

短脉冲非相参雷达的逆合成孔径成像及其稀疏恢复成像技术

汪海波* 黄文华 巴涛 姜悦

(西北核技术研究所高功率微波技术重点实验室 西安 710024)

摘要: 短脉冲非相参雷达(NCSP)的辐射源输出微波脉冲持续时间短, 针对于高速运动目标而言, 其脉冲持续时间内的目标运动可忽略不计, 对回波信号不需进行专门的脉冲内运动补偿。为了利用短脉冲非相参雷达信号进行逆合成孔径雷达成像, 该文应用补偿相参处理的方法, 去除辐射信号包络时间不确定性和初始相位的不确定性影响, 在常规方法进行包络对齐和初相补偿后可利用距离-多普勒(RD)方法进行逆合成孔径雷达成像, 仿真验证了补偿后信号成像的可行性。然而, 短脉冲非相参雷达的载频随机抖动的因素会导致距离-多普勒成像结果在多普勒维度产生随机调制的旁瓣, 影响成像的质量。利用稀疏恢复技术, 在成像空间中对目标的散射中心进行稀疏重构, 利用正交匹配追踪(OMP)算法和稀疏贝叶斯学习(SBL)算法进行成像, 从而实现了抑制非相参因素引起的成像旁瓣, 改进了成像质量, 通过仿真验证了方法可行性。

关键词: 短脉冲非相参雷达; 逆合成孔径成像; 稀疏恢复

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)11-2646-08

DOI: [10.11999/JEIT180912](https://doi.org/10.11999/JEIT180912)

Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with Non-Coherent Short Pulse Radar and Its Sparse Recovery

WANG Haibo HUANG Wenhua BA Tao JIANG Yue

(*Science and Technology on High Power Microwave Laboratory,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

Abstract: The microwave source of Non-Coherent Short Pulse (NCSP) radar transmits short pulse. Thus, for high velocity targets, the motion effect in the pulse duration can be neglected, and the echo signal does not need special motion compensation. In order to use the NCSP radar signal for Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging, the compensation coherent processing method is applied to removing the uncertainty of the envelope time and the initial phase uncertainty. Assuming that the echo is envelope-aligned and initially compensated by conventional methods, ISAR radar imaging can be performed using the Range-Doppler (RD) method, subsequently. The simulation verifies the feasibility of the compensation signal ISAR imaging. However, the carrier-frequency random jitter factor of NCSP radar causes random-modulated sidelobes in the Doppler dimension, which affect imaging quality. In this paper, the sparse recovery technique is used to perform sparse reconstruction of the target scattering center in the imaging space. The Orthogonal Matching Pursuit (OMP) algorithm and the Sparse Bayesian Learning (SBL) algorithm are used as the recovery algorithm for imaging simulation experiments. The simulation results show that the sparse recovery technique can suppress the imaging sidelobes caused by non-coherence and improve the imaging quality.

Key words: Non-Coherent Short Pulse (NCSP) radar; Inverse Synthetic Aperture radar (ISAR); Sparse recovery

1 引言

相对论微波源技术日趋成熟, 工程实践日趋成熟, 该类型的微波功率源有重要的实用价值^[1-3]。其中, 使用该种类器件作为雷达功率源, 具有单脉

冲峰值功率高、脉冲宽度短等特点, 称为短脉冲非相参雷达(Non-Coherent Short Pulse Radar, NCSP Radar), 国内外已有相关雷达技术研究报道^[4,5]。由于功率源是自激振荡器, 其信号特征具体表现为: 起始相位随机性, 脉冲中心位置和载波频率都存在随机抖动。重频波形的相参性是信号处理的前提, 如相参积累、脉冲多普勒(Pulse Doppler, PD)、

收稿日期: 2018-09-21; 改回日期: 2019-01-12; 网络出版: 2019-05-20

*通信作者: 汪海波 wanghaibo@nint.ac.cn

动目标检测(Moving Target Indication, MTI)和雷达成像等处理技术都需要在波形的相参性基础上展开^[6,7]。

从微波源本身出发研究其相参性的工作取得了一定的进步,如采用注入锁定技术、相位牵引技术等^[8-11],但是该类方法的相参性改善所获得的改善效果有限,同时一定程度上影响器件的峰值功率指标。从信号处理角度对NCSP雷达进行补偿,系统工程实现简单。文献[12]提出利用参考信号进行补偿相参处理的系统架构,从理论上和仿真上验证补偿相参处理后可实现目标回波能量的有效积累。

