



DOI: 10.13382/j.jemi.B2003021

结合属性散射中心模型和空间变迹法的 SAR 图像旁瓣抑制方法*

陈 潜¹ 刘金清²

(1. 福州外语外贸学院 福州 350202; 2. 福建师范大学 福州 350108)

摘 要:针对合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像旁瓣抑制问题,提出结合属性散射中心模型和空间变迹法(spatially variant apodization, SVA)的新途径。空间变迹法作为一种经典超分辨率图像处理技术,能在抑制旁瓣的同时保持良好的主瓣分辨率。属性散射中心可以很好地描述目标在高频区的电磁散射特性,是分析 SAR 图像的有力工具。基于属性散射模型的参数估计得到的先验知识再利用空间变迹法处理 SAR 图像,达到抑制旁瓣的目的。实验结果表明,该方法可以有效抑制 SAR 图像旁瓣。

关键词:合成孔径雷达;空间变迹法;属性散射中心模型;参数估计;旁瓣抑制

中图分类号: TP753 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Depression of SAR image sidelobes based on combination of attributed scattering center model and spatially variant apodization

Chen Qian¹ Liu Jinqing²

(1. Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou 350202, China; 2. Fujian Normal University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: For the problem of depression of the high sidelobes in synthetic aperture radar (SAR) images, a new way based on attributed scattering center model and spatially variant apodization (SVA) is proposed. SVA is one of the classical super-resolution image processing technologies, which could keep the resolution of mainlobe while depressing the sidelobes. Attributed scattering center can properly depict the scattering properties of targets at high frequency region, which is an important tool to analyze the SAR image. Attributed scattering center is employed to do the parameter estimation and then the parameters are used to do the SVA filter. Experimental show that the effectiveness of the proposed method as for depressing the sidelobes.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR); spatially variant apodization (SVA); attributed scattering center; parameter estimation; sidelobe depression

0 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)通过高分辨率成像的方式实现对感兴趣区域的有效观测。提高图像质量对于人工或自动解译均具有十分重要的意义^[1-3]。由于旁瓣会产生乘性噪声并对临近散射点有干扰作用,获得低旁瓣的系统脉冲响应对于 SAR 成像非常重要。但 SAR 成像系统的二维频域往往为有限窗,它使得脉冲响应函数在距离向和方位向均为 Sinc 函数,这样强散射中心的旁瓣极易淹没弱散射中心的主瓣,影响

SAR 图像质量。虽然可以通过合适加权来抑制旁瓣,但传统固定窗会使得主瓣展宽而导致分辨率下降。经 Hanning 窗加权的脉冲响应的主副瓣比增加到 31.5 dB,使得副瓣大大衰减,然而 Hanning 窗加权后的主瓣宽度却扩大为原来 Sinc 函数的 2 倍。其他各种传统窗函数如 Hanning 窗、Blackman 窗,均为原 Sinc 函数主瓣宽度和 Hanning 窗旁瓣抑制之间的折中处理。空间变迹法(spatially variant apodization, SVA)是一种非线性自适应旁瓣抑制算法,它能根据图像数据自适应确定加权系数,即加权函数会根据主副瓣的不同而相应变换,在保留主瓣宽度的基础上抑制旁瓣^[4-8]。传统的 SVA 方法依靠

收稿日期: 2020-03-22 Received Date: 2020-03-22

* 基金项目:福建省基金(2017J01464)资助项目



SAR 图像的图像数据通过数值计算和门限判决的方法确定某一像素点的位置。这种方法需要遍历 SAR 图像的每一个像素点,运算量过大。近年来,由于属性散射中心模型对目标散射中心的描述更为贴切且参数物理意义明确而成为 SAR 图像解译领域的研究热点,文献[9-11]采用属性散射中心作为基础特征设计 SAR 目标识别方法。属性散射中心模型的参数估计技术也不断发展成熟,包括基于图像域解耦的方法,基于稀疏的方法以及基于幅相分离的方法等,最终获得估计精度不断提高^[12-16]。

本文提出结合属性散射中心模型和空间变迹法的 SAR 图像增强方法。首先利用属性散射中心的参数估计技术对一幅 SAR 图像进行参数估计,得到各个散射中心的属性参数。再根据散射中心在图像域的特点确定各个散射中心的主瓣和旁瓣。在此先验信息的基础上,根据 SAR 图像中像素点所处的位置采用 SVA 对 SAR 图像进行处理,达到抑制旁瓣、增强 SAR 图像的目的。相比直接采用 SVA 算法,本方法通过对属性散射中心图像域分析避免了逐个像素的计算判决,提升了算法整体效率。同时,结合属性散射中心参数的物理意义,进一步提高旁瓣抑制效果以及图像质量。实验中,基于电磁仿真数据对提出方法进行了测试,结果验证了方法的有效性。

