SAR 图像进行分块处理,将相似块聚集到一个三维空间中,对三维空间中的相似块进行二维硬阈值滤波及一维小波变换^[14],进行阈值收缩进行初步的滤波处理,继而通过三维逆变换得到初步估计的块,而这些块仍处于之前在三维空间中的位置,然后对块间重叠的部分进行加权平均,得到初步估计的 SAR 图像。其中,在寻找相似块的过程中,采用欧氏距离进行匹配,如下所示:

$$d(P, Q) = \frac{\|\gamma(P) - \gamma(Q)\|}{N \times N} \tag{4}$$

式中: P 和 Q 分别表示相似匹配中参考块和比对块, γ 表示块的矩阵值, $N \times N$ 表示搜索的窗口, d 表示图像块之

间的距离。在匹配过程中设置阈值,通过比对块间距与该阈值,当大于该值时,表示该比对的图像块与参考块不一致,当小于该值时,则此图像块与对比块具有相似的特性,可放入三维空间中。

最终估计:与基础估计相似,但处理的 SAR 图像不同,该步骤所分块的图像利用基础估计后产生的 SAR 图像,此外,所采用的协同滤波的方式与基础估计也不同,将硬阈值收缩改为维纳滤波。

2 噪声抑制评价指标

由于 SAR 图像缺乏无噪声的纯净的图像,所以无法采用如信噪比、均方根误差等普通图像的评价指标进行评估。基于 SAR 图像噪声的固有特性,本实验利用均值、方差、等效视数(ENL)以及边缘保持指数(ESI)4 个指标对相干斑抑制后的效果进行评估检验。其中,均值是通过图像灰度值进行平均得到的,即 SAR 图像中目标的后向散射系数的平均值,利用均值有助于对比图像去噪前后的差异。方差表示图像信息量的多少。通过 ENL 来表示 SAR 图像中噪声相对强度以及滤波后噪声抑制效果,ENL 越大,表明 SAR 的噪声越弱,即噪声滤除的越干净^[15]。边缘保持指数是在水平及垂直方向的像素间的差值对比来衡量边缘的保持能力,边缘保持的好坏与 ESI 成正比,ESI 的值越高,说明边缘特征保留的越好,其取值范围介于 0~1,当 $ESI=1$ 时,说明完全保留了图像的边缘信息,当 $ESI=0$ 时,则表示图像已经变为一个平面,没有任何变化。

其公式分别为:

$$I_z = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Z_{ij} \quad (5)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Z_{ij} - I_z)^2 \quad (6)$$

$$ENL = \frac{I_z^2}{\sigma_z^2} \quad (7)$$

$ESI =$

$$\frac{\sum_{i=1}^{M \times N} (|Z_s(i,j) - Z_s(i+1,j)| + |Z_s(i,j) - Z_s(i,j+1)|)}{\sum_{i=1}^{M \times N} (|Z_o(i,j) - Z_o(i+1,j)| + |Z_o(i,j) - Z_o(i,j+1)|)} \quad (8)$$

式中: I_z 、 σ_z 、 ENL 、 ESI 分别表示图像的均值、方差、等效视数及边缘保持指数。 M 、 N 分别表示图像的边的像素个数, i 和 j 表示图像像元的位置, $Z_s(i,j)$ 和 $Z_o(i,j)$ 分别表示 SAR 噪声抑制后及原始图像像元。通过对几个指标综合评价,从而分析各滤波法对 SAR 图像相干斑噪声滤除的程度。

3 实验及结果分析

3.1 实验分析及参数选择

三维匹配块算法在基础估计和最终估计的过程中涉及到块区域、滑动步长、最大相似块个数、搜索范围的尺寸等参数值,在参数设定时,需考虑到一些条件需求,如:相似块的二维变换时是通过矩阵相乘实现,因而搜索窗口的值需为 2 的 n 次幂,此外,在寻找匹配块的时候,需要注意所设定的最大相似块的个数,相似块的个数直接影响了算法处理时的时间复杂度,因此在设定最大相似块时序结合具体的图像进行选择^[16]。

