

基于相位恢复原理的 SAR 振动目标成像方法*

史洪印, 丁郁霏, 赵欣悦, 夏赛雪, 田野

(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘要:在 SAR 成像系统中, 振动目标成像具有成对回波的多普勒特征, 不利于振动目标的检测和识别。提出一种基于相位恢复原理的振动目标聚焦成像方法。首先基于条带式 SAR 成像模式建立了振动目标空间几何模型, 理论推导了将相位恢复原理应用到 SAR 振动目标成像的可能性; 然后以振动目标回波数据和支撑域信息作为过采样平滑算法(OSS)的先验信息, 通过改变平滑滤波器的参数, 调整滤波器的带宽, 以减少支撑域外部信息对振动目标的干扰, 同时通过减少支撑域, 提高迭代算法的收敛性, 消除振动目标成对回波, 最终得到聚焦的高分辨率振动目标图像。仿真和实验结果证明所提方法的有效性。

关键词:合成孔径雷达; 相位恢复原理; 过采样平滑算法; 振动目标成像

中图分类号: TN95 TH825 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

SAR vibrating target imaging method based on phase retrieval principle

Shi Hongyin, Ding Yufei, Zhao Xinyue, Xia Saixue, Tian Ye

(School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In synthetic aperture radar (SAR) imaging system, vibrating target imaging possesses the Doppler characteristics of paired echoes, which is not conducive to the detection and identification of vibrating targets. A vibrating target imaging method based on phase retrieval principle is proposed in this paper. Firstly, according to the strip-map SAR imaging mode, the geometric model of vibrating target is established, and the possibility of applying the phase retrieval principle to the SAR vibrating target imaging is deduced theoretically. Then, taking the echo data of SAR vibrating target and support domain information as the prior information of the oversampling smoothing (OSS) iterative algorithm. through changing the parameters of the smoothing filter to adjust the filter bandwidth, the interference of the external support domain information to the vibrating target is reduced, At the same time, through reducing the size of the support domain, improve the convergence of the iterative algorithm and eliminate paired echoes of vibrating target, finally the focused high resolution image of the vibrating target is obtained. The simulation experiment results prove the effectiveness of the proposed method.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR); phase retrieval principle; oversampling smoothness algorithm; vibrating target imaging

1 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)作为一种主动式微波传感器,具有全天时、全天候对地面目标进行观测的特点,在民用领域和军事领域占有重要的地位。通常情况下,在雷达探测区域中,运动目标存在小幅度的振动,且振动幅度往往小于雷达分辨率,例如发动机的引擎。这会对雷达目标成像产生不利的影

响。目标和直线运动目标相比,振动目标的多普勒频率具有正余弦形式^[1],破坏了传统的 SAR 目标成像。目前,国内外已有关于对地面振动目标特性的研究。2003年,Sparr T 等人^[2]对 SAR 振动目标的多普勒进行了分析,采用自适应最优核的方法,解决了瞬时频率的问题;Rüegg M 等人^[3]于 2007 年研究了毫米级别 SAR 振动目标,指出 SAR 系统的波长接近目标的振动振幅,适合采用毫米波 SAR 系统对振动目标进行成像;2011 年,张伟等人^[4]研究了振动目标多普勒提取方法,采用双通道相位中心

偏置天线(displaced phase center antenna, DPCA)技术消除地面杂波以获得振动目标的回波信息,得到与振动目标振动参数、载波波长和两天线的相位中心间距相关的微多普勒频率;2013年,张远等人^[5]提出一种振动目标成对回波的聚焦方法,该方法采用Keystone变换对振动目标回波进行距离徙动校正,实现对不同状态下多个振动目标成对回波进行聚焦;2014年,陈稳等人^[6]研究了一种利用子孔径Hough变换的方法对振动目标进行检测,该方法在孔径间采用Hough变换进行非相干积累进一步抑制杂波以获得高回波信噪比和高稳健性的振动目标检测;2015年,文献[7]提出一种地面振动目标检测和特征提取方法,采用固定式双基调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW) SAR,利用DPCA杂波抑制方法获得振动目标回波信号的慢时间包络,利用慢时间包络与振动目标特征的关系实现对振动目标的检测;文献[8]将压缩感知理论(compressive sensing, CS)应用到SAR旋转微动目标成像中,利用Hough变换域的稀疏性实现微动目标的检测;文献[9]研究了SAR振动和转动目标回波模型,推导出回波方位向将呈现正弦调频(sinusoidal frequency modulation, SFM)信号周期性特点。

近年来,在信号处理领域,一个与成像密切相关的问题是相位恢复(phase retrieval, PR)问题,相位恢复的目的是仅仅从信号在某个变换域的幅度测量值(通常是傅里叶变换幅度谱)中恢复出原信号。其已广泛应用到光学、图像处理、天文学成像、X射线成像等领域^[10-12]。相位恢复算法最早是在1972年由Gerchberg R. W.等人^[13]提出的Gerchberg-Saxton算法,简称为GS算法。该算法根据成像系统的像平面和衍射平面强度图像,利用数值迭代算法恢复信号的相位。但是GS算法收敛情况比较缓慢,常常使算法陷入“停滞”状态。为了解决此弊端,科学家们随后提出了误差减少(erro-reduction, ER)算法、混合输入输出(hybrid input-output, HIO)算法^[14]、杨-顾算法^[15]、过采样平滑(oversampling smoothness, OSS)算法^[16]等较为有效的傅里叶迭代算法,在这些算法中,ER算法的收敛速度较慢,HIO算法和杨-顾算法的迭代收敛速度较快,OSS算法具有强的鲁棒性和抗噪声性能,同时具有较高的收敛速度。本文针对SAR振动目标的成像问题,提出一种新的基于OSS算法的振动目标成像方法。从SAR成像机理来看,振动目标的回波可视为具有相位误差的静止目标的回波,所以SAR振动目标的成像问题可以认为是广义上的空变自聚焦问题。首先构建了SAR振动目标回波模型,然后讨论了将相位恢复算法应用到振动目标成像的可能性。该方法以振动目标回波信号的傅里叶幅度的平方作为相位恢复算法的输入信号,通过改变平滑滤波器参数,调整滤波器宽度,减少支