1 SVA 算法

SAR 图像处理中可使用加权函数以减少旁瓣,一般采用一阶升余弦加权函数,其解析表达式为:

$$a(n) = 1 + 2\omega \cos(2\pi n/N) \quad |n| \leq N/2 \quad (1)$$

式中: ω 变化范围为 0~0.5。其中 $\omega = 0$ 时,加权函数为矩形窗,主瓣宽度最窄; $\omega = 0.5$ 时,加权函数为 Hanning 窗,旁瓣得到最大抑制。SVA 是对原始复图像每一个像素点采用不同的加权函数进行处理^[4,8],达到抑制旁瓣的目的。对频域信号 $F(\omega)$ 加权,即:

$$F(\omega)a(n) = F(\omega_n \cdot n) [1 + 2\omega \cos(2\pi n/N)] \quad (2)$$

式中: ω_n 为频域采样间隔。对于一幅 Nyquist 采样下的复数图像 $g(m) = I(m) + iQ(m)$,可通过时域的三点卷积实现频域的升余弦加窗,得到滤波后的结果为:

$$g_\omega(m) = g(m) + \omega(m)[g(m-1) + g(m+1)] \quad (3)$$

加权系数 $\omega(m)$ 随着像素点 m 的不同而在约束范围 0~0.5 改变。SVA 通过寻找合适的 $\omega(m)$ 使得当前像素点 m 能量最小。以实部 $I(m)$ 为例,第 m 个经滤波输出的像素能量值为:

$$|I_\omega(m)|^2 = |I(m) + \omega(m)[I(m-1) + I(m+1)]|^2 \quad (4)$$

通过求解 $\partial |I_\omega(m)|^2 / \partial \omega(m) = 0$,得到无约束下使

得式(1)最小化的最优参数。

$$\omega_\mu(m) = -I(m) / [I(m-1) + I(m+1)] \quad (5)$$

其中, $\omega(m) \in [0, 0.5]$ 。根据 $\omega(m)$ 的不同可以判断该像素点的位置。

1) $\omega(m) < 0$,当前像素位于某一散射中心的主瓣内,此时采用矩形窗保持主瓣。

2) $0 \leq \omega(m) \leq 0.5$,当前像素位于某一散射中心的旁瓣内,此时必定可以通过 $\omega(m)$ 的调整完全抑制副瓣。

3) $\omega(m) \geq 0.5$,当前像素位于受旁瓣干扰的主瓣内,此时利用抑制旁瓣性能最佳的 Hanning 窗抑制旁瓣。

根据此判断,得到最终的加权输出图像:

$$\begin{cases} I(m), & \omega(m) < 0 \\ 0, & 0 \leq \omega(m) \leq 0.5 \\ I(m) + [I(m+1) + I(m-1)]/2, & \omega(m) > 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

虚部的处理方法与实部相同,故不再赘述。当采样频率为 Nyquist 频率的整数 k 倍时,式(3)变为:

$$g_\omega(m) = g(m) + \omega(m)[g(m-k) + g(m+k)] \quad (7)$$

其余步骤与上述算法一致。

由此可知,SVA 通过数值计算和门限判决的方法确定 SAR 图像中像素点所处的不同位置进而采用不同的窗函数达到抑制旁瓣保持主瓣的目的,最大限度的减少强散射中心旁瓣对于弱散射中心的影响,达到增强 SAR 图像的目的。

2 属性散射中心模型的参数估计

属性散射中心模型采用几何绕射和物理光学理论对高频区目标电磁散射特性进行分析,并构建参数化模型^[11-16]。认为目标的整体电磁散射可以等效为若干部局部散射源的叠加效应,如下所示:

$$\begin{aligned} E(f, \phi; \boldsymbol{\theta}) &= \sum_{i=1}^p E_i(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_i) \\ E_i(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_i) &= A_i \cdot \left(j \frac{f}{f_c} \right)^{\alpha_i} \cdot \exp\left(\frac{-j4\pi f}{c} (x_i \cos \phi + y_i \sin \phi) \right) \cdot \\ &\quad \text{sinc}\left(\frac{2\pi f}{c} L_i \sin(\phi - \bar{\phi}_i) \right) \cdot \exp(-2\pi f \gamma_i \sin \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}^T = [\boldsymbol{\theta}_1^T, \dots, \boldsymbol{\theta}_p^T]$ 代表原始目标的 p 个散射中心; $E_i(f, \phi; \boldsymbol{\theta}_i)$ 计算单个散射中心的散射场,与频率 f 、方位角 ϕ 以及属性参数 $\boldsymbol{\theta}_i = [A_i, \alpha_i, x_i, y_i, L_i, \bar{\phi}_i, \gamma_i]$ 有关。属性参数集中, x_i, y_i 分别表示散射中心在方位、距离向的位置; A_i 表示幅度; α_i 是频率依赖因子; L_i 代表散射中心长度; $\bar{\phi}_i$ 为散射中心方向角; γ_i 表示散射中心对方向角的依赖因子。当 $L_i = \bar{\phi}_i = 0$ 时,该散射中心为局域式散