在以上条件下,本实验采用表 1 中三维匹配块算法的参数对 SAR 图像去噪。

表 1 BM3D 算法的相关参数

Table 1 The relative parameters of BM3D algorithm

参数	硬阈值	维纳滤波
块区域	8	8
滑动步长	3	3
最大相似块个数	16	32
搜索范围尺寸(必须为奇数)	39	39
块间距离阈值	3 000	400
三维硬阈值收缩阈值	2.7	-

3.2 模型验证及结果分析

选取星载 TerraSAR-X 波段的旧金山 SAR 场景图,使用其中 512×512 大小的 SAR 图像作为实验依据,旧金山区域同时包含陆地及海洋要素,有利于对斑点噪声抑制的后的 SAR 图直观分析。首先利用本文算法对 SAR 场景图进行去噪处理,继而将去噪后的结果与 Lee、Kuan 等统计类及小波变换的频域法的结果对比。对比实验中的统计类滤波均采用 3×3 大小窗口,小波去噪采用软阈值法通过 2 级小波分解、重构。其滤波后的 SAR 图像如图 2 所示。

从图 2(a) 可看到 SAR 原图中包含许多斑点噪声,影响了 SAR 图像的解译。图 2(b)~(d) 采用了经典的 Lee、Kuan 等统计类滤波,虽然统计类滤波较好的保存了 SAR 图像的边缘及纹理,但是由于其对自身噪声预估有偏差,尤其针对不同区域,无法做到自适应滤波,导致其去噪的效果并不理想,图中仍分布着许多斑噪声。图 2(e) 为采用了小波滤波法降噪后的 SAR 图像,处理后的图像明显过于平滑,纹理细节保持不好。基于 SAR 图像的噪声特性,首先通过对数变换将乘性噪声模型转变为加性噪声模型,利用 BM3D 算法对 SAR 图像处理,从图像 2(f) 可明显发现图像的斑点噪声得到的有效的滤除,且纹理信息也清晰可见。利用 BM3D 算法对 SAR 图像进行去噪,不仅滤除了相干斑噪声,也很好的保存了 SAR 的边缘特征。