撑域外部信号对目标的干扰,提高算法的收敛速度,以获得聚焦的振动目标图像。

2 OSS 相位恢复算法

相位恢复算法的核心思想是真实空间平面和傅里叶变换谱平面之间迭代进行的傅里叶变换,并且在真实空间平面和傅里叶变换谱平面对信号进行一定的约束,使迭代算法能收敛到原始信号的相位信息。

基于迭代过程的传统相位恢复算法,首先估计一个初始相位 $\exp[j\varphi(x, y)]$, $\varphi(x, y)$ 的取值在 $0 \sim 2\pi$ 之间,下一次迭代的相位用步骤5)计算得到的信号作为下一次迭代计算的输入,将初始相位作为一个输入信号,则经过 k 次迭代后变成 $f_k(x, y)$,其迭代过程分为如下5步。

1)对信号 $f_k(x, y)$ 进行傅里叶变换,将其变换到傅里叶变换域,则信号变成 $F_k(\omega, \nu)$ 。

$$f_k(x, y) = |f_k(x, y)| \exp[j\varphi_k(x, y)] \quad (1)$$

$$F_k(\omega, \nu) = |F_k(\omega, \nu)| \exp[j\theta_k(\omega, \nu)] = \text{FT}[f_k(x, y)] \quad (2)$$

式中:FT表示傅里叶变换, $|F_k(\omega, \nu)|$ 是第 k 次迭代信号经过傅里叶变换之后得到的幅度信息, $|f_k(x, y)|$ 是第 k 次迭代信号的幅度信息, $\exp[j\varphi_k(x, y)]$ 是信号的相位, $\exp[j\theta_k(\omega, \nu)]$ 是信号进行傅里叶变换后的相位信息。

2)用 $F_k(\omega, \nu)$ 的相位部分与真实信号的振幅信息相乘得到 $F'_k(\omega, \nu)$ 。

$$F'_k(\omega, \nu) = |F(\omega, \nu)| \frac{F_k(\omega, \nu)}{|F_k(\omega, \nu)|} = |F(\omega, \nu)| \exp[j\theta_k(\omega, \nu)] \quad (3)$$

3)对信号 $F'_k(\omega, \nu)$ 做傅里叶逆变换得到 $f'_k(x, y)$ 。

$$f'_k(x, y) = |f'_k(x, y)| \exp[j\varphi_k(x, y)] = \text{IFT}[F'_k(\omega, \nu)] \quad (4)$$

式中:IFT表示傅里叶逆变换。

4)对 $f'_k(x, y)$ 进行真实空间的幅度约束,即支撑域约束条件为:

$$f''_k(x, y) = \begin{cases} f'_k(x, y), & i \in N_0 \\ \beta f'_k(x, y), & i \notin N_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: β 为约束参数,是一个非常小的数值, N_0 表示支撑域信息,代表支撑域的大小。

5)在非支撑域外部加入高斯平滑滤波器,则变为:

$$f_{k+1}(x, y) = \begin{cases} f''_k(x, y), & i \in N_0 \\ \text{IFT}\{F''_k(\omega, \nu)W\}, & i \notin N_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: W 是一个高斯平滑滤波器。高斯平滑滤波器适用于支撑域外部区域,通过改变滤波器的参数,调整滤波器

的宽度,减少支撑域外部信息的干扰。将迭代得到的相位信息作为下一次迭代的输入信息。

经过上述5个步骤得到新的估计相位信息,并且进行反复迭代,使得到的相位信号逐渐收敛到真实信号的相位信息,从而得到原始信号,当相邻两次的迭代结果差值小于设定的阈值,则迭代停止,此时所得到的相位信息即是所需的相位信息,若差值大于阈值,则继续进行迭代,直到小于所设定的阈值为止。

通常情况下,相位恢复原理采用均方差(mean square error, MSE)和相关系数(correlation coefficient, CC)作为迭代算法的收敛准则,则MSE和CC公式为:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |f_i(x, y) - f(x, y)|^2 \quad (7)$$

$$CC = \frac{COV[f(x, y) - f_k(x, y)]}{\sigma_{f(x, y)} \sigma_{f_k(x, y)}} \quad (8)$$

式中: $f(x, y)$ 代表原始信号, $f_k(x, y)$ 表示经过第 k 次迭代后得到的信号, i 表示信号在行向量中的像素位置, j 表示信号的列向量中的像素位置, M 表示信号行向量中的像素数, N 表示信号列向量中的像素数, $COV[f(x, y) - f_k(x, y)]$ 表示两个信号的协方差, $E\{\cdot\}$ 表示信号的数学期望, σ 为信号的标准差。

OSS算法具有高的稳健性和鲁棒性,迭代次数可以减少到200次,适用于含有噪声和低散射系数场景中,本文采用OSS迭代算法,对振动目标进行成像,消除因目标振动所产生的影响。

3 SAR 振动目标成像

3.1 振动目标回波模型

目标振动的形式可以分为多种,有随机振动、抖动、颤动、谐振等,本文以谐振运动目标作为研究对象,以机载正侧视SAR为例,采用条带成像模式,建立了振动目标回波模型,如图1所示。