逆合成孔径雷达(Inversed Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像是利用目标相对雷达的运动,构成合成的观测孔径,从而在多普勒维度上实现散射点的区分。结合距离维度的高分辨波形,构成了距离-多普勒的2维图像是进行目标识别的重要手段之一^[13]。使用线性调频波形、步进频率波形、相位编码波形等进行目标ISAR成像研究的报道已经很多^[13-15]。NCSP雷达通过补偿相参处理后,对辐射信号的包络延时不确定性和初始相位不确定性进行了补偿。在此基础上,进行ISAR成像存在可能,本文将讨论NCSP雷达进行ISAR成像相关问题。由于辐射信号脉冲宽度在几十ns乃至几ns范围,其回波信号本身即为高分辨距离像(High Resolution Range Profiles, HRRP)。对于高速运动目标而言,脉冲持续时间内目标的运动量完全可以忽略,不需要进行脉冲持续时间内的运动补偿,更适用于对高速运动目标成像。

进行ISAR成像之前,除了获取HRRP之后,还要进行包络对齐和相位补偿,这些与常规雷达的ISAR处理是类似的,可使用相邻HRRP包络相关和特显点或者多普勒中心等方法^[16]。然而,NCSP雷达的载频随机抖动的因素会导致距离-多普勒(Range Doppler, RD)成像结果在多普勒维度方向产生随机调制的旁瓣,影响成像的效果。压缩感知及其稀疏恢复技术,在ISAR成像中广泛被应用^[17-22],其基本的思想是充分利用成像空间的稀疏性,改善成像质量。本文利用稀疏恢复技术,在成像空间中对目标的散射中心进行重构,利用正交匹配追踪算法^[23-25](Orthogonal Matching Pursuit, OMP)和稀疏贝叶斯学习^[26-28](Sparse Bayesian Learning, SBL)算法进行了目标成像,实现了抑制非相参因引起的成像旁瓣,改进了成像效果。

2 短脉冲非相参雷达系统结构与信号特征

触发机制使得NCSP雷达产生每个重频脉冲的起始时间相对于驻留起始有一定的随机抖动。同

时,微波产生方式为自激振荡,决定了每一个微波脉冲的载波频率是随机的,起振相位也是随机的。

与其它雷达系统有所区别,该雷达设计一个接收通道,接收微波源产生的微波脉冲信号,该通道称为参考信号接收通道。该通道与回波接收通道都设计在雷达接收机内,使用同一个本地稳定频率源进行下变频,如图1所示。参考信号和雷达回波信号使用同一个本地稳定频率源(STable Local Oscillator, STALO)进行正交下变频。雷达的慢时间基准表示为

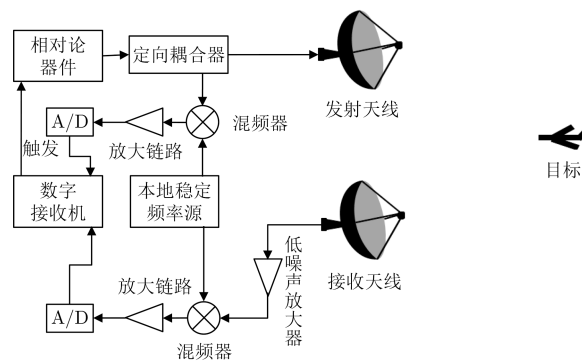


图1 短脉冲非相参雷达系统结构

$$t_m = mT, m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

其中, M 是相参处理的脉冲个数, m 表示脉冲序号。雷达工作时按照慢时间基准向微波源输出触发信号,微波源产生的波形可使用式(2)的模型进行表述

$$s(\tau, m) = g(\tau - \tau_{dm}) \exp(2\pi j f_m \tau) \exp(j \varphi_m) \quad (2)$$

其中, τ 表示快时间,它的起始时间为 t_m 。 $g(\tau)$ 是中心在 $\tau = 0$ 位置的实包络信号,有一定的脉冲宽度。 f_m 表示第 m 个脉冲载波频率, φ_m 表示第 m 个脉冲的参考相位。由于微波源的非相参性,每次脉冲的出波时刻和载波频率都存在一定抖动,其中, τ_{dm} 表示第 m 个脉冲的出波时间抖动,工程上认为 $\tau_{dm} \sim N(0, \sigma_d)$, 而 σ_d 在 μs 以内。载波频率的抖动可描述为

$$f_m = f_c + f_{dm} \quad (3)$$

f_c 是微波源设计标称的中心频率, f_{dm} 是随机频率抖动项。认为 $f_{dm} \sim N(0, \sigma_f)$, 而 σ_f 在20 MHz量级。 φ_m 是随机相位项,可认为在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布。该雷达之所以为非相参的,有以下3个重要的因素:包络的延时抖动项、相对于本振的起始相位和振荡相对于本振的频率偏移。

