

## 基于小波变换空间变迹的 SAR 图像旁瓣抑制方法

宦若虹 陶一凡 陈月 杨鹏 鲍晟霖

(浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州, 310023)

**摘要:** 为了进一步提高旁瓣抑制的效果, 本文提出一种基于小波变换空间变迹的合成孔径雷达图像旁瓣抑制方法。该方法对成像后的复数图像分别进行实部和虚部的二维小波分解, 对分解后得到的各子通道进行空间变迹旁瓣抑制, 将旁瓣抑制后的各子通道数据通过小波重构得到实部数据和虚部数据, 再对重构后的实部数据和虚部数据分别进行空间变迹旁瓣抑制, 最终生成基于小波变换空间变迹旁瓣抑制后的复数图像。实验结果表明, 该方法能够在基本不损失图像分辨率的基础上, 有效抑制图像的旁瓣电平。

**关键词:** 合成孔径雷达; 旁瓣抑制; 小波变换; 空间变迹

**中图分类号:** TP751.1      **文献标志码:** A

### SAR Image Sidelobe Suppression Method Based on Wavelet Transform and Spatial Variant Apodization

Huan Ruohong, Tao Yifan, Chen Yue, Yang Peng, Bao Shenglin

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023, China)

**Abstract:** In order to further improve the effect of sidelobe suppression, a synthetic aperture radar image sidelobe suppression method based on wavelet transform and spatial variant apodization is proposed in this paper. 2D wavelet decomposition is carried out for the real and imaginary parts of the complex image after imaging respectively, and the sub-channels obtained after the decomposition are then implemented by the spatial variant apodization sidelobe suppression algorithm. The real part data and imaginary part data are reconstructed by using the sub-channel data after the sidelobe suppression. Then, the reconstructed real part data and the imaginary part data are subjected again to spatial variant apodization sidelobe suppression respectively. Finally, the complex image after wavelet transform spatial variant apodization sidelobe suppression is obtained. Experimental results show that the proposed method can effectively suppress the sidelobe of the image without losing the image resolution. Therefore, this proposed method is an effective sidelobe suppression method for synthetic aperture radar images.

**Key words:** synthetic aperture radar; sidelobe suppression; wavelet transform; spatial variant apodization

## 引 言

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)图像处理和解释包括了图像预处理、感兴趣区域目标检测、特征提取和目标分类识别等过程。图像解释和分析的正确性与图像本身的质量密切相关。图像的预处理是提高图像质量的关键步骤,它对后续的目标检测、特征提取和分类识别有着重要的影响。在多目标的 SAR 图像中,强散射点目标的高电平旁瓣会掩盖相邻的弱散射点目标的低电平主瓣,从而导致弱目标丢失,直接影响 SAR 图像解译过程中后续的目标检测过程,因此旁瓣抑制是 SAR 图像预处理过程中非常重要的一步。SAR 图像通常使用傅里叶变换方法进行成像处理,这类方法简单,但是傅里叶变换成像处理后的图像往往具有较高的旁瓣电平和较宽的主瓣宽度。通过加权处理可降低旁瓣电平,但会使得主瓣分辨率降低<sup>[1]</sup>。为此,研究者们对 SAR 图像的旁瓣抑制方法展开了深入的研究。现有的 SAR 图像旁瓣抑制方法主要有 4 类:频域加窗法<sup>[2]</sup>、自适应法<sup>[3]</sup>、双重变迹(Dual apodization, DA)法<sup>[4]</sup>和空间变迹(Spatial variant apodization, SVA)法<sup>[5-8]</sup>。空间变迹旁瓣抑制方法是一种基于余弦类频域加权的非线性加权方法。该方法采用了若干加权函数对奈奎斯特采样的图像进行加权处理,逐点选取最小值作为输出,可以在不损失图像分辨率的同时有效地抑制旁瓣电平<sup>[9]</sup>。该方法是在 DA 旁瓣抑制方法和复数双重变迹(Complex dual apodization, CDA)旁瓣抑制方法的基础上提出的。普通的 SVA 方法需要图像方位向和距离向的采样率都为整数倍的奈奎斯特采样率,文献[10-11]将整数倍奈奎斯特采样率下的 SVA 方法扩展到了非整数倍奈奎斯特采样率的情况。文献[12]提出一种改进 SVA 的 SAR 图像旁瓣抑制方法,该方法将 3 点滤波扩展到 5 点滤波,根据采样率的不同来调整滤波器参数,得到满足约束条件的最优解,改进后的 SVA 方法能够与 SAR 成像方法相结合,在距离向压缩和方位向压缩中分别利用改进的 SVA 方法来抑制旁瓣。文献[13]提出一种雷达图像幅值空间变迹方法,该方法通过比较 SAR 图像采样点幅度值与相邻两个奈奎斯特采样点幅值之和来确定该点属于主瓣还是旁瓣,然后分别加以不同的处理,该方法在整数倍奈奎斯特采样率的情况下,不仅压低旁瓣还使主瓣变窄,能得到比传统 SVA 更高的图像分辨率,同时,在非整数倍奈奎斯特采样率的情况下也比传统 SVA 方法具有更好的稳健性。文献[14]针对现有的改进 SVA 方法存在运算量大、SAR 图像旁瓣抑制效果差和主瓣能量损失等问题提出一种新的改进 SVA 方法,通过构建一个新的脉冲响应函数并得到其所对应的频域窗函数,比较最大和最小加权处理后的 SAR 图像数据来实现旁瓣抑制。为了进一步提高旁瓣抑制的效果,本文提出了一种基于小波变换空间变迹的 SAR 图像旁瓣抑制方法。

