

一种基于改进压缩感知的低信噪比 ISAR 高分辨成像方法

张 龙^{①②} 张 磊^① 邢孟道^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

^②(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘 要: 针对低信噪比下基于压缩感知(CS)的 ISAR 成像方法性能下降甚至失效的问题, 该文提出了一种改进 CS 的成像方法, 即用能量门限分离含目标的距离单元和噪声单元, 同时在方位向上用相干投影来提高观测数据的信噪比, 利用迭代加权的 l_1 -范数优化以增强真实散射点能量并且压制噪声。改进 CS 算法适用于强噪声的环境下的 ISAR 成像, 并可利用很少脉冲数获得高分辨的目标像。实测数据处理验证了该方法可以有效克服强噪声与杂波。同时, 仅用 16 个回波脉冲就可得到高分辨 ISAR 图像, 验证了该方法在非常有限脉冲条件下的稳健性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 雷达成像; 压缩感知(CS); 有限脉冲; 超分辨

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2263-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01256

A New Method of High Resolution ISAR Imaging under Low SNR Based on Improved Compressive Sensing

Zhang Long^{①②} Zhang Lei^① Xing Meng-dao^①

^①(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In consideration of the the issue of the weakness performance of Compressive Sensing (CS) ISAR imaging under low SNR condition, an improved CS method is proposed in this paper. Energy based threshold is proposed to identify range cells containing only noise, a coherent projection in cross-range to improve the SNR of measurements then a iterative re-weighting l_1 norm optimization is applied to enhance the signal recovery while reject noise. Moreover, an advantage of this robustness is the ability to produce a high quality image and is suitable for ISAR imaging by using very limited echoes under strong noise and clutter. Experimental result of real data processing verifies the proposed method's capability of depressing noise or clutter and extracting strong scatterers to construct high resolution image. In the experiment, high quality image can be generated by using only 16 pulses and its robustness is confirmed too.

Key words: ISAR; Radar imaging; Compressive Sensing (CS); Limited pulses; Super resolution

1 引言

由于远距离, 全天候等特点, 高分辨雷达成像技术在目标识别、航空管制等军事与民用中有着广泛的应用^[1]。在逆合成孔径雷达(ISAR)成像中, 通过发射大带宽信号获得高分辨距离像, 方位的高分辨可以通过雷达观测目标在长相干积累时间内的转角而获得。但实际中, 由于目标的非合作性和其机动性, 给方位向成像处理带来了困难。为此, 国内外学者提出了基于参数化的谱估计方法以增强成像

分辨率, 如 RELAX、迭代最小均方误差法(MMSE)等等^[2]。此外, 基于线性预测模型的谱外推方法也在超分辨 ISAR 成像得到很好的应用^[3]。从谱外推的角度来讲, 超分辨成像可以视为由较低自由度的测量值恢复一个高维信号的过程, 存在数学上的非确定性。压缩感知(CS)理论证明了可通过解一个 l_1 -范数的凸优化问题从非常有限个测量值精确恢复可稀疏表征信号。

基于 CS 的 ISAR 框架如下^[4]: 首先构建一冗余时频字典, 然后利用有限次脉冲求解一个均方约束的 l_1 -范数的优化问题实现对强散射中心的复幅度和散射点的位置的精确估计^[5]。在高信噪比下, 基于 CS 的 ISAR 成像方法利用非常少量数据即可实现高分辨 ISAR 成像。但在强噪声背景下, 基于 l_1 -范数

2009-09-22 收到, 2010-04-16 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072), 陕西省自然科学基金基础研究基金(2009JQ8022)陕西省教育厅自然科学基金专项基金(09JK468)和西安工程大学校基础项目(09XG06)资助课题

通信作者: 张龙 zhanglong@mail.xidian.edu.cn

的最小化估计算子波动严重, 重构的 ISAR 像伴有大量虚假点, 这将淹没目标真实强散射点, 为改善 CS 算法在低信噪比下的性能, 本文提出一种改进 CS 算法, 即用能量门限来分离含噪声的距离单元与目标单元以实现噪声能量的有效估计, 同时在方位向上用相干投影来提高观测数据的信噪比, 用迭代加权的 1-范数优化增强真实散射点能量并且压制噪声。通过改进 CS 方法, ISAR 图像更加密集, 并且只需非常有限脉冲数就可以获得高质量目标像。通过实测数据的处理结果的对比与分析, 验证本文所提出改进 CS 成像算法的有效性。