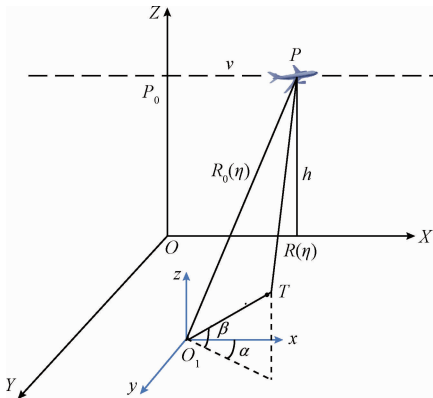


图1 SAR 振动目标空间几何模型

Fig. 1 Spatial geometric model of SAR vibrating target

振动目标 T 沿某一轴作简谐振动,振幅为 A_v ,振动角频率为 ω ,初相为 φ_0 ,则振动目标相对于振动中心 $O_1(x_0, y_0, 0)$ 的运动轨迹 A_η 为:

$$A_\eta = A_v \cos(\omega\eta + \varphi_0) \quad (9)$$

A_η 以 O_1 为坐标原点,沿 x, y, z 轴的投影为:

$$\begin{cases} A_{\eta x} = A_v \cos(\omega\eta + \varphi_0) \cos\beta \cos\alpha \\ A_{\eta y} = A_v \cos(\omega\eta + \varphi_0) \cos\beta \sin\alpha \\ A_{\eta z} = A_v \cos(\omega\eta + \varphi_0) \sin\beta \end{cases} \quad (10)$$

经过 η 时间后振动目标 T 到飞机的距离 $R(\eta)$ 为:

$$R(\eta) = [(v\eta - x_0 - A_\eta \cos\beta \cos\alpha)^2 + (y_0 + A_\eta \cos\beta \sin\alpha)^2 + (h - A_\eta \sin\beta)^2]^{1/2} \quad (11)$$

可将 $R(\eta)$ 等效为:

$$R(\eta) = |\vec{TP}| \approx |\vec{O_1P}| - \vec{O_1T} \cdot \frac{\vec{O_1P}}{|\vec{O_1P}|} \quad (12)$$

对式(12)进行化简,则振动目标 T 到飞机的距离近似为:

$$R(\eta) = R_0(\eta) + A_v \sin(\gamma - \beta) \cos\beta \cos(\omega\eta + \varphi_0) \quad (13)$$

式中: $\gamma = \arctan\left(\frac{x_0 - v\eta}{h}\right)$,当 $x_0 - v\eta \leq h$ 时 $\gamma \approx$

$\frac{x_0 - v\eta}{h}$,令 $A = A_v \sin(\gamma - \beta) \cos\beta$,则式(13)变为:

$$R(\eta) = R_0(\eta) + A \cos(\omega\eta + \varphi_0) \quad (14)$$

振动目标的多普勒历程为:

$$f_d(\eta) = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(\eta)}{d\eta} = f_{dref}(\eta) + f_{dm}(\eta) \quad (15)$$

式中: $f_{dref}(\eta)$ 为静止目标在 O_1 点处的多普勒分量。

$$f_{dref}(\eta) = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR_0(\eta)}{d\eta} =$$

$$-\frac{2}{\lambda} \frac{d(\sqrt{(v\eta - x_0)^2 + y_0^2 + h^2})}{d\eta} = -\frac{2}{\lambda} \frac{v(v\eta - x_0)}{\sqrt{(v\eta - x_0)^2 + y_0^2 + h^2}} = -\frac{2}{\lambda} \frac{v(v\eta - x_0)}{R_0(\eta)} \quad (16)$$

式中: $f_{dm}(\eta)$ 为振动目标的微多普勒分量。则 $f_{dm}(\eta)$ 近似为:

$$\begin{aligned} f_{dm}(\eta) &= -\frac{2}{\lambda} \frac{d[A \cos(\omega\eta + \varphi_0)]}{d\eta} = \\ &= -\frac{2}{\lambda} \frac{d[A_v \sin(\gamma - \beta) \cos\beta \cos(\omega\eta + \varphi_0)]}{d\eta} = \\ &= \frac{2}{\lambda} A_v \omega \sin\left(\frac{x_0 - v\eta}{h} - \beta\right) \cos\beta \sin(\omega\eta + \varphi_0) + \\ &= \frac{2}{\lambda} A_v \frac{v \cos\beta \cos(\omega\eta + \varphi_0)}{h} \cos\left(\frac{x_0 - v\eta}{h} - \beta\right) = \\ &= \frac{2}{\lambda} A_v \cos\beta [\omega \sin(\gamma - \beta) \sin(\omega\eta + \varphi_0) + \\ &= \frac{v}{h} \cos(\gamma - \beta) \cos(\omega\eta + \varphi_0)] \quad (17) \end{aligned}$$

振动目标的多普勒历程如图2所示。由于目标作简谐振动,使瞬时频率表现为正弦曲线的形式,瞬时频率与振动目标的振动频率有关,并且随目标振动频率的增大而增大。

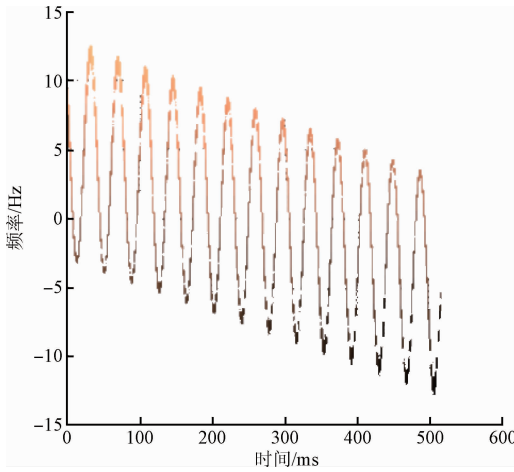


图2 SAR 振动目标多普勒历程

Fig.2 Doppler process of SAR vibrating target

雷达接收到振动目标的回波信号为:

$$s_0(\tau, \eta) = A_0 w_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] w_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp \left\{ -j4\pi f_0 R(\eta)/c \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi K_r (\tau - 2R(\eta)/c)^2 \right\} \quad (18)$$

3.2 SAR 振动目标成像

为了从回波数据的傅里叶幅度中恢复出目标的图像,回波数据必须满足一些约束,其中最重要的约束就是图像的支撑域信息,支撑域大小与算法迭代过程所用时间多少成正比,支撑域越小,所用时间越少,当支撑域大小与图像大小相同时,迭代所用的时间将最少。如果将雷达数据加上一些已知的图像数据约束,那么就可以将相位恢复算法应用到 SAR 数据中。