3 补偿相参处理及短脉冲的优势

使用参考信号作为匹配滤波器的系数,可补偿

发射信号的包络延时抖动和初相不确定性^[12]。假设在距离 r 位置有一个点目标, 其回波可以表示为

$$\begin{aligned} x(\tau, m) &= A s \left(\tau - \frac{2r}{c}, m \right) \\ &= A g \left(\tau - \frac{2r}{c} - \tau_{dm} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(2\pi j (f_c + f_{dm}) \left(\tau - \frac{2r}{c} \right) \right) \exp(j\varphi_m) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, A 表示回波信号的幅度, c 为光速。本地相参振荡信号表示为

$$\text{OS}(\tau, m) = \exp(2\pi j f_{LO} \tau) \exp(j\phi_m) \quad (5)$$

本地振荡器频率与微波功率源设计的中心频率是一致的, 即为 $f_{LO} = f_c$ 。对参考信号进行正交下变频

$$\begin{aligned} s_2(\tau, m) &= s(\tau, m) \times (\text{OS}(\tau, m))^* \\ &= g(\tau - \tau_{dm}) \exp(2\pi j f_{dm} \tau) \\ &\quad \cdot \exp(j\varphi_2(m)) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $(\cdot)^*$ 为取共轭算子, $\varphi_2(m) = \varphi_m - \phi_m$ 为下变频后信号的初始相位。对回波信号进行正交下变频

$$\begin{aligned} x_2(\tau, m) &= x(\tau, m) \times (\text{OS}(\tau, m))^* \\ &= A g \left(\tau - \frac{2r}{c} - \tau_{dm} \right) \exp(2\pi j f_{dm} \tau) \\ &\quad \cdot \exp \left(-4\pi j (f_c + f_{dm}) \frac{r}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp(j\varphi_2(m)) \end{aligned} \quad (7)$$

利用式(6)构造匹配滤波器, 并对式(7)进行匹配滤波

$$\begin{aligned} y(\tau, m) &= x_2(\tau, m) * (s_2(-\tau, m))^* \\ &= A \cdot \text{PSF} \left(\tau - \frac{2r}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(2\pi j f_{dm} \left(\tau - \frac{2r}{c} \right) \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-4\pi j f_c \frac{r}{c} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, “*”表示卷积算子。

$$\text{PSF}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \cdot g(\tau - t) d\tau \quad (9)$$

表示包络信号的自相关函数。从式(8)可以看出, 发射信号的包络延时抖动项和初相不确定性可获得补偿, 但是载波中心频率偏移是无法通过匹配滤波进行补偿。

由于辐射信号脉冲宽度在几十ns乃至几ns范围, 对于高速运动目标而言, 脉冲持续时间内目标的运动量完全可以忽略, 不需要进行脉冲持续时间内的运动补偿。例如, 对于X波段的NCSP雷达, 设定一个相对于雷达径向10倍音速的目标, 在10 ns内运动距离为34 μm , 远小于波长, 因此“停跳假设”(stop-go)模型完全可适用。

以下针对高速运动目标, 将短脉冲信号、线性调频信号和相位编码信号的匹配滤波结果进行对比。假设目标位置在75 km处, 以目标与相对雷达径向运动速度为2000 m/s, NCSP雷达脉冲宽度为10 ns; 线性调频信号带宽100 MHz、脉冲宽度20 μs ^[29]; 相位编码信号采用M序列伪随机相位调制^[29], 脉冲宽度20 μs , 码长度2000, 3种信号的中心频率都为10 GHz, 3种信号的距离分辨率是相当的。图2表示3种信号对静止目标和高速运动目标两种情况的回波波形。图2(a)是短脉冲回波波形, 可以看出高速运动目标回波与静止目标回波几乎相同; 图2(b)是线性调频波形回波波形, 虽然从幅度上没有看出高速运动目标和静止目标回波有较大区别, 但是目标的位置产生的较为严重的距离走动, 这是线性调频波形距离和多普勒耦合特性引起的; 图2(c)的相位编码波形, 可以看出目标运动使得目标回波不能有效积累, 匹配滤波输出幅度很少。