## 1 方法概述

基于小波变换空间变迹的 SAR 图像旁瓣抑制方法流程如图 1 所示,主要包括 3 个步骤:(1)复数图像实部和虚部的小波分解;(2)二维小波子通道空间变迹旁瓣抑制;(3)实部和虚部分别空间变迹旁瓣抑制后合成复数图像。

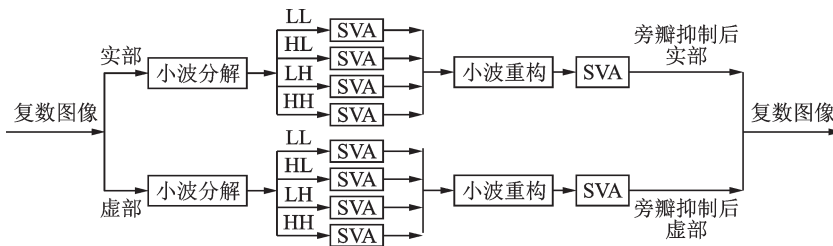


图 1 基于小波变换空间变迹的 SAR 图像旁瓣抑制方法流程图

Fig.1 Flow chart of SAR image sidelobe suppression method based on wavelet transform and spatial variant apodization

### 1.1 复数图像实部和虚部的小波分解

将成像后的复数图像分成实部数据和虚部数据两部分,通过二维小波分解将实部和虚部各自分解成4个子通道,分别为低频子通道LL、水平高频子通道HL、垂直高频子通道LH和对角高频子通道HH。二维小波分解采用了 Daubechies (dbN) 小波基函数,分解示意如图2所示。复数图像实部和虚部的小波分解效果如图3所示。

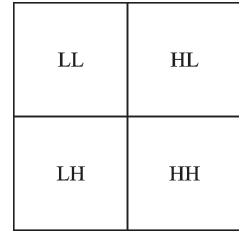


图2 小波分解示意图  
Fig.2 Wavelet decomposition

SAR原始回波数据一般采用传统的成像算法(如距离多普勒成像算法<sup>[15]</sup>)进行成像,之后得到二维的复数图像,对成像后的复数图像分别进行实部和虚部的小波分解,如果复数图像本身是2的整数倍采样,则直接进行实部和虚部的小波分解,如果复数图像不是2的整数倍采样,要对复数图像进行升采样到2的整数倍采样,然后进行实部和虚部的小波分解。