雷达成像的过程实际上就是对回波信号进行脉冲压缩处理,即通过信号频谱与含有和信号频谱具有共轭相位的匹配滤波器进行相乘实现。在雷达成像处理的过程中,只是对信号的相位进行补偿处理以获得高的分辨率,信号的幅度不会改变。

对振动目标的回波信号进行二维傅里叶变换,将其变换到二维频域。

$$S_0(f_\tau, f_\eta) = A_0 \iint w_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] w_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp \left[\Theta(\tau, \eta) \right] \cdot \exp \left(-2j\pi f_\tau \tau - 2j\pi f_\eta \eta \right) d\tau d\eta = A_0 w_r \left(\frac{f_\tau}{kT_p} \right) w_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(4\pi f_0 A/c) \cdot \exp \left(-j2\pi(f_\eta + mf_n) \frac{x_0}{v} \right).$$

$$\exp \left(-j4\pi R_B \sqrt{\left(\frac{f_\tau + f_\eta}{c} \right)^2 - \left(\frac{f_\eta + mf_n}{2v} \right)^2} \right) \approx A_0 w_r \left(\frac{f_\tau}{kT_p} \right) w_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(4\pi f_0 A/c) \cdot \exp \left(-j2\pi f_\eta \frac{x_0}{v} \right) \cdot \exp \left(\frac{-j4\pi R_B}{\lambda} \right) \cdot \exp \left(j2\pi \frac{cR_B}{4v^2} \left(\frac{f_\tau^2}{f_\tau + f_\eta} + \frac{2mf_n f_\tau}{f_\tau + f_\eta} \right) \right) = |S_0(f_\tau, f_\eta)| \Psi(f_\tau, f_\eta) \quad (19)$$

式中: $\Theta(\tau, \eta) = -j4\pi f_0 R(\eta)/c + j\pi K_r [\tau - 2R(\eta)]^2$, $|S_0(f_\tau, f_\eta)|$ 表示雷达的回波信号在二维频域的幅度值, $\Psi(f_\tau, f_\eta)$ 表示回波经过二维傅里叶变换之后的相位, R_B 为斜距平面雷达与飞机的最小距离, $f_n = \omega/2\pi$ 为微动目标的旋转频率, λ 为线性调频信号的波长。

静止目标回波信号经过二维傅里叶变换之后变为:

$$S'_0(f_\tau, f_\eta) = \iint A'_0 w_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] w_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp(\Theta'(\tau, \eta)) \cdot \exp(-2j\pi f_\tau \tau - 2j\pi f_\eta \eta) d\tau d\eta = A'_0 w_r \left(\frac{f_\tau}{kT_p} \right) w_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \cdot \exp \left(-j\pi \frac{f_\tau^2}{K_r} \right) \cdot \exp \left(-\frac{4\pi R}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{f_\eta}{f_0} \right)^2 - \left(\frac{\lambda f_\eta}{2v} \right)^2} \right) = |S'_0(f_\tau, f_\eta)| \Psi'(f_\tau, f_\eta) \quad (20)$$

式中: $\Psi'(f_\tau, f_\eta)$ 是回波经过二维傅里叶变换之后的相位, $|S'_0(f_\tau, f_\eta)|$ 是回波经过二维傅里叶变换之后的幅度。由相位恢复理论可知,恢复出的原始信号只与信号的幅度有关,与信号的相位无关。由式(19)和(20)中可以看出,由于 $w_r(\cdot)$ 和 $w_a(\cdot)$ 都是矩阵函数,在幅值上都为1, $A = A_v \sin(\gamma - \beta) \cos\beta$, 当振动的幅度 A_v 比较小,即处于毫米级别时,式(4)~(19)中的 $\left| \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(4\pi f_0 A/c) \right| \approx 1$, 可近似认为振动目标的二维频域幅度与静止目标回波的二维频域幅度近似,只是当振动幅度处于分米级别时频域幅度会产生平移,因此可运用相位恢复原理对振动目标进行成像,消除因振动目标与雷达平台运动所产生的相位模糊,得到与静止目标图像相同得聚焦图像。

基于相位恢复算法的 SAR 振动目标成像过程可分为以下几步:

1) 雷达发射线性调频信号,经振动目标散射后得到振动目标的回波信号。

2) 将回波信号进行二维傅里叶变换,将其变换到二维频域,得到二维频域的幅度信息 $|S_0(f_\tau, f_\eta)|$, 当振动目标的振动幅度较大时,就会导致振动目标的幅度图像产生平移,因此需对其进行相应的补偿,补偿后的幅度信息为 $|S'_0(f_\tau, f_\eta)|$ 。

3) 根据一般 SAR 成像结果估计振动目标成像所占

区域大小,设置支撑域信息,将修正后的幅度信息和支撑域信息作为OSS迭代算法的先验知识,将其输入到OSS算法中进行迭代,当相邻两次迭代的误差小于设定的阈值时,则迭代停止,得到聚焦的高分辨率图像。

4)与一般光学成像等相位恢复问题不同的是,光学成像中没有目标相位信息,检测设备只能测量出其傅里叶变换的幅度信息;而在SAR系统存在相位误差,但仍可加以利用。所以针对SAR成像系统的特点,可以利用成像的先验相位信息(经典算法得到的图像)提高相位恢复算法的成功率并降低算法的迭代次数。

4 实验验证

4.1 仿真实验

SAR振动目标参数如表1所示,雷达在距离向的成像区域范围为 $R = [4\ 200, 4\ 280]$,方位向的成像区域范围为 $X = [-75, 75]$,振动目标的振动中心 O_1 点坐标为 $(0, 3\ 000, 0)$,初始相位设为 $\varphi_0 = 0^\circ$,信号的采样频率为180 MHz。距离向分辨率 $\rho_r = 1\text{ m}$,方位向分辨率为 $\rho_a = 1\text{ m}$,迭代次数为200,支撑域为 200×200 。