射中心;当 $\gamma_i = 0, L_i \neq 0$ 时,该散射中心为展布式散射中心。

对于 SAR 频域观测数据 $D(f, \phi)$, 散射中心模型的参数估计问题可以写成如下形式:

$$D(f, \phi) = E(f, \phi; \theta) + N(f, \phi) \quad (9)$$

式中: $N(f, \phi)$ 代表噪声、模型失配等因素带来的误差,通过采用高斯分布进行建模。根据式(9),属性散射中心参数的极大似然参数估计为:

$$\hat{\theta}_{ML} = \arg \min_{\theta} \| D - E(\theta) \|^2 \quad (10)$$

作为 SAR 图像解译的重要特征之一,近年来针对属性散射中心模型的参数估计算法深入越发深入,包括图像域解耦的极大似然估计算法^[12]、稀疏表示算法^[13-14]以及幅相分离算法等^[15-16]。

3 基于属性散射中心模型和 SVA 的 SAR 图像增强

由第 1 节的分析可以看出,SVA 是借助一个判别准则的方法来判断像素点是否处于主瓣或旁瓣来进行处理。本文基于属性散射模型对 SAR 图像进行参数估计,给出了一种新的判别方法。

利用属性散射中心的参数估计方法得到 SAR 图像中的散射中心以及其类型与位置参数^[17-19]。根据各个散射中心的相对位置关系和各个散射中心的类型确定 SAR 图像中处于主瓣位置的像素点、处于旁瓣的像素点和受到旁瓣干扰的主瓣像素点。根据此结果利用 SVA 算法实现滤波处理,达到增强 SAR 图像的目的。

3.1 属性散射中心模型图像域分析

对式(8)的属性散射中心模型中的频率依赖项,采用 DE 模型近似:

$$\left(\frac{f}{f_c}\right)^\alpha = \left(1 + \frac{\Delta f}{f_c}\right)^\alpha \approx \exp\left(\alpha \cdot n \frac{\Delta f}{f_c}\right) = \exp\left(\alpha \cdot \frac{f}{f_c}\right) \cdot \exp(-\alpha) \quad (11)$$

令 $s = A_j^\alpha \exp(-\alpha)$, $\frac{\alpha}{f_c} = -2\pi r$, 则属性中心模型的表达式为:

$$E(f, \phi; \theta) = s \exp\left(-2\pi f\left(r + j \frac{2x}{x} \cos \phi\right)\right) \cdot \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi f}{c} L \sin(\phi - \bar{\phi}_i)\right) \cdot \exp\left(-2\pi f \sin \phi \left(\gamma + j \frac{2y}{c}\right)\right) \quad (12)$$

采用近似的差值算法将极坐标系转换为直角坐标系:

$$\begin{aligned} f_x &= f \cos \phi \\ f_y &= f \sin \phi \end{aligned} \quad (13)$$

得到在直角坐标下均匀分布的频域测量数据:

$$\begin{aligned} f_x &\in [f_c(1 - \beta/2), f_c(1 + \beta/2)], \\ f_y &\in [-f_c \sin(\phi_m/2), f_c \sin(\phi_m/2)] \end{aligned} \quad (14)$$

式中: f_c 为中心频率; β 为相对带宽。继续作如下近似:

$$2\pi f r \approx 2\pi f_x r \quad (15)$$

利用二维快速傅里叶逆变换 (IFFT) 将频域数据变换到图像域:

$$\begin{aligned} e^s(t_x, t_y) &= \int_{f_{y1}}^{f_{y2}} \int_{f_{x1}}^{f_{x2}} s \exp\left(-2\pi f_x \left(r + j \frac{2x}{c}\right)\right) \exp\left(-2\pi f_y \left(\gamma + j \frac{2y}{c}\right)\right) \cdot \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi L \cos \bar{\phi} (f_y - f_x \tan \bar{\phi})}{c}\right) \\ &\exp(j2\pi f_x t_x) \exp(j2\pi f_y t_y) df_x df_y \end{aligned} \quad (16)$$

由于加窗不会对散射中心的位置造成影响,故暂不讨论成像中的加窗影响。令 $s = 1$, 分离 x, y 的积分得到:

$$e^s(t_x, t_y) = \int_{f_{x1}}^{f_{x2}} \exp\left(-2\pi f_x \left(r + j \left(\frac{2x}{c} - t_x\right)\right)\right) \cdot I(t_y) df_x \quad (17)$$

$$\begin{aligned} I(t_y) &= \int_{f_{y1}}^{f_{y2}} \exp\left(-j2\pi f_y \left(\gamma + j \left(\frac{2y}{c} - t_y\right)\right)\right) \cdot \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi L \cos \bar{\phi} (f_y - f_x \tan \bar{\phi})}{c}\right) df_y \end{aligned} \quad (18)$$

针对局域式散射中心和展布式散射中心分别进行如下分析。

1) 局域式散射中心

$$\text{令矩形窗函数 } \operatorname{rect}_\tau(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \text{ 当 } L = 0$$

时,有:

$$I(t_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect}_{F_y}(f_y - f_y^c) \cdot \exp\left(-j2\pi f_y \left(\gamma + j \left(\frac{2y}{c} - t_y\right)\right)\right) df_y \quad (19)$$