### 1.2 二维小波子通道空间变迹旁瓣抑制

对各个二维小波子通道进行空间变迹旁瓣抑制,这里采用三点滤波空间变迹。余弦权函数为

$$I(n) = 1 + 2w(n)\cos\left(2\pi\frac{n}{N}\right) \quad (1)$$

式中:  $0 \leq w(n) \leq 0.5, 0 \leq n \leq N, N$  是奈奎斯特采样率。

对式(1)进行傅里叶变换,得到冲击响应矩阵有

$$i(n) = w(n)\delta_{n,-1} + \delta_{n,0} + \delta_{n,1} \quad (2)$$

式中  $\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ 。式(2)可作为图像域的三点卷积核函数。

对输入图像的实部和虚部分别与式(2)进行卷积。式(2)和图像像素点  $g(n)$  卷积后输出的值为

$$G(n) = w(n)g(n-1) + g(n) + w(n)g(n+1) \quad (3)$$

当信号是以整数倍奈奎斯特采样率采样时,则式(3)改为

$$G_R(n) = w(n)g(n-R) + g(n) + w(n)g(n+R) \quad (4)$$

式中:  $R$  为采样倍数;  $g(n)$  为图像采样点的原始幅度值;  $G_R(n)$  为空间变迹后图像采样点的幅度值;  $g(n-R)$  为当前采样点之前的第  $R$  个图像采样点的原始幅度值;  $g(n+R)$  为当前采样点之后的第  $R$  个图像采样点的原始幅度值;  $w(n)$  是权函数。

在权函数约束条件  $0 \leq w(n) \leq 0.5$  下最小化  $|G_R(n)|^2$ , 并自适应求解最优权函数  $w(n)$ , 得到最优解为

$$w(n) = -\frac{g(n)}{g(n-R) + g(n+R)} \quad (5)$$

因为设定复数图像方位向和距离向是2的整数倍采样,所以计算二维小波子通道空间变迹采样点权函数  $w(n)$  时,采样倍数  $R$  等于原始采样倍数的一半。对  $w(n)$  加以约束,输出数据为

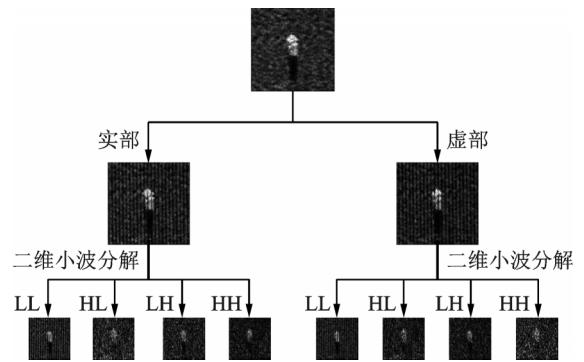


图3 复数图像实部和虚部的小波分解效果图  
Fig.3 Results of wavelet decomposition for real and imaginary parts of complex images

$$G_R(n) = \begin{cases} g(n) & \omega(n) < 0 \\ 0 & 0 \leq \omega(n) \leq 0.5 \\ g(n) + 0.5[g(n-R) + g(n+R)] & \omega > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

各子通道空间变迹旁瓣抑制效果如图4所示。

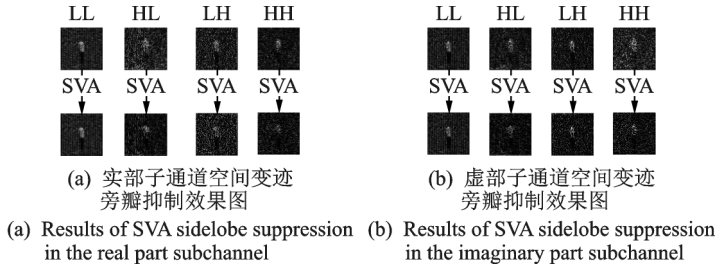


图4 小波分解后子通道空间变迹旁瓣抑制效果图

Fig.4 Results of subchannel SVA sidelobe suppression after wavelet decomposition

### 1.3 实部和虚部分别空间变迹旁瓣抑制后合成复数图像

将旁瓣抑制后的各子通道数据通过小波重构重新得到实部数据和虚部数据,再对实部数据和虚部数据分别进行空间变迹旁瓣抑制,这时的空间变迹采样倍数为原始复数图像的采样倍数,将实部和虚部组合成基于小波变换空间变迹旁瓣抑制后的复数图像。实部和虚部分别空间变迹旁瓣抑制后合成复数图像的效果如图5所示。