表1 SAR振动目标仿真参数

Table 1 SAR vibrating target simulation parameters

系统参数	数值
方位向天线孔径度/m	$D = 2$
飞行高度/m	$A_v = 0.005$
合成孔径长度/m	$L = 212$
距离调频率/($\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1}$)	$K_r = 1 \times 10^{14}$
发射信号带宽/MHz	$B_r = 150$
载机速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v = 150$
脉冲重复频率/Hz	$PRF = 188$
雷达载波频率/Hz	$f_0 = 3 \times 10^9$
脉冲宽度/ μs	$T_r = 1.5$
最小斜距/m	$R_0 = 4\ 242$

静止目标和振动目标二维频域的幅度图如图3所示,图3(a)为静止目标的幅度图像,其中距离向和方位向坐标表示采样点数,无量纲。图3(b)为 $A_v = 0.02\text{ m}$, $\omega = 20\pi\text{ rad/s}$ 的幅度图像。从图3可以看出振动目标的幅度图像与静止目标的幅度图像近似,只是振动目标的幅度图像会产生移动,图3(c)为图3(b)进行校正之后的幅度图像。

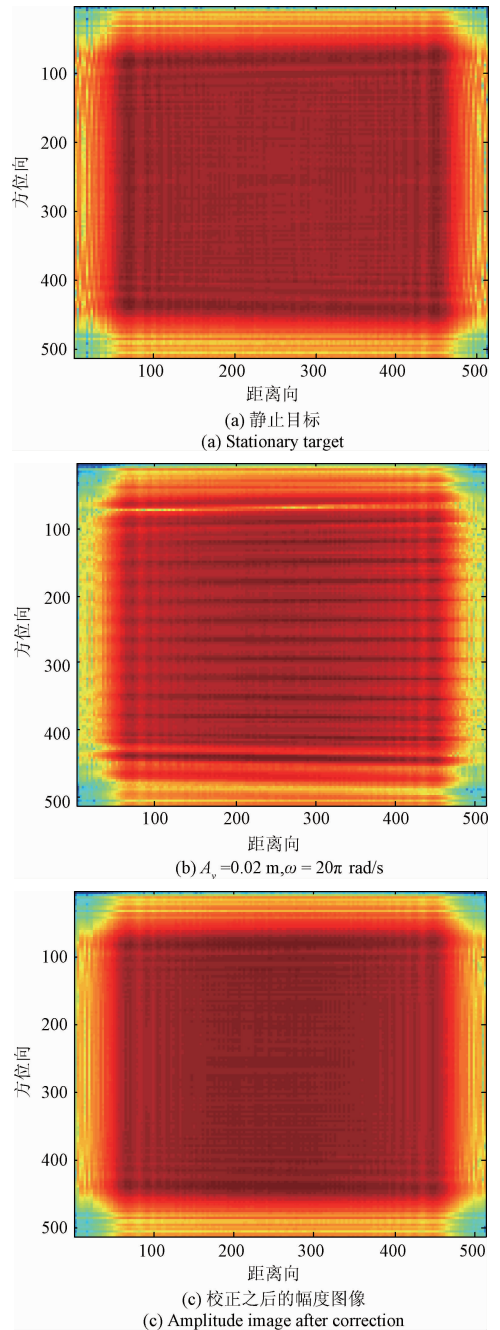


图3 静止目标与振动目标的二维频域幅度图
Fig.3 Two dimensional frequency domain amplitude images of stationary target and vibrating target

利用RD算法对振动目标进行成像结果如图4所示。振动目标所成的像与旋转微动目标所成的像近似,图像中会出现成对回波,由于振动目标的振动幅度通常小于距离向分辨率,因此振动目标的成像不会出现条带型,一般为直线点列型和直线型。在实际应用中振动目标的振动幅度较小,一般情况下处于毫米级别,振动目标频率较高,处于10 Hz级别,成像形式为直线点列式。在本文的实验仿真中模拟了3种情况,分别是振动幅度

处于毫米、厘米和分米级别, 即当 $A_v = 0.005 \text{ m}$, $\omega = 30\pi \text{ rad/s}$; $A_v = 0.02 \text{ m}$, $\omega = 20\pi \text{ rad/s}$, 时, 即 $2A_v < \rho_r$, $\Delta x > \rho_a$, 振动目标的图像为直线点列型, 如图 4(a) 和 (b) 所示。当 $A_v = 0.3 \text{ m}$, $\omega = \pi \text{ rad/s}$ 时, 即 $2A_v < \rho_r$, $\Delta x < \rho_a$, 振动目标的图像为直线型, 如图 4(c) 所示。