4 逆合成孔径雷达成像

4.1 成像模型

虽然NCSP雷达的发射与接收天线位置接近,

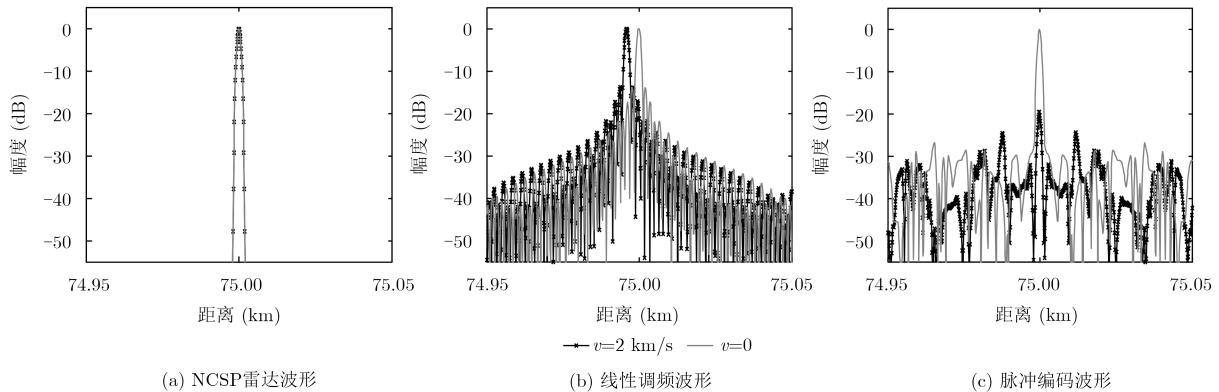


图2 3种信号对运动目标回波的对比

因此采用2个天线相位中心的中间作为雷达成像发射与接收的相位中心。假定雷达回波通过常规方法进行包络对齐和初相补偿^[16]，补偿之后可将成像问题等效为转台模型。雷达的成像几何模型如图3所示，其中， xoy 为目标坐标系，目标旋转中心 o 转动角度 θ_s 。雷达相位中心到旋转中心的距离为 R_0 。目标的散射中心个数为 N ，令 (x_n, y_n) 为散射中心的位置。雷达在成像场景中收到的散射点总的回波信号为

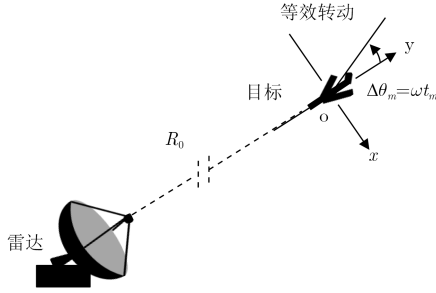


图3 成像几何模型

$$y_A(\tau, m) = \sum_{n=1}^N A_n \text{PSF} \left(\tau - \frac{2R_n(m)}{c} \right) \cdot \exp \left(2\pi j f_{dm} \left(\tau - \frac{2R_n(m)}{c} \right) \right) \cdot \exp \left(-4\pi j f_c \frac{R_n(m)}{c} \right) \quad (10)$$

而第 n 个点的距离，可以由式(11)给出

$$R_n(m) = R_0 + y_n \cos(\Delta\theta(t_m)) + x_n \sin(\Delta\theta(t_m)) \quad (11)$$

目标相对于雷达近似匀速转动，且在 $T \gg \tau_{dm}$ 情况下，转动角度为 $\Delta\theta(t_m) = \omega t_m$ ，当 $\Delta\theta(t_m)$ 角度较小

$$y_A(\tau, m) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \text{PSF} \left(\tau - \frac{2(R_0 + y_n + x_n \omega t_m)}{c} \right) \cdot \exp \left(2\pi j f_{dm} \left(\tau - \frac{2(R_0 + y_n + x_n \omega t_m)}{c} \right) \right) \approx \sum_{n=1}^N A_n \cdot \text{PSF} \left(\tau - \frac{2(R_0 + y_n)}{c} \right) \cdot \exp \left(2\pi j f_{dm} \left(\tau - \frac{2(R_0 + y_n + x_n \omega t_m)}{c} \right) \right) \cdot \exp \left(-4\pi j f_c \frac{(R_0 + y_n)}{c} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda_c} x_n \omega t_m \right) \quad (12)$$

式(12)中 $\text{PSF}(\cdot)$ 表现距离方向能量聚集在 y_n 的位置，而 $\exp(-j2\pi x_n \omega t_m / \lambda_c)$ 表示多普勒调制，在慢

时间维度上，进行FFT可使得回波能量聚集到 x_n 的位置。 $\exp(-4\pi j f_c (R_0 + y_n)/c)$ 与成像无关的常数相位项， $\exp(2\pi j f_{dm} (\tau - 2(R_0 + y_n + x_n \omega t_m)/c))$ 是由于辐射信号频率不稳定项会对成像会产生的影响。

4.2 仿真结果

设定目标的散射点在2维空间中的分布如图4所示，各散射点的回波强度设定相同，雷达的中心频率为10 GHz，积累脉冲个数为128，辐射脉冲信号宽度为10 ns，设定单点目标回波信噪比为30 dB。目标相对雷达成像相位中心转动角度为 1° 。设定频率抖动标准差 σ_f 为0, 20 MHz和50 MHz3种情况下，使用RD方法进行成像。距离维度的分辨率取决于单次脉冲的频谱宽度，为1.5 m。方位维度的分辨率取决于积累角度和波长，为0.86 m。

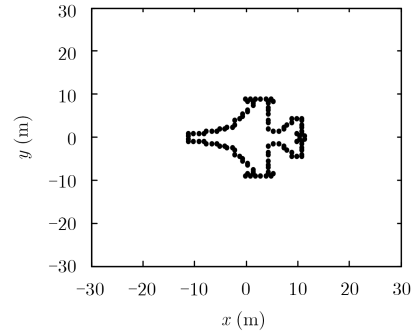


图4 点目标模型的设定

图5是仿真中设定的 f_{dm} 序列，其中，图5(a)是 σ_f 为20 MHz情形下的 f_{dm} 序列；图5(b)是 σ_f 为50 MHz情形下的 f_{dm} 序列。图6(a)是无频率抖动的成像结果，图6(b)是 σ_f 为20 MHz情况下RD成像结果，图6(c)是 σ_f 为50 MHz情况下RD成像结果。可看出：无频率抖动情况下，有较好的成像结果；然而，当辐射信号频率有抖动因素，会在方位维度产生旁瓣，对成像结果产生污染。由于频率抖动，在一定程度上有频率合成的效果，因此在距离维度上有微弱的成像分辨率增强效果。