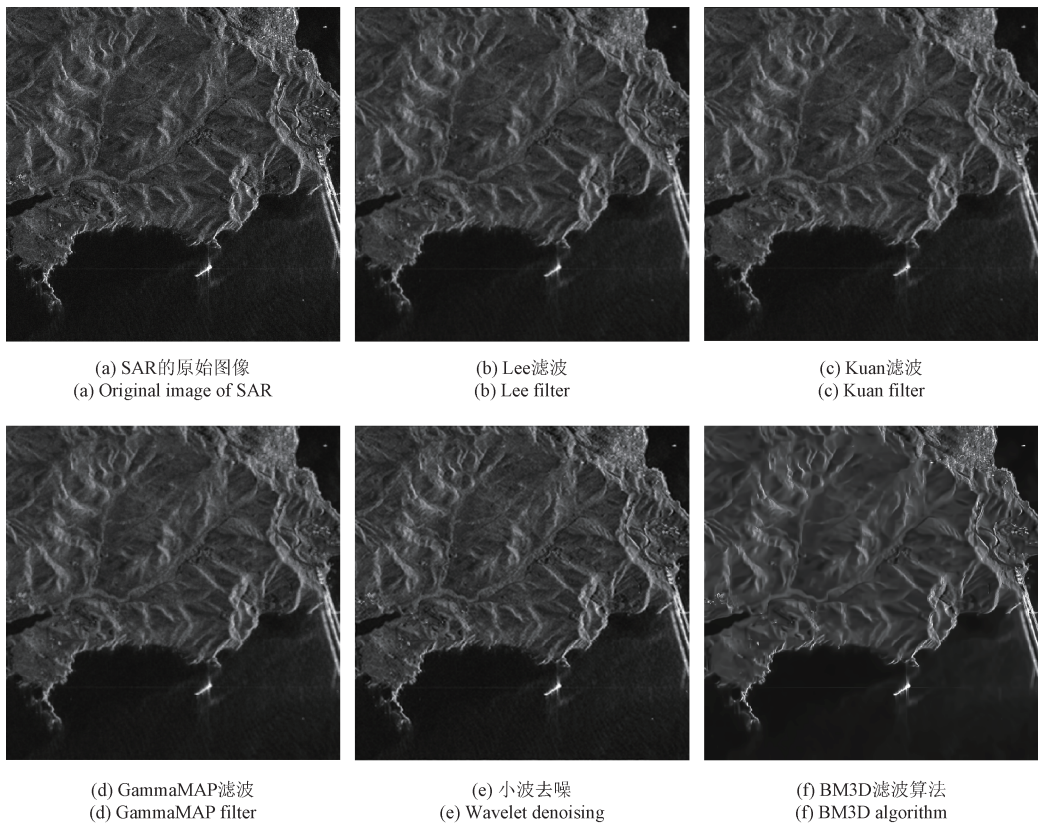


图 2 SAR 图像的原始图像及各算法去噪后图像

Fig. 2 The original image of SAR image and the image after denoising with algorithm

表 2 BM3D 算法与经典算法的旧金山区的去噪效果

Table 2 The Denoising effect of BM3D algorithm and classical algorithm from San Francisco

滤波方法	均值	方差	ENL	ESI
原始 SAR 图像	51.986 9	136.579 9	2.627 2	1
Lee 滤波	51.880 4	176.777 2	3.433 3	0.332 8
Kuan 滤波	51.878 5	176.822 7	3.408 4	0.338 3
GammaMAP	52.047 1	199.134 6	3.467 3	0.358 3
小波去噪	52.174 8	164.439 3	3.151 7	0.382 5
BM3D	51.926 6	171.491 2	3.307 2	0.484 5

从表 2 中得到,在 4 个评价指标中,BM3D 算法除了 ENL 略低于统计类滤波,另外 3 个指标整体上均高于其他滤波法,BM3D 算法的均值也最接近原始 SAR 图像,在相干斑抑制及边缘保持上,基于 BM3D 算法的结果最好,其值达到 0.484 5。

4 结 论

三维匹配块滤波算法结合了非局部均值滤波及变换域滤波法的优点,对含加性噪声的图像有着明显的去噪效果。本文通过分析对 SAR 图像的相干斑噪声模型,对三维匹配块算法进行改进,使其能适用于乘性噪声,从而

应用到 SAR 图像中,同时与经典的 SAR 图像滤波算法进行对比,采用均值、方差、等效视数及边缘保持指数 4 个指标进行效果评价,发现三维匹配块算法在经过改进后可应用于乘性噪声,不仅有效的去除了相干斑噪声,仍保存的 SAR 图像的边缘特征。然而三维匹配块由于块匹配导致运行时间长,今后将进一步研究如何通过改进算法使在匹配过程中减小运算的时间及如何将小波及其他与 BM3D 相结合算法用于 SAR 图像的噪声抑制。

参考文献

- [1] 齐文元. 小波在 SAR 图像去噪及分辨率融合中的应用[D]. 成都:电子科技大学, 2009.
 QI W Y. The application of wavelet in SAR image