式中: $F_y = f_{y2} - f_{y1}$, $f_y^c = (f_{y1} + f_{y2})/2$ 。根据 IFFT 的性质:

$$\begin{aligned} F^{-1}[\operatorname{rect}_{F_y}(f_y - f_y^c)] &= F_y \operatorname{sinc}(\pi F_y t_y) \cdot \exp(j2\pi f_y^c t_y) \\ F^{-1}\left[\exp\left(j2\pi f_y \left(-\frac{2y}{c} + j\gamma\right)\right)\right] &= \delta\left(t_y - \frac{2y}{c} + j\gamma\right) \end{aligned} \quad (20)$$

再利用卷积得到:

$$\begin{aligned} I(t_y) &= \left\{ F_y \operatorname{sinc}(\pi F_y t_y) \cdot \exp(j2\pi f_y^c t_y) \right\} * \\ &\left\{ \delta\left(t_y - \frac{2y}{c} + j\gamma\right) \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

同理,对 f_x 的积分进行类似变换,得到局部式散射中心在图像域的表达式:

$$\begin{aligned} e^s(t_x, t_y) &= \left\{ F_x \operatorname{sinc}(\pi F_x t_x) * \exp(j2\pi f_x^c t_x) \right\} * \\ &\left\{ \delta\left(t_x - \frac{2x}{c} + j\gamma\right) \right\} \cdot \left\{ F_y \operatorname{sinc}(\pi F_y t_y) * \right. \\ &\left. \exp(j2\pi f_y^c t_y) \right\} * \left\{ \delta\left(t_y - \frac{2y}{c} + j\gamma\right) \right\} \end{aligned} \quad (22)$$



可见,局域式散射中心在图像上表现为距离向和方位向的单一位置,呈现二维 Sinc 分布。

2) 图像展布式散射中心

当 $L \neq 0, \gamma = 0$ 时,则:

$$I(t_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}_{F_y}(f_y - f_y^c) \exp\left(-j2\pi f_y \frac{2y}{c}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{2\pi L \cos\bar{\phi}(f_y - f_x \tan\bar{\phi})}{c}\right) \exp(j2\pi f_y t_y) df_y \quad (23)$$

根据 IFFT 的性质,有:

$$F^{-1}\left[\exp\left(-j2\pi f_y \cdot \frac{2y}{c}\right)\right] = \delta\left(t_y - \frac{2y}{c}\right)$$

$$F^{-1}\left[\text{sinc}\left(\frac{2\pi L \cos\bar{\phi}(f_y - f_x \tan\bar{\phi})}{c}\right)\right] =$$

$$\frac{c}{2L \cos\bar{\phi}} \text{rect}_{\frac{2L \cos\bar{\phi}}{c}}(t_y) \exp[j2\pi t_y f_x \tan\bar{\phi}] \quad (24)$$

得到 f_y 的积分项:

$$I(t_y) = \{F_y \text{sinc}(\pi F_y t_y) \cdot \exp(j2\pi f_y^c t_y)\} \cdot \left\{\frac{c}{2L \cos\bar{\phi}} \text{rect}_{\frac{2L \cos\bar{\phi}}{c}}(t_y) \exp[j2\pi t_y f_x \tan\bar{\phi}]\right\} \quad (25)$$

根据乘积和卷积的可交换性,并且:

$$F^{-1}\left[\exp\left[j2\pi f_x \left(jr - \frac{2x}{c} + \tan\bar{\phi}\left(t_y - \frac{2y}{c}\right)\right)\right]\right] = \delta\left(t_y - \frac{2x}{c} + \tan\bar{\phi}\left(t_y - \frac{2y}{c}\right) + jr\right) \quad (26)$$

得到展布式散射中心在图像域的表达式如下:

$$e^s(t_x, t_y) = \{F_x \text{sinc}(\pi F_x t_x) * \exp(j2\pi f_x^c t_x)\} * \left\{(F_y \text{sinc}(\pi F_y t_y) \cdot \exp(j2\pi f_y^c t_y)) * \left\{\left(\frac{c}{2L \cos\bar{\phi}} \text{rect}_{\frac{2L \cos\bar{\phi}}{c}}(t_y) \exp[j2\pi t_y f_x \tan\bar{\phi}]\right) \cdot \delta\left(t_y - \frac{2x}{c} + \tan\bar{\phi}\left(t_y - \frac{2y}{c}\right) + jr\right)\right\}\right\} \quad (27)$$

仅考虑 $\bar{\phi} \approx 0$ 时的情形,得到:

$$e^s(t_x, t_y) = \{F_x \text{sinc}(\pi F_x t_x) * \exp(j2\pi f_x^c t_x)\} * \left\{\delta\left(t_y - \frac{2x}{c} + jr\right) \cdot \left\{(F_y \text{sinc}(\pi F_y t_y) \cdot \exp(j2\pi f_y^c t_y)) * \left(\frac{c}{2L} \text{rect}_{\frac{2L \cos\bar{\phi}}{c}}(t_y)\right)\right\}\right\} \quad (28)$$