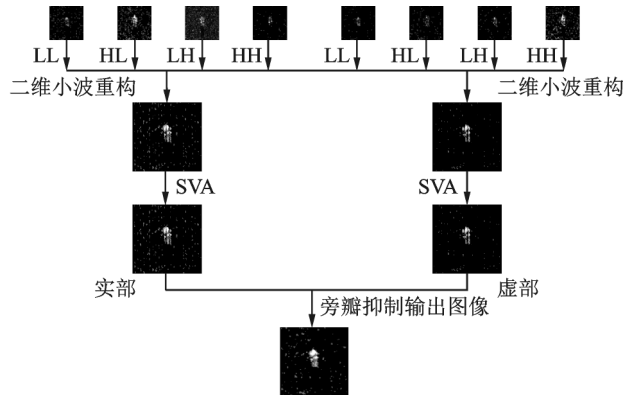


图5 实部和虚部空间变迹旁瓣抑制后合成复数图像效果图

Fig.5 Results of complex image synthesized by real and imaginary parts after SVA sidelobe suppression

## 2 实验结果比较和分析

### 2.1 点目标仿真实验

为验证本文方法的旁瓣抑制效果,首先采用二维点目标仿真数据进行实验。在实验中,设定的仿真参数为:发射线性调频信号载频9.6 GHz,脉冲宽度2 μs,信号带宽150 MHz,采样频率300 MHz,脉冲重复频率400 Hz,天线方位口径2 m,载机速度200 m/s,中心斜距参考距离20 km。表1给出了SVA和基于小波变换SVA两种旁瓣抑制方法对成像后数据进行处理后得到结果的定量分析和比较。由表1可见,点目标经过SVA旁瓣抑制处理和经过基于小波变换SVA旁瓣抑制处理在保持距离分辨率和方位分辨率基本不变的同时,在距离向和方位向的峰值旁瓣比和积分旁瓣比上都表现出了更优的性能。其中,用

表1 点目标仿真性能比较

Tab.1 Performance comparison of point target simulation

性能指标	距离多普勒	SVA	小波 SVA
距离分辨率/m	0.847 66	0.830 08	0.841 80
距离PSLR/dB	-15.539 2	-31.136 1	-38.918 6
距离ISLR/dB	-12.489 5	-34.007 1	-40.117 5
方位分辨率/m	0.912 11	0.923 83	1.005 90
方位PSLR/dB	-12.771 4	-24.269 5	-34.1310
方位ISLR/dB	-11.457 9	-25.505 5	-33.975 1

SVA旁瓣抑制方法处理后,能够将旁瓣抑制到 $-24$  dB以下;用基于小波变换SVA的SAR图像旁瓣抑制方法处理后的峰值旁瓣比和积分旁瓣比性能较传统SVA方法有较大的提高,能将旁瓣抑制到 $-33$  dB以下。

图6和图7分别为点目标成像后的方位向和距离向幅度值切面图。从图6和图7可以看出,SVA和基于小波变换SVA方法在方位向和距离向上均能够有效抑制旁瓣的电平,而基于小波变换SVA对旁瓣电平的抑制效果更佳。