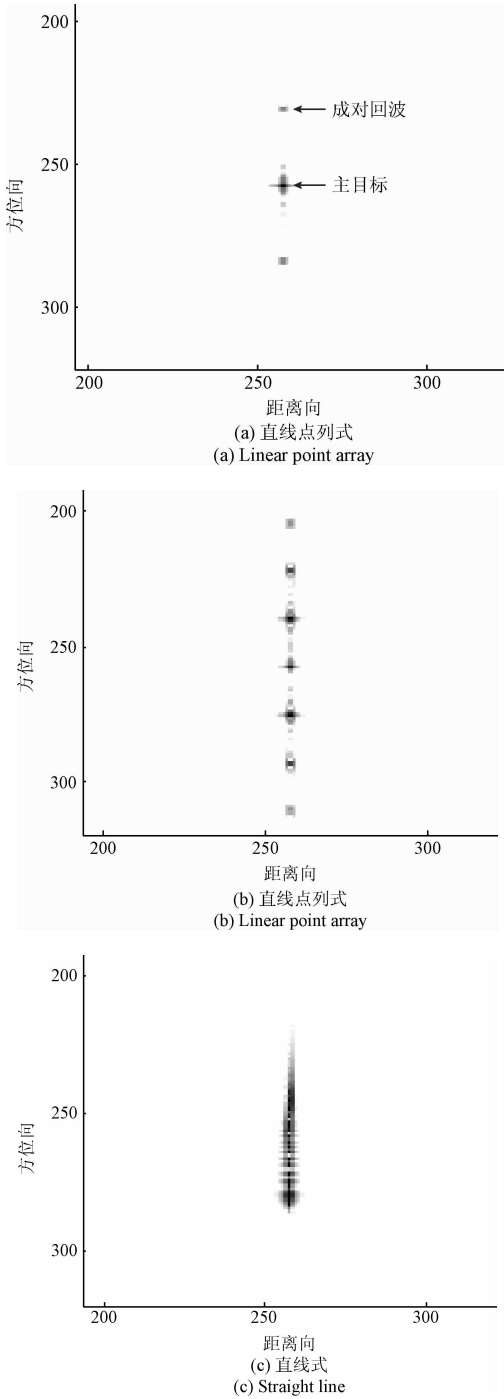


图 4 振动目标的成像形式
Fig. 4 Imaging forms of vibrating target

本文利用 OSS 算法对振动的点目标进行成像。图 5(a) 和 (b) 分别是 3 个静止点目标和 3 个振动点目标在二维频域的幅度图, 其中振动目标的振幅为 $A_v = 0.02 \text{ m}$, 频率为 $\omega = 20\pi \text{ rad/s}$ 。

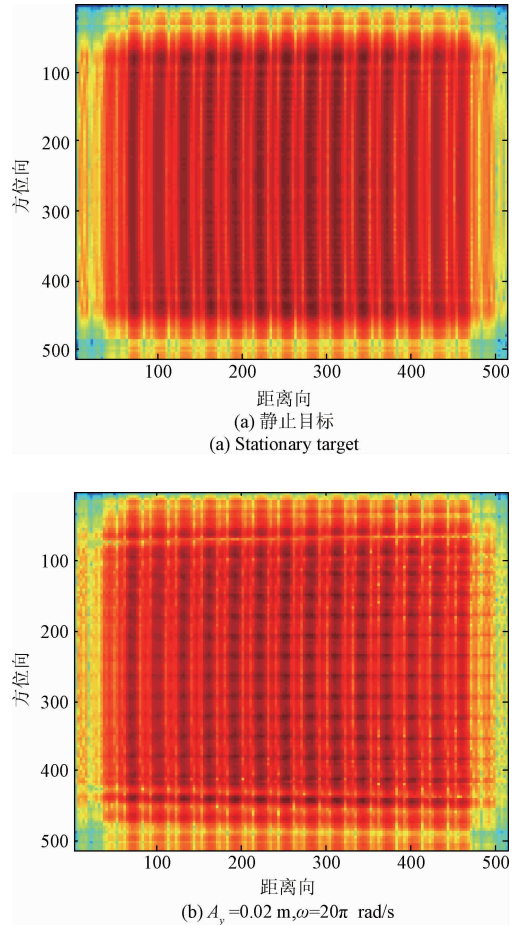


图 5 三点静止目标和三点振动目标二维幅度图
Fig. 5 Two dimensional amplitude images of three stationary point targets and three vibrating point targets

图 6 ~ 9 是对于不同振动点目标采用 RD 算法和本文提出的 OSS 算法成像结果的对比。其中图 6 和 7 是距离向 3 个振动点目标采用 RD 算法分别所形成的直线型和直线点列型图像以及对应的 OSS 算法恢复结果; 图 8 所示为 $A_v = 0.02 \text{ m}$, $\omega = 30\pi \text{ rad/s}$ 时 5 个振动点目标成像结果; 图 9 所示为振动半径为 $A_v = 0.005 \text{ m}$, 频率分别为 $\omega_1 = 30\pi \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 20\pi \text{ rad/s}$, $\omega_3 = 10\pi \text{ rad/s}$ 的 3 点振动点目标成像结果。由成像对比结果可看出, OSS 算法有效的消除了振动产生的成对回波, 明确地判断出目标图像所含有的目标个数。

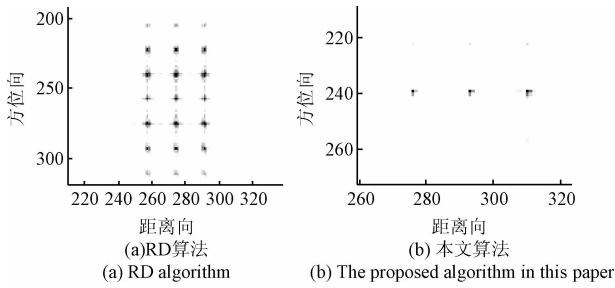


图6 三点 $A_v = 0.2 \text{ m}, \omega = 20\pi \text{ rad/s}$ 成像结果对比

Fig. 6 Imaging result comparison of three points with $A_v = 0.2 \text{ m}, \omega = 20\pi \text{ rad/s}$

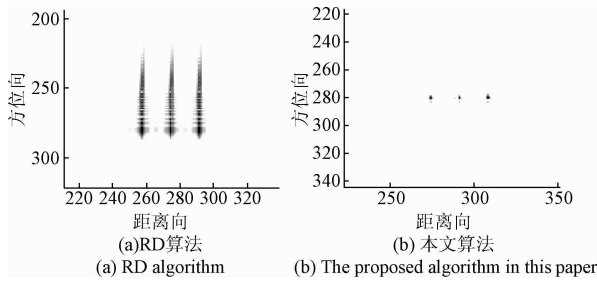


图7 三点 $A_v = 0.3 \text{ m}, \omega = \pi \text{ rad/s}$ 成像结果对比

Fig. 7 Imaging result comparison of three points with $A_v = 0.3 \text{ m}, \omega = \pi \text{ rad/s}$