可见,在 $\bar{\phi} \approx 0$ 时,展布式散射中心在图像表现为沿方位向延伸跨越若干各距离单元,距离向表现为 Sinc 分布。

3.2 参数估计与 SVA 滤波

本文采用极大似然方法实现参数估计,该方法通过在图像域进行高能量区域解耦分离独立散射中心,进而对单个散射中心按照式(9)、(10)的模型进行参数估计。具体实施流程如图 1 所示。

基于图像域的极大似然参数估计算法^[12]主要设计 5

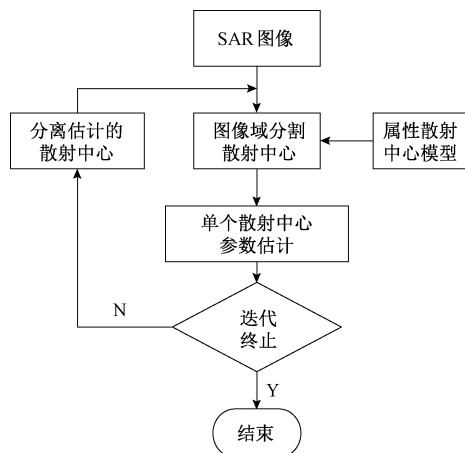


图 1 参数估计流程

Fig. 1 Flowchart of parameter estimation

个主要步骤:(1)图像分割,这一步骤主要从当前 SAR 图像(残差)中分离出具有最高能量的局部区域;(2)模型定阶,主要限定当前参数中心中散射中心数目的上限;(3)结构选择,即判断当前分离出的散射中心的类型,包括局域式和展布式;(4)参数初值求解,即根据图像域的初始位置和形状分布确定待估计参数的初值;(5)参数优化,即根据属性散射中心模型以及优化算法获得当前散射中心的最佳参数。基于参数估计的结果,可以判断 SAR 图像中散射中心的位置和类型等参数。在此基础上,根据散射中心类别的不同及其对应的图像域特征进行针对性 SVA 滤波。

1) 局域式散射中心

根据对局域式散射中心图像域的分析,可以发现局域式散射中心在图像中表现为二维 Sinc 的分布形式。以参数估计的散射中心为基准根据 -3 dB 带宽确定其主瓣宽度, -13 dB 确定其副瓣宽度(即矩形窗的第一旁瓣)。当像素点在 -3 dB 主瓣方位内采取保持主瓣;当副瓣内存在另一较弱散射中心时,认为弱散射中心受到强散射中心旁瓣干扰,采用 Hanning 窗抑制;当像素点处在其它位置时,认为属于纯旁瓣区域,采用置 0 的方法进行完全抑制。

2) 展布式散射中心

根据对展布式散射中心的图像域分析,可以发现展布式散射中心在图像域表现为沿着方位向跨越几个距离单元的连续像素点(相对倾角较小时),在距离向呈现 Sinc 分布。以参数估计得到的长度参数确定展布式散射中心在方位向的主瓣宽度(即为长度参数的大小);距离向上等同于局域式散射中心的处理。

两种处理方式的处理结果总结如下:



$$\begin{cases} I(m), \text{像素点处于主瓣位置} \\ 0, \text{像素点处于旁瓣} \\ I(m) + [I(m+1) + I(m-1)]/2, \text{像素点处于受强} \\ \text{副瓣干扰的主瓣} \end{cases} \quad (29)$$

根据上述分析,设计基于参数估计的 SAR 图像旁瓣抑制方法。首先对 SAR 图像进行参数估计,得到散射中心的个数以及各个散射中心的属性参数。然后,对各个散射中心按幅度参数(展布式散射中心进行强度平均)排序。再次,按照散射中心的强弱依次进行旁瓣抑制,对于弱散射中心进行旁瓣抑制时需要考虑强散射中心旁瓣对其的影响。最后,将各个散射中心处理完毕得到最终的输出图像。对于不同结构的目标而言,其本质上是具有局域式和展布式两种结构的散射中心构成。其整体的 SAR 图像旁瓣抑制可通过其单个散射中心的序贯处理进行,最终处理过的 SAR 图像可取得良好的旁瓣抑制效果。

4 实验与分析

本节中分别利用两个临近散射中心和一个点散射中心和一个展布式散射中心的电磁仿真数据开展旁瓣抑制实验。实验中,设置中心频率 $f_c = 9$ GHz,带宽 1 GHz,成像孔径 5° ,则成像(距离和方位)分辨率为 0.15 m,成像点数 $Mz = Nz = 202$ 。