5 稀疏恢复成像

5.1 稀疏恢复成像方法

从上述仿真分析结果可看出，直接使用RD方法可以进行ISAR成像，但是会在成像的方位维度的污染。其原因在于辐射频率的不稳定，在方位维度上做傅里叶变换时不能完全实现该维度上的能量聚焦，从而产生了能量的泄露。为了实现更好的成像效果，需考虑其他成像方法。根据GTD理论^[30,31]，高频段电磁散射可认为是某些局部位置的散射点产生散射回波。因此在成像域中目标散射点是稀疏

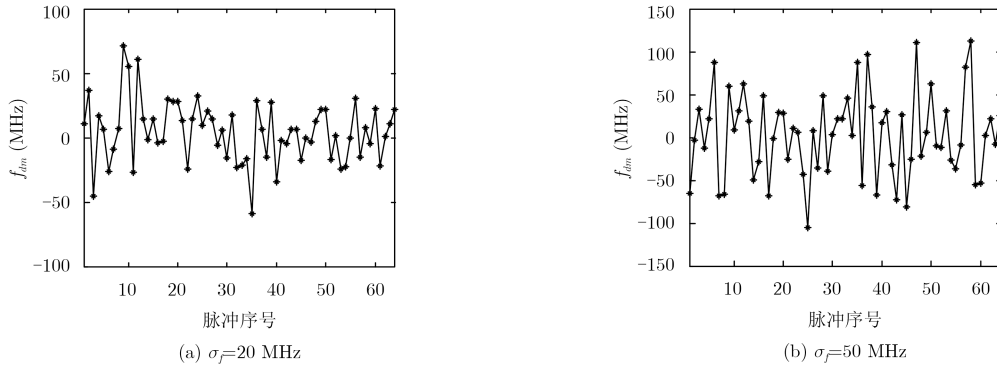


图5 频率抖动示意

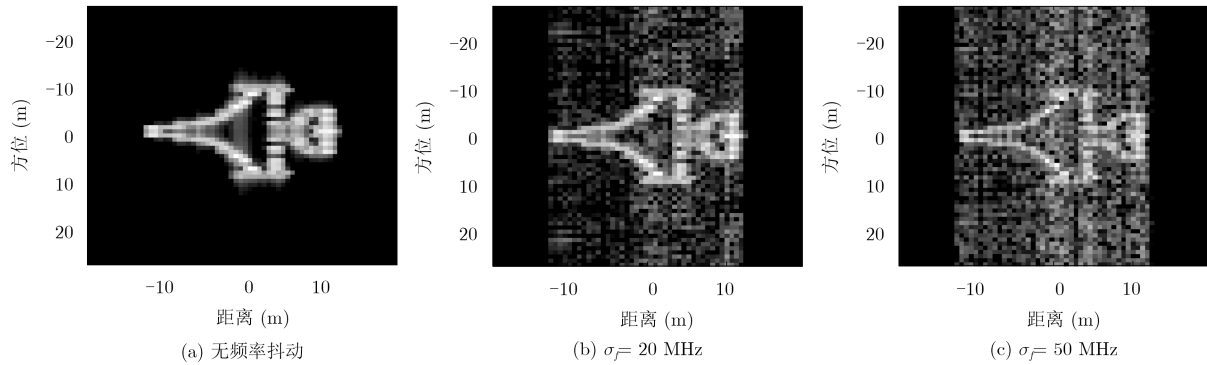


图6 RD成像结果

的, 这些散射点幅度对雷达中心频率的依赖性不强, 利用该性质可以改善成像效果。

设矩阵 $\mathbf{S}$ 是经过距离校准和初相校准之后的回波数据, 其维度是 $M \times N$, 其中 M 是一个成像 CPI 中的相参处理脉冲个数, N 是距离所采样的数据个数。令 $\mathbf{I}$ 是目标成像区域的 2 维离散划分的矩阵, 其维度是 $K \times L$, $\mathbf{I}$ 需通过稀疏恢复技术重构的成像结果。将回波矩阵 $\mathbf{S}$ 和成像矩阵 $\mathbf{I}$ 矢量化

$$\mathbf{y}_{MN \times 1} = \text{vec}(\mathbf{S}_{M \times N}), \mathbf{x}_{KL \times 1} = \text{vec}(\mathbf{I}_{K \times L}) \quad (13)$$