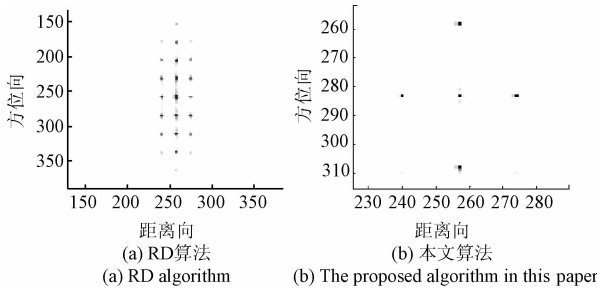


图8 五点 $A_v = 0.02 \text{ m}, \omega_1 = 30\pi \text{ rad/s}$ 成像结果对比图

Fig. 8 Imaging result comparison of five points with $A_v = 0.02 \text{ m}, \omega = 30\pi \text{ rad/s}$

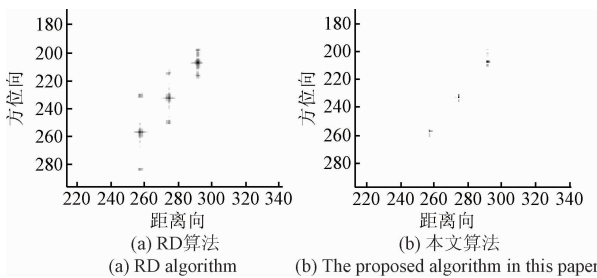


图9 三点 $A_v = 0.005 \text{ m}, \omega_1 = 30\pi \text{ rad/s}, \omega_2 = 20\pi \text{ rad/s},$

$\omega_3 = 10\pi \text{ rad/s}$ 成像结果对比

Fig. 9 Imaging result comparison of three points with $A_v = 0.005 \text{ m}, \omega_1 = 30\pi \text{ rad/s}, \omega_2 = 20\pi \text{ rad/s}, \omega_3 = 10\pi \text{ rad/s}$

图10所示为采用经典RD算法和OSS算法时单点振动目标方位向剖面图的对比结果。采用目标振动幅度和频率分别为 $A_v = 0.02 \text{ m}, \omega = 30\pi \text{ rad/s}$ 的点列式成像结果。由图10(a)可以看出,采用RD算法成像,振动点目标在方位向出现成对回波,主目标峰值甚至低于回波峰值,而图10(b)中,OSS算法有效地抑制了振动目标方位向产生的成对回波。相对于RD算法,OSS算法成像在SAR成像时,旁瓣抑制性能大幅度提高,成像更加精确。

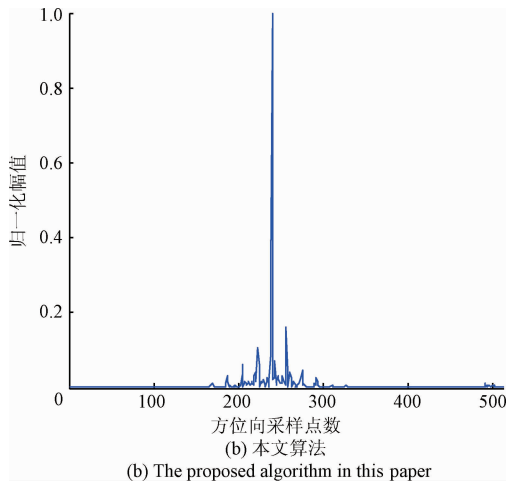
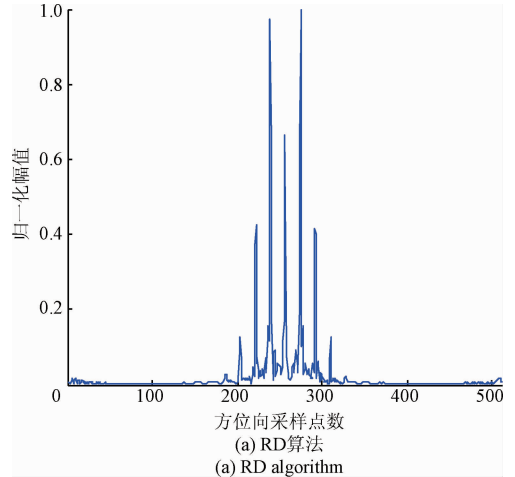


图10 单点振动目标成像方位向剖面图

Fig. 10 Azimuth profile diagram of single point vibrating target imaging

4.2 半实物仿真实验

目前,国外已有对SAR微动目标成像的初步研究并开展了部分试验,研究问题主要集中于微动目标的分离、时频分析和参数估计,国内研究才刚刚起步,受条件限制,暂时无法录取实际SAR微动目标数据^[17]。为进一步验证本文提出的方法,进行了面目标的半实物仿真实验。对于一个振动小船成像系统实验参数设置如表2所

示,目标振动幅度为 $A_v = 0.005$ m, 振动频率为 $\omega = 40\pi$ rad/s, 成像结果如图 11 所示, 由图 11 (b) 成像结果可看出该算法对目标同样具有良好的重聚焦效果。

表 2 面目标系统仿真参数

Table 2 Area target system simulation parameters

参数	数值
最小斜距/km	$R_0 = 40$
脉冲宽度/ μ s	$T_r = 40$
脉冲重复频率/Hz	$PRF = 100$
载机速度/($m \cdot s^{-1}$)	$v_r = 150$
发射信号带宽/MHz	$B_r = 100$
方位向天线孔径长度/m	$D = 4$

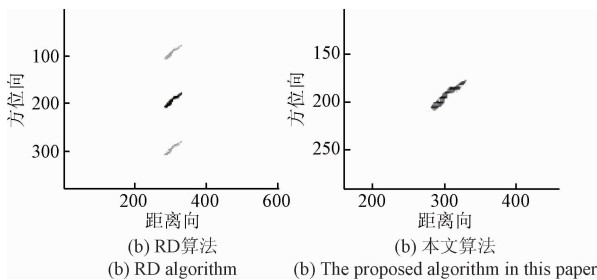


图 11 目标 $A_v = 0.005$ m, $\omega = 40\pi$ rad/s 成像结果对比

Fig. 11 Imaging result comparison of the target with $A_v = 0.005$ m, $\omega = 40\pi$ rad/s