4.1 实验 1-临近点散射中心

为验证本文方法保持主瓣分辨率的性能,采用临近点散射中心进行验证实验。临近点散射中心的仿真参数设置如表 1 所示。参数估计的结果如表 2 所示,估计精度保持较高水平。分别采用 Hanning 窗,标准 SVA 和本文方法进行成像,得到的结果如图 2 所示。从结果可以看出,采用 Hanning 窗虽可以最大程度抑制旁瓣,但其带来的分辨率下降非常明显,导致临近的散射中心无法区分。标准 SVA 方法不仅有效抑制了旁瓣并且有效保持了主瓣的分辨率。本文方法不仅最大程度抑制了 SAR 图像中的旁瓣并且对于临近点散射中心的区分效果最佳,能够更为有效地辅助后续的图像解译。

表 1 实验 1 散射中心参数设定

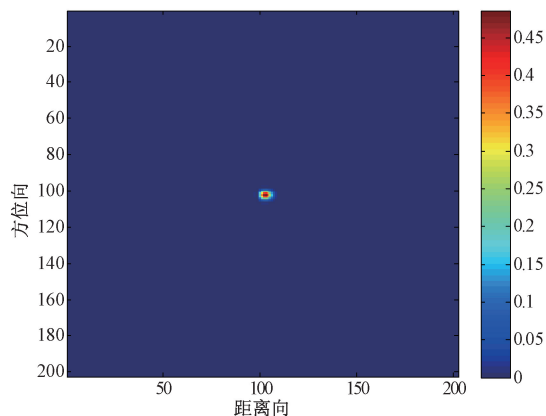
Table 1 Parameters setting of scattering centers in experiment 1

散射中心	属性参数						
	A	α	x_p/m	y_p/m	L_p/m	ϕ_p	γ_p
S1	10	0.5	0	0	0	0	0
S2	5	0.5	0.0	0.1	0	0	0

表 2 实验 1 参数估计结果

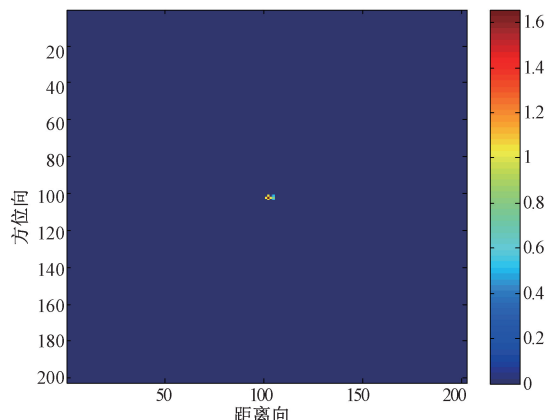
Table 2 The result of parameter estimation in experiment 1

散射中心	属性参数						
	A	α	x_p/m	y_p/m	L_p/m	ϕ_p	γ_p
S1	9.87	0.5	0.02	0.03	0	0	0
S2	4.92	0.5	0.05	0.14	0	0	0



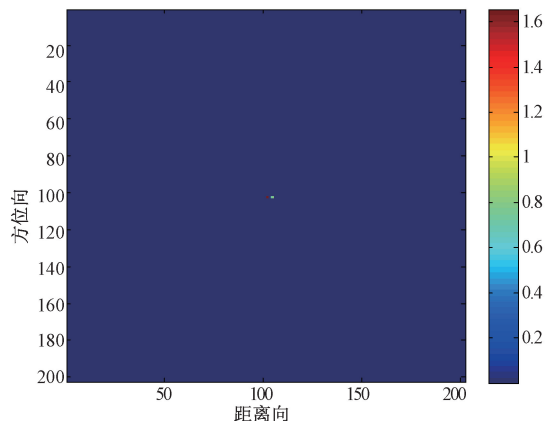
(a) Hanning 窗旁瓣抑制

(a) Sidelobe depression using Hanning window



(b) 标准 SVA 窗旁瓣抑制

(b) Sidelobe depression using standard SVA

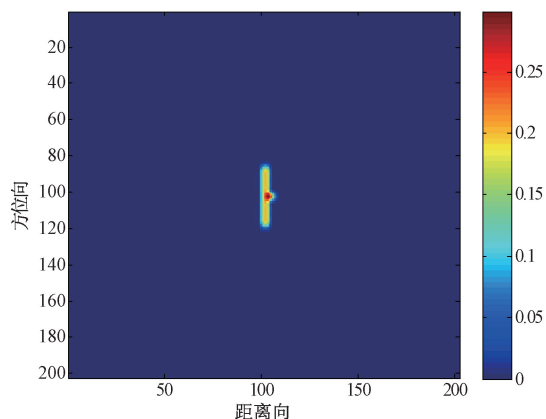


(c) 本文方法窗旁瓣抑制

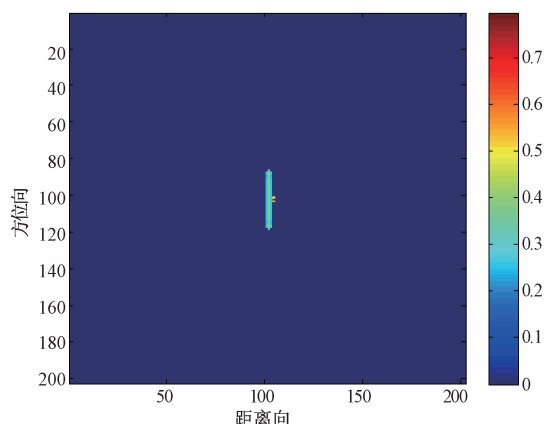
(c) Sidelobe depression using proposed method