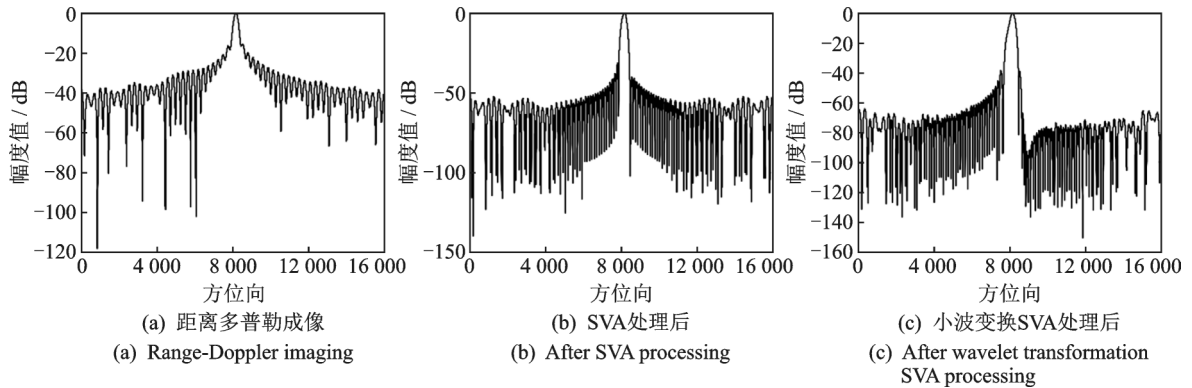


图6 旁瓣抑制处理后方位向切面图

Fig.6 Azimuth profile map after sidelobe suppression processing

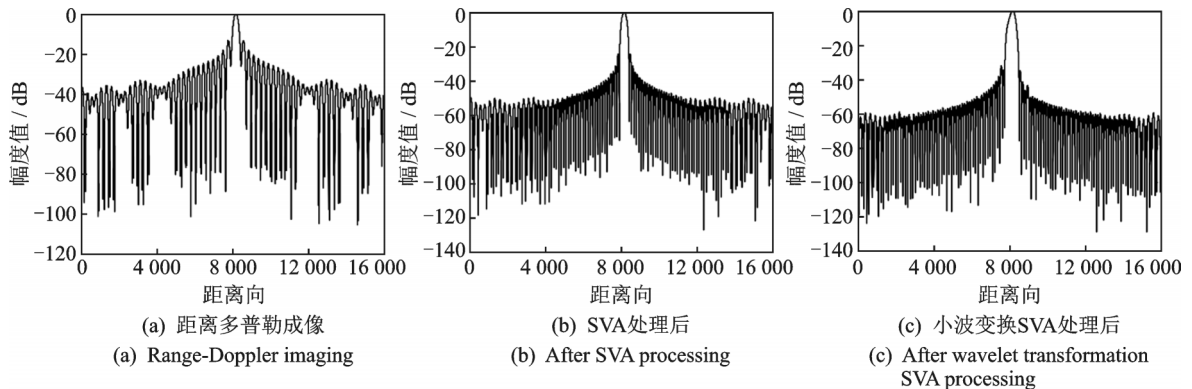


图7 旁瓣抑制处理后距离向切面图

Fig.7 Range profile map after sidelobe suppression processing

表2为图6和图7中的主瓣宽度比较,其中,设成像后方位向和距离向的主瓣宽度分别为1。由表2可见,在方位向和距离向,SVA方法和小波变换SVA方法得到的主瓣均有所展宽。在方位向,SVA方法和小波变换SVA方法得到的主瓣宽度分别是成像后主瓣宽度的1.01倍和1.10倍;在距离向,SVA方法和小波变换SVA方法得到的主瓣宽度分别是成像后主瓣宽度的1.01倍和1.11倍。两种方法主瓣展宽的幅度均较小,小波变换SVA方法由于在做2次SVA的基础上还要经过1次小波分解和1次小波重构,主瓣展宽幅度略大于SVA方法。