其中, $\text{vec}(\cdot)$ 表示对矩阵的向量化。类似于文献[24,28], ISAR 成像的稀疏表示

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (14)$$

其中, Φ 为根据雷达成像模型设定的过完备的字典矩阵, 表示特定位置点目标在整个 CPI 中回波数据矢量。

在稀疏表示理论中[32], 为使在变换域上用尽量少的原子来准确地表示原始信号, 可以用式(15)表示

$$\min \|\mathbf{x}\|_0, \text{ s.t. } \|\mathbf{y} - \Phi \mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon \quad (15)$$

其中, $\|\cdot\|_0$ 表示为向量的 l_0 范数, ε 为误差容限。式(15)的意义是误差容限约束条件内, 寻找非零元素最少的 $\mathbf{x}$, 表示的物理意义是成像场景中只有少数的强散射点。实际上, 式(15)是组合优化问题, 是一类 NP 困难问题[30]。在稀疏重构技术, 常使用 l_1 范数代替 l_0 范数, 将组合优化问题转换为凸优化问题

$$\min \|\mathbf{x}\|_1, \text{ s.t. } \|\mathbf{y} - \Phi \mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon \quad (16)$$

本文拟采用两种典型的方法求解式(16), 一种是贪婪算法中的典型代表: OMP 算法[23,24], 其演化版本在逆合成孔径雷达成像问题中都被使用过[25]。OMP 算法是对所选择字典空间进行施密特正交化处理, 选择更少的基向量即可以表示原始信号, 因此 OMP 比普通的匹配追踪方法收敛速度快。另一种是贝叶斯方法的典型代表: SBL 算法[26-28], 其基本思路是赋予 $\mathbf{x}$ 一个先验的高斯分布: $\mathbf{x} \sim \text{CN}(0, \boldsymbol{\alpha})$, 其中, $\boldsymbol{\alpha}$ 是协方差矩阵, 认为其为一个对角矩阵

$$\boldsymbol{\alpha} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{KL}) \quad (17)$$

假定 α_i 服从的是一个概率衰减的分布, 例如指数分布或者拉普拉斯分布。事实上, 如果 $|\alpha_i| \rightarrow 0$, 则 $|x_i| \rightarrow 0$, 这正是贝叶斯框架体现先验稀疏的前提假设的途径。在贝叶斯框架下, 是通过公式推导给出 $\mathbf{x}$ 最大后验概率估计结果(Maximum A Posteriori Probability, MAP), 可使用的算法有稀疏贝叶斯学习(Sparse Bayesian Learning, SBL)对 $\mathbf{x}$ 进行恢复。其中有一种快速稀疏贝叶斯学习方法[27], 通过对边界后验概率函数最大化推导出的迭代算法。迭代过程就是被选中的基向量集合及其权重的演化过程, 在迭代过程中, 根据边界后验概率函数决定每个基向量是否被选择到集合中同时计算其权重, 或

者被剔除到集合外，或者更新其权值。该算法能够在计算效率上获得较大提升。

5.2 仿真分析

成像目标和雷达参数与4.2节一致，采用OMP算法和SBL算法，算法程序分别根据文献[23]和文献[27]

编写，对式(14)进行稀疏恢复成像。图7为稀疏恢复成像结果。可以看出不论是通过OMP，还是SBL算法都可以获得比RD算法更好的成像结果。不仅仅可以抑制RD方法中由于辐射源频率抖动产生的成像旁瓣，同时可以获得一定距离和多普勒超分辨成像的效果。