图 2 临近点散射源的实验结果

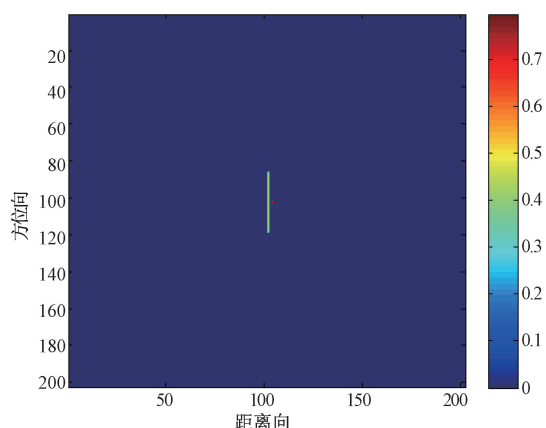
Fig. 2 The test of two near point scattering centers



(a) Hanning窗旁瓣抑制
(a) Sidelobe depression using Hanning Window



(b) 标准SVA窗旁瓣抑制
(b) Sidelobe depression using standard SVA



(c) 本文方法窗旁瓣抑制
(c) Sidelobe depression using proposed method

图 3 临近点散射中心和展布式散射中心的实验结果

Fig. 3 The test of two near point scattering centers and distributed scattering center

4.2 实验 2-临近点散射中心和展布式散射中心

采用一个点散射中心和一个临近的展布式散射中心进行验证实验,散射中心的参数设置如表 3 所示。参数估计的结果如表 4 所示,关键参数的估计精度仍然保持

较高水平。分别采用 Hanning 窗、标准 SVA 和本文方法进行成像,得到的结果如图 3 所示。与实验 1 中的结果类似,采用 Hanning 窗虽可以最大程度抑制旁瓣,但其带来的分辨率下降非常明显,导致临近的散射中心无法区分。标准 SVA 方法不仅有效抑制了旁瓣并且有效保持了主瓣的分辨率。本文方法不仅最大程度抑制了 SAR 图像旁瓣并且对于临近点散射中心的区分效果最佳,能够更为有效地服务于后续的图像解释。

表 3 实验 2 散射中心参数设定

Table 3 Parameters setting of scattering centers in experiment 1

散射中心	属性参数						
	A	α	x_p/m	y_p/m	L_p/m	ϕ_p	γ_p
S1	30	0.5	0	0	0.6	0	0
S2	5	0.5	0.0	0.1	0	0	0

表 4 实验 2 参数估计结果

Table 4 The result of parameter estimation in experiment 1

散射中心	属性参数						
	A	α	x_p/m	y_p/m	L_p/m	ϕ_p	γ_p
S1	29.28	0.5	0.03	0.03	0.58	0	0
S2	4.93	0.5	0.05	0.12	0	0	0

5 结论

本文提出结合属性散射中心模型的参数估计以及空间变迹法的 SAR 图像增强方法。通过参数估计可以有效判断 SAR 图像中每一个像素点所处的位置,即位于散射中心主瓣内、位于散射中心旁瓣内以及位于两个散射中心的耦合区域内。空间变迹法作为数字图像超分辨率处理技术之一,利用加权参数的变化和约束来自适应抑制旁瓣幅值,同时保持主瓣的宽度,对比传统的加窗方法可以取得进一步优化的效果。本文结合参数估计可以方便快捷的判定像素点的位置,避免了直接使用 SVA 的大运算量;散射中心的属性参数具有明确的物理意义,使得最终的滤波结果更加可靠。实验结果表明,该方法可以有效抑制 SAR 图像旁瓣。

参考文献

- [1] 王伟江, 彭业萍, 曹广忠, 等. 面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低亮度图像增强方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 131-139.
WANG W J, PENG Y P, CAO G ZH, et al. Non-uniform and low illumination image enhancement for cabinet surface defect detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 131-139.
- [2] 谢晴, 张洪. SAR 图像多层次正则化增强及在目标识别中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(9):