通过以上仿真实验结果及分析可以看出, 本文提出的方法有效地消除了因目标振动而产生的成对回波, 实现了目标的高分辨重建, 仿真结果验证了本文算法的可行性。

5 结 论

本文根据相位恢复原理提出了一种新的基于过采样平滑算法的振动目标成像方法, 该方法可消除振动目标产生的成对回波, 得到高分辨率图像。本文利用振动目标的回波信号的二维频域幅度和支撑域信息作为 OSS 迭代算法的先验信息, 通过改变高斯滤波器的参数调节滤波器的宽度, 减少支撑域外部信息的干扰, 并尽可能减少支撑域的大小, 减少迭代过程所用时间, 提高算法的有效性和收敛性。利用相位恢复算法对振动目标进行成像, 可以有效地排除 SAR 成像场景中的虚假目标, 得到准确的目标数量, 为目标的检测识别提供依据。

参考文献

[1] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述[J].

仪器仪表学报, 2013, 34(8):1907-1915.

LI SH M, GUO H D, LI D R. Review of vibration signal processing methods [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8):1907-1915.

[2] SPARR T, KRANE B, et al. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. IEEE Proceedings of Radar Sonar Navigation, 2003, 150(4):277-283.

[3] RÜEGG M, MEMBER S, MEIER E, et al. Vibration and rotation in millimeter-wave SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(2):293-304.

[4] 张伟, 童创明, 张群, 等. 基于 DPCA 杂波抑制的地面振动目标微多普勒提取[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4):738-741.

ZHANG W, TONG CH M, ZHANG Q, et al. Micro-Doppler extraction of ground vibrating targets based on SAR/DPCA technique [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(4):738-741.

[5] 张远, 付锦斌, 麦超云, 等. SAR 振动目标成对回波聚焦的改进 Keystone 变换算法[J]. 信号处理, 2013, 29(11):1457-1462.

ZHANG Y, FU J B, MAI CH Y, et al. Improved keystone transform algorithm for paired echoes focusing of SAR vibrating targets[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(11):1457-1462.

[6] 陈稳, 张智军, 秦占师, 等. 基于子孔径 Hough 变换的 SAR 转动目标检测[J]. 电光与控制, 2014, 21(9):85-89.

CHEN W, ZHANG ZH J, QIN ZH SH, et al. Sub-Aperture hough transform based SAR rotational target detection [J]. Electronics Optic & Control, 2014, 21(9):85-89.

[7] 梁颖, 张群, 罗迎等. 一站固定式双基 FMCW SAR 地面振动目标检测与特征提取[J]. 雷达学报, 2015, 4(6):648-657.

LIANG Y, ZHANG Q, LUO Y, et al. Vibrating ground target detection and feature extraction of one-stationary bistatic frequency-modulated continuous-wave synthetic aperture radar [J]. Journal of Radars, 2015, 4(6):648-657.

[8] 史洪印, 赵欣悦. 基于 CS 的 SAR 旋转微动目标检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6):1342-1349.

SHI H Y, ZHAO X Y. Study on rotational micro-motion target detection based on compressive sensing for SAR system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6):1342-1349.

[9] 周辉, 赵风军, 禹卫东. SAR 运动目标微动信号模型及微多普勒效应研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11):

- 135-142.
- ZHOU H, ZHAO F J, YU W D. Study on the micro-motion signal model and micro-Doppler effect of SAR moving targets[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(11):135-142.
- [10] SHECHTMAN Y, BECK A, ELDAR Y C. GESPAR: efficient phase retrieval of sparse signals [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(4): 928-938.
- [11] SHECHTMAN Y, ELDAR Y C, COHEN O, et al. SEGEV. Phase retrieval with application to optical imaging: A contemporary overview [J]. *IEEE Signal Processing Mag*, 2015, 32(3): 87-109.
- [12] MIAO J, ISHIKAWA T, ROBINSON I K, et al. Beyond crystallography: Diffractive imaging using coherent x-ray light sources[J]. *Science*, 2015, 348(6234): 530-535.
- [13] GEREHBERG R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction phase picture[J]. *Optik*, 1972, 35(2):237-246.
- [14] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms: A comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15):2758-2769.
- [15] YANG G ZH, GU B Y, DONG B ZH. Theory of the amplitude-phase retrieval in an any linear transform system and its applications [J]. *Inverse Problems in Scattering and Imaging*, 1993, 457(12):3153-3224.
- [16] RODRIGUEZ J A, XU R, CHEN C C, et al. Oversampling

smoothness: An effective algorithm for phase retrieval of noisy diffraction intensities [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2013, 46(2):312-318.

- [17] 邓彬, 黎湘, 王宏强, 等. SAR 微动目标检测成像的理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2014:13-20.
- DENG B, LI X, WANG H Q, et al. Theories & methods for SAR micro-motion target detection and imaging[M]. Beijing: Science Press, 2014:13-20.

作者简介



史洪印,2009年于北京航空航天大学获得博士学位,现为燕山大学副教授,主要研究方向为SAR成像和运动目标检测。

E-mail: shihy@ysu.edu.cn

Shi Hongyin received his Ph. D. degree from Beihang University in 2009. Now, he is an associate professor in Yanshan University. His main research interest includes SAR imaging and moving target detection.



丁郁霏,2015年于燕山大学获得学士学位,现为燕山大学硕士生,主要研究方向为基于相位恢复算法的SAR成像。

E-mail: ding183552426@sina.com

Ding Yufei received her B. Sc. degree from Yanshan University in 2015. Now, she is a master student in Yanshan University. Her main research interest includes SAR imaging based on phase retrieval algorithm.