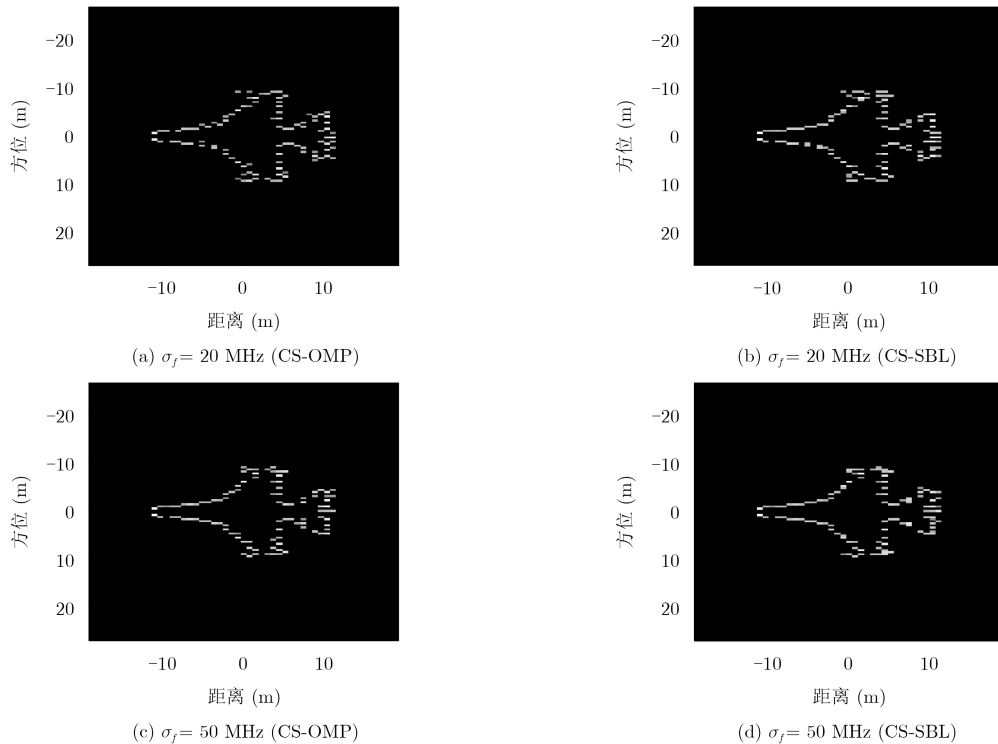


图7 稀疏恢复成像结果

6 结论

本文对补偿相参处理过程进行了理论推导，结果表明：补偿相参处理可以抵消辐射信号包络时间不确定性和初始相位的不确定性影响，从而使得利用RD方法对短脉冲非相参雷达信号进行ISAR成像成为可能，对频率抖动方差为20 MHz和50 MHz情况的RD成像进行了仿真验证。从成像结果表明，RD方法可进行成像，但是由于NCSP雷达辐射信号非相参性，在多普勒维度上，产生了随机调制的旁瓣，影响成像的质量。为了解决该问题，本文使用了压缩感知的稀疏恢复技术，在成像空间中对目标的散射中心进行稀疏重构，利用OMP算法和SBL算法进行了稀疏恢复，从而实现了抑制非相参因引起的成像旁瓣，改进了成像质量，通过仿真验证了方法可行性。

参考文献

- [1] 胡银福, 冯进军. 用于雷达的新型真空电子器件[J]. 雷达学报, 2016, 5(4): 350-360. doi: 10.12000/JR16078.
HU Yinfu and FENG Jinjun. New vacuum electronic

- devices for radar[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(4): 350-360. doi: 10.12000/JR16078.
- [2] 钱宝良. 国外高功率微波技术的研究现状与发展趋势[J]. 真空电子技术, 2015(2): 1-74. doi: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2015.02.001.
QIAN Baoliang. The research status and developing tendency of high power microwave technology in foreign countries[J]. *Vacuum Electronics*, 2015(2): 1-74. doi: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2015.02.001.
- [3] XIAO Renzhen, ZHANG Zhiqiang, LIANG Tiezhu, *et al.* A relativistic backward wave oscillator for directly generating circularly polarized TE₁₁ mode[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(3): 033118. doi: 10.1063/1.4944915.
- [4] BLYAKHMAN A, CLUNIE D, HARRIS R, *et al.* Nanosecond gigawatt radar: Indication of small targets moving among heavy clutters[C]. 2007 IEEE Radar Conference, Boston, USA, 2007: 61-64. doi: 10.1109/RADAR.2007.374191.
- [5] BLYAKHMAN A, CLUNIE D, MESIATS G, *et al.* Analysis of Nanosecond Gigawatt Radar[M]. Hirshfield J L and Petelin M L. Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission. Netherlands: Springer, 2005: 283-296. doi:

- 10.1007/1-4020-3638-8_21.
- [6] AUBRY A, DE MAIO A, CAROTENUTO V, *et al.* Radar phase noise modeling and effects-Part I: MTI filters[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(2): 698–711. doi: 10.1109/TAES.2015.140549.
 - [7] AUBRY A, CAROTENUTO V, DE MAIO A, *et al.* Radar phase noise modeling and effects-Part II: doppler processors and sidelobe blankers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(2): 712–725. doi: 10.1109/TAES.2015.140723.
 - [8] RYSKIN N M, TITOV V N, and UMANTSIVA O V. Phase locking and mode switching in a backward-wave oscillator with reflections[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(8): 1270–1275. doi: 10.1109/TPS.2016.2517002.
 - [9] SONG Wei, SUN Jun, SHAO Hao, *et al.* Inducing phase locking of multiple oscillators beyond the Adler's condition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(2): 023302. doi: 10.1063/1.3671537.
 - [10] SONG Wei, ZHANG Xiaowei, CHEN Changhua, *et al.* Enhancing frequency-tuning ability of an improved relativistic backward-wave oscillator[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(1): 494–497. doi: 10.1109/TED.2012.2230400.
 - [11] XIAO Renzhen, SONG Zhimin, DENG Yuqun, *et al.* Mechanism of phase control in a klystron-like relativistic backward wave oscillator by an input signal[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(9): 093108. doi: 10.1063/1.4895598.
 - [12] 汪海波, 黄文华, 姜悦. 短脉冲非相参雷达的补偿相参处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(8): 1823–1828. doi: 10.11999/JEIT171147.
 - WANG Haibo, HUANG Wenhua, and JIANG Yue. Compensative coherent processing algorithm for short pulse non-coherent radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1823–1828. doi: 10.11999/JEIT171147.
 - [13] PRICKETT M J. Principles of inverse synthetic aperture radar (ISAR)[J]. *IEEE EASCON Record*, 1980, 14(6): 340–345.
 - [14] ZHANG Lei, QIAO Zhijun, XING Mengdao, *et al.* High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4630–4651. doi: 10.1109/TGRS.2011.2151865.
 - [15] Khardikov V V and Prosvirnin S L. The Algorithm for ISAR imaging of fast moving target using radar with binary phase-coded waveforms[C]. The 5th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Kyiv, Ukraine, 2005: 339–342. doi: 10.1109/ICATT.2005.1496974.
 - [16] 白雪茹. 空天目标逆合成孔径雷达成像新方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2011.
 - BAI Xueru. Study on new techniques for ISAR imaging of aerospace targets[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2011.
 - [17] RAO Wei, LI Gang, and WANG Xiqin. Parametric sparse representation method for ISAR imaging of rotating targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 910–919. doi: 10.1109/TAES.2014.120535.
 - [18] 吴敏, 邢孟道, 张磊. 基于压缩感知的二维联合超分辨ISAR成像算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(1): 187–193. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01597.
 - WU Min, XING Mengdao, and ZHANG Lei. Two dimensional joint super-resolution ISAR imaging algorithm based on compressive sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(1): 187–193. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01597.
 - [19] ZHANG Lei, QIAO Zhijun, XING Mengdao, *et al.* High-resolution ISAR imaging by exploiting sparse apertures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 997–1008. doi: 10.1109/TAP.2011.2173130.
 - [20] 李少东, 杨军, 陈文峰, 等. 基于压缩感知理论的雷达成像技术与应用研究进展[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 495–508. doi: 10.11999/JEIT150874.
 - LI Shaodong, YANG Jun, CHEN Wenfeng, *et al.* Overview of radar imaging technique and application based on compressive sensing theory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 495–508. doi: 10.11999/JEIT150874.
 - [21] HE Xingyu, TONG Ningning, HU Xiaowei, *et al.* High-resolution ISAR imaging based on two-dimensional group sparse recovery[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(1): 82–86. doi: 10.1049/iet-rsn.2017.0161.
 - [22] LIU Zhen, CHEN Xin, and SUI Jinping. High resolution wideband imaging of fast rotating targets based on random PRI radar[J]. *Progress in Electromagnetic Research M*, 2018, 63: 59–70. doi: 10.2528/PIERM17081005.
 - [23] TROPP J A and GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655–4666. doi: 10.1109/TIT.2007.909108.
 - [24] 吕明久, 李少东, 杨军, 等. 基于随机调频步进信号的高分辨ISAR成像方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3129–3136. doi: 10.11999/JEIT160177.
 - LÜ Mingjiu, LI Shaodong, YANG Jun, *et al.* High resolution ISAR imaging method based on random chirp frequency-stepped signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3129–3136. doi: 10.11999/JEIT160177.
 - [25] LIU Hongchao, JIU Bo, LIU Hongwei, *et al.* Superresolution ISAR imaging based on sparse Bayesian learning[J]. *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 5005–5013. doi: 10.1109/TGRS.2013.2286402.
- [26] JI Shihao, XUE Ya, and CARIN L. Bayesian compressive sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 2346–2356. doi: 10.1109/TSP.2007.914345.
- [27] BABACAN S D, MOLINA R, and KATSAGGELOS A K. Fast Bayesian compressive sensing using Laplace priors[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Taipei, China, 2009: 2873–2876. doi: 10.1109/ICASSP.2009.4960223.
- [28] 苏伍各, 王宏强, 邓彬, 等. 基于稀疏贝叶斯方法的脉间捷变频 ISAR 成像技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(1): 1–8. doi: 10.11999/JEIT140315.
- SU Wuge, WANG Hongqiang, DENG Bin, *et al.* The interpulse frequency agility ISAR imaging technology based on sparse Bayesian method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 1–8. doi: 10.11999/JEIT140315.
- [29] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 51–80.
- WU Shunjun and MEI Xiaochun. *Radar Signal Processing and Information Processing Technology*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 51–80.
- [30] POTTER L C, CHIANG Daming, CARRIERE R, *et al.* A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(10): 1058–1067. doi: 10.1109/8.467641.
- [31] O'DONNELL A N, WILSON J L, KOLTENUK D M, *et al.* Compressed sensing for radar signature analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(4): 2631–2639. doi: 10.1109/TAES.2013.6621841.
- [32] 李峰, 郭毅. 压缩感知浅析[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 45–79.
- LI Feng and GUO Yi. *Introduce to Compress Sensing*[M]. Beijing: Science Press, 2015: 45–79.
- 汪海波: 男, 1987年生, 工程师, 研究方向为高功率微波技术和雷达信号处理.
- 黄文华: 男, 1968年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高功率微波技术.
- 姜悦: 女, 1989年生, 工程师, 研究方向为高功率微波技术、特征提取与目标识别.