- 157-162.
- XIE Q, ZHANG H. Multi-level SAR image enhancement based on regularization with application to target recognition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(9): 157-162.
- [3] EL-DARYMLI K, GILL E W, MCGUIRE P, et al. Automatic target recognition in synthetic aperture radar imagery: a state-of-the-art review [J]. *IEEE Access*, 2016(4):6014-6058.
- [4] 田丰, 喻敏, 吴卫国. 空间变迹法在合成孔径声呐成像处理中的应用[J]. *电声技术*, 2010, 34(1):45-48. TIAN F, YU M, WU W G. Application of spatially variant apodization in SAS processing [J]. *Audio Engineering*, 2010, 34(1):45-48.
- [5] 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 P, YANG R L. A new SAR superresolution algorithm based on apodization extrapolation [J]. *ACTA Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1):71-75.
- [6] 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 K, LIAO G SH, XU Q, et al. Improved SVA method for SAR sidelobe suppression [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(6):96-103.
- [7] 宦若虹, 陶一凡, 陈月, 等. 基于小波变换空间变迹的 SAR 图像旁瓣抑制方法 [J]. *数据采集与处理*, 2019, 34(3): 558-565. HUAN R H, TAO Y F, CHEN Y, et al. SAR image sidelobe suppression method based on wavelet transform and spatial variant apodization [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing* 2019, 34(3): 558-565.
- [8] 徐光耀, 刘永泽, 许小剑. 基于变迹滤波的 MIMO-SAR 图像分辨率增强技术[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(7): 1313-1320. XU G Y, LIU Y Z, XU X J. Enhanced resolution in MIMO-SAR imaging using apodization [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(7): 1313-1320.
- [9] 丁柏圆, 文贡坚, 余连生, 等. 属性散射中心匹配及其在 SAR 目标识别中的应用[J]. *雷达学报*, 2017, 6(2):157-166. DING B Y, WEN G J, YU L SH, et al. Matching of attributed scattering center and its application to synthetic aperture radar automatic target recognition [J]. *Journal of Radar*, 2017, 6(2): 157-166.
- [10] DING B Y, WEN G J, ZHONG J R, et al. A robust similarity measure for attributed scattering center sets with application to SAR ATR [J]. *Neurocomputing*, 2017, 219:130-143.
- [11] 刘阳. 基于属性散射中心多层次匹配的 SAR 目标识别方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(11): 192-198. LIU Y. Target recognition of SAR images based on multi-level matching of attributed scattering centers [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(11): 192-198.
- [12] 张静克, 计科峰, 邢相薇. SAR 目标属性散射中心特征提取与分析[J]. *雷达科学与技术*, 2011, 9(3): 207-213. ZHANG J K, JI K F, XING X W, et al. Feature extraction and analysis of attributed scattering centers on SAR targets [J]. *Radar Science and Technology*, 2011, 9(3):207-213.
- [13] 李飞, 纠博, 刘宏伟, 等. 基于稀疏表示的 SAR 图像属性散射中心参数估计算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(4):931-937. LI F, JIU B, LIU H W, et al. Sparse representation based algorithm for estimation of attributed scattering center parameter on SAR imagery [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 931-937.
- [14] 段佳, 张磊, 盛佳恋, 等. 独立属性散射中心降耦合估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(8): 1853-1860. DUAN J, ZHANG L, SHENG J L, et al. Parameters decouple and estimation of independent attributed scattering centers [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8):1853-1860.
- [15] 蒋文, 李王哲. 基于幅相分离的属性散射中心参数估计新方法[J]. *雷达学报*, 2019, 8(5): 606-615. JIANG W, LI W ZH. A new method for parameter estimation of attributed scattering centers based on amplitude-phase separation [J]. *Journal of Radar*, 2019, 8(5): 606-615.
- [16] 张华, 张素莉, 何树吉. 基于幅相分离和动态粒子群算法的 SAR 图像属性散射中心参数估计[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(9): 993-1000. ZHANG H, ZHANG S L, HE SH J. Parameter estimation of attributed scattering centers in SAR images based on amplitude-phase separation and DPSO [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2019, 14(9): 993-1000.
- [17] 陶勇, 胡卫东. 基于方位特性表征的属性散射中心模型参数估计方法[J]. *信号处理*, 2010, 26(5): 736-740.



TAO Y, HU W D. An aspect-dependence characteristic-based approach for parameter estimation of attribute scattering center model [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5):736-740.

- [18] 郭琨毅, 牛童瑶, 屈泉西, 等. 散射中心的时频像特征研究 [J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(2): 478-485.

GUO K Y, NIU T Y, QU Q X, et al. Research on signatures of scattering centers shown in time-frequency representation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 478-485.

- [19] 吴敏, 张磊, 段佳, 等. 基于属性散射中心模型的 SAR 超分辨成像算法 [J]. *电子与信息学报*, 2014, 35(9):1058-1064.

WU M, ZHANG L, DUAN J, et al. Super-resolution SAR imaging algorithm based on attributed scattering center model [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(9):1058-1064.

作者简介



陈潜, 1997年毕业于福州大学计算机系, 现为福州外语外贸学院副教授, 主要研究方向为数据库技术、图形图像技术。

E-mail: cqianqianfj@tom.com

Chen Qian graduated from the computer department of Fuzhou University in 1997, he is now an associate professor at Fuzhou Institute of Foreign Studies. His main research interests are database technology, graphics and image technology.



刘金清, 1987年毕业于华东师范大学, 现为福建师范大学教授, 主要研究方向为图像处理技术。

E-mail: lj_q_s@163.com

Liu Jinqing graduated from East China Normal University in 1987. He is now a professor at Fujian Normal University. His main research direction is image processing technology.