图8为点目标成像以及两种方法旁瓣抑制后

表2 主瓣宽度比较

Tab. 2 Comparison of main lobe width

类别	成像后	SVA/成像后	小波SVA/成像后
方位向	1	1.01	1.10
距离向	1	1.01	1.11

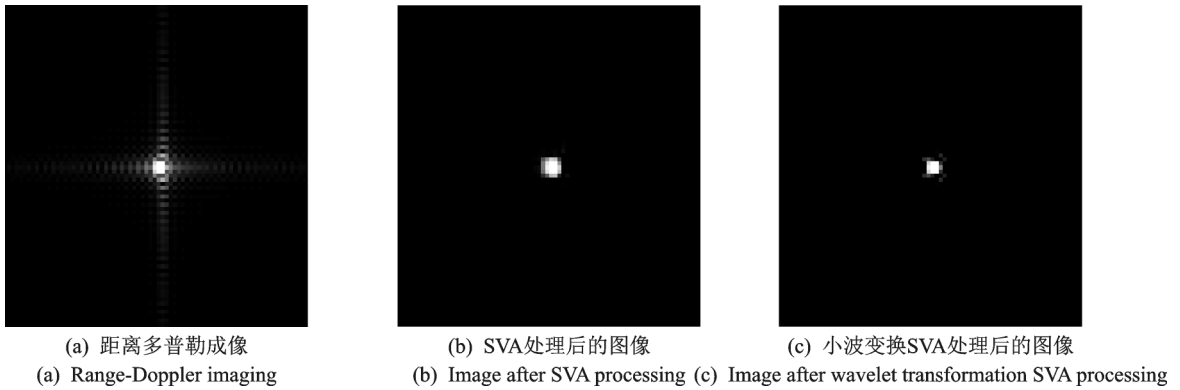


图8 旁瓣抑制处理后的图像比较

Fig.8 Comparison of images after sidelobe suppression processing

的图像。从图8(b)中可以看出SVA对图像的旁瓣抑制效果较明显,但目标点周围还是有泄漏的旁瓣;从图8(c)中可以看出基于小波变换SVA的SAR图像旁瓣抑制方法相对传统SVA,在保持图像分辨率基本不变的同时,有着更好的旁瓣抑制效果。

### 2.2 MSTAR目标切片图像实验

本实验选用了MSTAR公开数据库中的T72和BTR\_60两种目标的目标切片图像各1幅,分别采用SVA旁瓣抑制方法和基于小波变换SVA的SAR图像旁瓣抑制方法对原始复数图像进行处理,并比较两种方法的性能,比较结果如图9和图10所示。可见,在原始图像图9(a)和图10(a)中,目标、阴影轮廓和背景杂波混杂在一起,整体比较模糊;图9(b,c)相对图9(a),图10(b,c)相对图10(a),目标和阴影轮廓能够较为清晰地和背景杂波进行区分;图9(c)和图10(c)为基于小波变换SVA旁瓣抑制后的图像,目标和阴影的轮廓较图9(b)、图10(b)所示的SVA处理得到的图像更为清晰。实验中,采用 $Q^{ABF}$ 指标对两种方法在图9和图10中旁瓣抑制的效果进行量化分析和比较,比较结果如表3所示。 $Q^{ABF}$ 是边缘信息评价因子, $Q^{ABF}$ 越大,图像边缘信息保留越好。由表3可见,本文方法较SVA方法可保留更多边缘信息,使得目标和阴影的轮廓更为清晰。

### 2.3 运算量比较实验

SVA算法是对图像中的每个点进行输出值的计算,运算量为 $m \times n$ 个图像像素点的SVA运算。基于小波变换SVA的SAR图像旁瓣抑制方法的运算量包括:实部和虚部各1次的1层小波分解、实部