- denoising and the resolution fusion [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009.
- [2] MARTINO G D, SIMONE A D, IODICE A, et al. Non-local means SAR despeckling based on scattering [C]. Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2015: 3172-3174.
- [3] 李斌, 孙骁, 张水平, 等. 基于低秩矩阵恢复的 SAR 图像相干斑抑制方法 [J]. 现代雷达, 2014, 36(5): 49-52.
LI B, SUN X, ZHANG SH P, et al. SAR speckle denoising based on low-rank matrix recovery [J]. Modern Radar, 2014, 36(5): 49-52.
- [4] 刘泉. 星载合成孔径雷达图像滤波及理解 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
LIU Q. Spaceborne SAR image filtering and understanding [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [5] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising [C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005: 60-65.
- [6] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image restoration by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [J]. Browse Journals & Magazines, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [7] 王洪儒. 基于 BM3D 算法的信号相关噪声去除方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
WANG H R. The removal method of signal correlation noise based on BM3D algorithm research [D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.
- [8] 石健, 汪洋, 黄海风, 等. BM3D 算法在海洋 SAR 图像去噪中的应用 [J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(1): 24-32.
SHI J, WANG Y, HUANG H F, et al. Application of BM3D algorithm in ocean SAR image denoising [J]. Radar Science and Technology, 2016, 14(1): 24-32.
- [9] 李贺, 秦志远, 周丽雅. SAR 图像斑点噪声整体变分偏微分方程滤波算法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(6): 910-914.
LI H, QIN ZH Y, ZHOU L Y. Study on SAR image speckle noise smoothing algorithm with TV-PDE [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(6): 910-914.
- [10] 朱家兵, 陶亮, 洪一. 基于小波域中 SOT 结构的 SAR 相干斑抑制 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2006, 29(11): 1400-1403.
ZHU J B, TAO L, HONG Y. Speckle reduction in SAR images based on the SOT structure in the wavelet domain [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 29(11): 1400-1403.
- [11] 侯迎坤, 刘明霞, 杨德运. 多级块匹配变换域滤波图像去噪 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(2): 225-232.
HOU Y K, LIU M X, YANG D Y. Multistage block-matching transforms form domain filtering for image denoising [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(2): 225-231.
- [12] 周洋. 基于小波变换的非局部图像去噪方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
Zhou Yang. Nonlocal image denoising methods based on wavelet transform [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [13] 黄牧, 黄文清, 李俊柏, 等. 基于 BM3D 图像去噪算法的参数研究 [J]. 工业控制计算机, 2014(10): 99-101.
HUANG M, HUANG W Q, LI J B, et al. Parameter study based on BM3D image denoising algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2014(10): 99-101.
- [14] 贾宇申, 蔡振江, 程曼. 针对纵向纹理的图像自适应滤波算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 30(3): 443-447.
JIA Y SH, CAI ZH J, CHENG M. Adaptive filtering algorithm aiming at vertical texture images [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 30(3): 443-447.
- [15] 范江涛, 袁翔宇, 汤博, 等. 基于统计理论的 SAR 图像斑点噪声滤波算法分析 [J]. 电子科技, 2013, 26(1): 24-26.
FAN J T, YUAN X Y, TANG B, et al. Analysis of the filtering algorithm of SAR image speckle noise based on statistic theory [J]. Electronic Science & Technology, 2013, 26(1): 24-26.
- [16] 刘向乐, 冯象初. 小波域三维块匹配图像去噪 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(16): 185-187.
LIU X L, FENG X CH. Image denoising by mixing wavelet transformation with sparse 3D collaborative filtering [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(16): 185-187.

作者简介



张璇, 2015 年获得南京信息工程大学滨江学院学士学位, 现为南京信息工程大学在读硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像相干斑抑制及海洋 SAR 图像风场反演。
E-mail: 603693283@qq.com

Zhang Xuan received B. Sc. from Nanjing University of Information Science and Technology in 2015. She is now a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. Her main research direction is SAR image speckle denoising and ocean SAR wind retrieval.



郝明磊,分别在2000年、2006年于解放军理工大学获学士学位和硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为气象雷达系统设计、大气遥感技术应用、气象观测及其信息处理。

E-mail:hml320@163.com

Hao Minglei received B. Sc. and M. Sc. both from PLA University of Science and Technology in 2000 and 2006, respectively. Now he is a senior engineer. His main research direction is weather radar system design, applications of atmospheric remote sensing technology, meteorological observation and information processing.



行鸿彦,1962年生,1983年于太原工学院获学士学位,1990年于长春地质学院获硕士学位,2003年于西安交通大学获博士学位。现为南京信息工程大学教授,电子与信息学院副院长,博士生导师,研究方向为微弱信号检测与处理、混沌与海杂波信号处理、气象仪器仪表、气象信息处理等。

E-mail:xinghy@nuist.edu.cn

Xing Hongyan was born in 1962, received B. Sc. from Taiyuan Institute of technology in 1983, M. Sc. from Changchun Institute of Geology in 1990, and Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2003, respectively. Now, he is professor and Ph. D. tutor in Nanjing University of Information Science and Technology and vice president in School of Electronics and Information. His main research direction is weak signal detection and processing, chaotic sea clutter signal processing, meteorological instruments, and meteorological information processing etc.



曾祥能,分别在2006年、2009年和2012年于空军工程大学获学士学位、硕士学位和博士学位,现主要方向为雷达信号波形编码设计、信号处理、波数控制及其最优化设计。

E-mail;zengxiangneng103@163.com

Zeng Xiangneng received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. all from Air Force Engineering University in 2006, 2009, and 2012, respectively. His main research direction is coding design of radar signal waveform, signal processing, and wave number control and its optimization design.