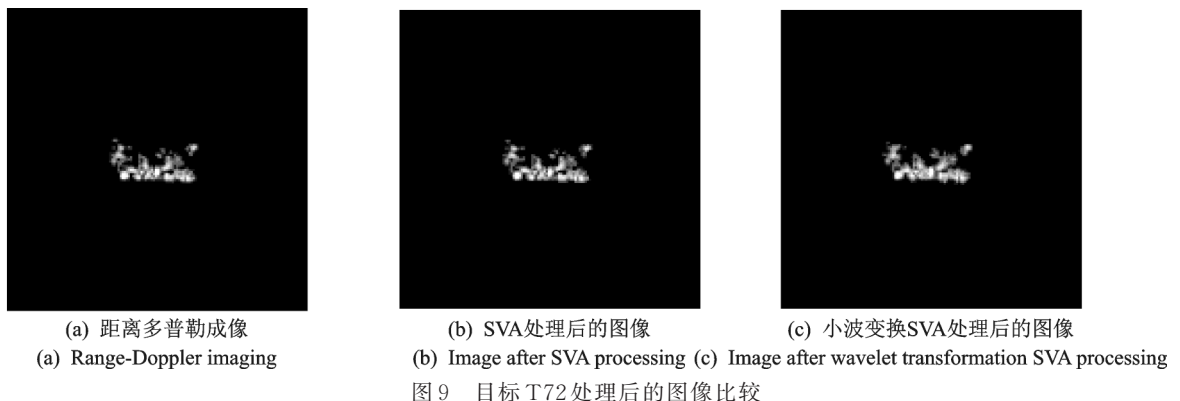


图9 目标T72处理后的图像比较

Fig.9 Comparison of T72 target images after processing

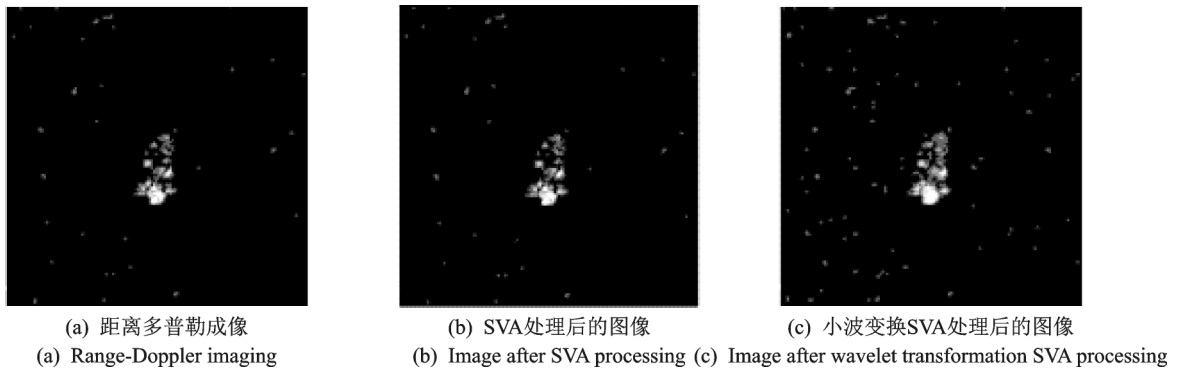


图10 目标BTR\_60处理后的图像比较

Fig.10 Comparison of BTR\_60 target images after processing

和虚部各1次的小波重构,以及分解后实部和虚部各子通道各1次的SVA运算和重构后实部和虚部各1次的SVA运算。因而,本文方法中的SVA的运算量相当于两次完整图像的SVA运算(即 $2 \times m \times n$ 个图像像素点的运算)。点目标、T72目标图像和BTR\_60目标图像的运算时间比较如表4所示。其中,点目标仿真图像的像素数为 $1\,252 \times 1\,200$ ,T72目标图像和BTR\_60目标图像的像素数都为 $128 \times 128$ 。由表4可见,本文方法的运算量为传统SVA方法的两倍以上。随着图像像素点的增多,本文方法的运算量主要体现在两次SVA运算上,运算时间也趋近于传统SVA方法的两倍。

### 3 结束语

本文对SAR图像小波分解并在小波子通道上进行SVA旁瓣抑制,小波重构后再进行一次SVA旁瓣抑制。实验结果证明,和传统SVA法相比,本文提出的方法在基本不损失图像分辨率的同时能够进一步有效抑制SAR图像的旁瓣,保留图像更多的边缘信息。如何进一步抑制旁瓣并在抑制旁瓣的同时提高分辨率,使图像边缘信息更多保留是下一步着重解决的问题。

#### 参考文献:

- [1] 张平,杨汝良.一种基于自适应加权的合成孔径雷达超分辨率成像算法[J].遥测遥控,2009,30(4):45-49.  
Zhang Ping, Yang Ruliang. SAR superresolution imaging algorithm based on adaptive weighting technique[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(4): 45-49.
- [2] Cook C E, Bernfeld M. Radar signals: An introduction to theory and applications[M]. Boston: Artech House, 1993: 185-191.
- [3] Wang J, Wang P. Sidelobe suppression algorithm for SAR imaging based on iterative adaptive approach[C]//Synthetic Aperture Radar. [S.l.]: IEEE, 2015: 443-446.
- [4] Xu X, Narayanan R M. Range sidelobe suppression technique for coherent ultra wide-band random noise radar imaging[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2001, 49(12): 1836-1842.

表3  $Q^{ABF}$ 指标比较Tab. 3 Comparison of  $Q^{ABF}$ 

目标	SVA	小波 SVA
T72	0.302 7	0.656 2
BTR_60	0.163 1	0.647 5

表4 运算时间比较

Tab. 4 Comparison of computation time

目标	SVA	小波 SVA
点目标(1 252*1 200)	9.07	18.18
T72/BTR_60(128*128)	0.13	0.36

- [5] Stankwitz H C, Kosek M R. Sparse aperture fill for SAR using super-SVA[C]// Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 1996: 70-75.
- [6] Zhai W, Zhang Y. Apply spatially variant apodization to SAR/INSAR image processing[C]// Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. [S.l.]: IEEE, 2007: 54-57.
- [7] Castillo-Rubio C F, Llorente-Romano S, Burgos-García M. Spatially variant apodization for squinted synthetic aperture radar images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 2023-2027.
- [8] Smith B H. Generalization of spatially variant apodization to noninteger Nyquist sampling rates[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1088-1093.
- [9] 张平, 杨汝良. 合成孔径雷达空间变迹带宽外推超分辨率算法[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 71-75.  
Zhang Ping, Yang Ruliang. A new SAR superresolution algorithm based on apodization extrapolation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 71-75.
- [10] Castillo-Rubio C, Llorente-Romano S, Burgos-García M. Robust SVA method for every sampling rate condition[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2007, 43(2): 571-580.
- [11] Smith B H. Generalization of spatially variant apodization to noninteger Nyquist sampling rates[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1088-1093.
- [12] Ni C, Wang Y F, Xu X H, et al. A SAR sidelobe suppression algorithm based on modified spatially variant apodization[J]. Scientia Sinica Technologica, 2010, 53(9): 2542-2551.
- [13] 王琦. 雷达图像幅值空间变迹算法[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(1): 48-51.  
Wang Qi. Module spatially variant apodization algorithm for radar images[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2009, 25(1): 48-51.
- [14] 杨科, 廖桂生, 徐青, 等. 改进的合成孔径雷达旁瓣抑制空间变迹算法[J]. 电波科学学报, 2012, 27(6): 96-103.  
Yang Ke, Liao Guisheng, Xu Qing, et al. Improved SVA method for SAR sidelobe suppression[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(6): 96-103.
- [15] Wu C, Liu K Y, Jin M. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1982, 18(5): 563-575.

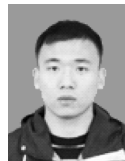
## 作者简介:



宦若虹(1979-),女,博士,副教授,研究方向:视频、图像处理与模式识别,E-mail:huanrh@zjut.edu.cn。



陶一凡(1993-),男,硕士研究生,研究方向:图像处理与模式识别,E-mail:a173981963@163.com。



陈月(1991-),男,硕士研究生,研究方向:机器学习与模式识别,E-mail:837969469@qq.com。



杨鹏(1990-),男,硕士研究生,研究方向:图像处理与模式识别,E-mail:1298461580@qq.com。



鲍晟霖(1994-),男,硕士研究生,研究方向:数字图像处理与模式识别,E-mail:2111612096@zjut.edu.cn。

(编辑:刘彦东)