2 ISAR 信号模型及压缩基本原理

2.1 信号模型及成像原理

假设将目标的平动运动成分完全补偿, 目标变为绕自身重心的转动模型, 如图 1 所示^[6]。在相干积累时间内, 转过的角度为 $\theta(t)$, $0 \leq t \leq T_a$, T_a 为观测时间。目标上散射点 $P(x, y)$ 到雷达的瞬时距离为

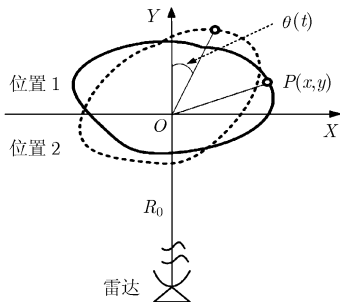


图 1 ISAR 成像模型

$$R(t) = R_0 + y \cos \Delta\theta(t) + x \sin \Delta\theta(t) \quad (1)$$

其转角的泰勒展开式为

$$\Delta\theta(t) = \theta(t) - \theta_0 \approx \omega t + \frac{1}{2} \alpha t^2 + o(t^2) \quad (2)$$

其中 ω 和 α 分别为角速度与角加速度。假设雷达发射线性调频信号为

$$s(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\hat{t}}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2} \gamma \hat{t}^2\right)\right] \quad (3)$$

其中 $\hat{t} = t \bmod(\Delta t)$, 表示快时间, t 为慢时间, Δt 为脉冲重复周期, f_c 为载频, γ 为调频率; T_p 为脉冲宽度, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。从而散射点 $P(x, y)$ 的复回波包络为

$$s(\hat{t}, t) = A \cdot \text{rect}\left[\frac{\hat{t}}{T_p}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{T_a}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi\left[\left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c}\right) + \frac{1}{2} \gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (4)$$

其中 c 为光速, A 后向散射幅度。考虑在相干积累时间内较短, 即散射点可以认为是静止的, 则经过距离向匹配滤波后, 式(4)可写为

$$s(\hat{t}, t) = A \text{rect}\left[\frac{\hat{t}}{T_a}\right] \cdot \text{sinc}\left[T_p \left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j4\pi \frac{R(t)}{\lambda}\right] \quad (5)$$

其中 λ 为波长。观察式(5), 慢时间与快时间的耦合产生的越距离走动现象可通过文献[6]的算法进行校正, 其散射点的多普勒为慢时间的函数, 是方位高分辨的主要来源。将式(1)与式(2)代入式(5)可得

$$s(\hat{t}, t) = A \text{sinc}\left[T_p \gamma \left(\hat{t} - \frac{2(R_0 + y)}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j4\pi \frac{(R_0 + y)}{\lambda}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{T_a}\right] \cdot \exp\left[-j2\pi \left(f \cdot t + \frac{1}{2} \beta \cdot t^2\right)\right] \quad (6)$$

其中 $f = 2x\omega/\lambda$, $\beta = 2x\alpha/\lambda$ 分别表示多普勒与多普勒的变化率。对于短相干积累时间, 相位中的第 2 项可以略去不计。假定某一距离单元包括 K 个散射点, 则位于位置为 $\tau = 2(R_0 + y)/c$ 处的信号为

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{T_a}\right] \cdot \exp(-j2\pi f_k \cdot t) \quad (7)$$

沿方位向做傅里叶变换得

$$s(f_d) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \text{sinc}[T_a(f_d - f_k)] \quad (8)$$

由式(8)知方位向分辨率与相干积累时间 T_a 成正比。考虑到非常有限次脉冲回波对应相干积累时间很短, 其高次相位项与散射特性的变化是可以忽略的。

2.2 基于压缩感知(CS)的 ISAR 成像

回顾一下压缩感知的背景知识, 假设复信号 $s \in \mathbf{C}^N$, 基空间为 $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$, 即 $s = \Phi \theta$, θ 为对应的系数矢量, 构造维数为 M 的测量矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{M \times N}$ ($M < N$), 信号 y 的表达形式为 $y = \mathbf{A} s$, 字典 $\Psi = \mathbf{A} \Phi$ 满足 RIP (Restricted Isometry Property) 条件。如果 $M \geq O(K \cdot \lg N)$, 则 K 个最大的系数可通过解一个凸优化问题以压倒性概率获得, 即

$$\min(\|\theta'\|_1), \text{ s.t. } \Psi \theta' = y \quad (9)$$

其中 $\|\cdot\|_p$ 表示 p -范数, θ' 表示矢量估计值。

考虑到噪声和背景杂波, 将由式(7)改写为

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \text{rect}\left[\frac{t}{T_a}\right] \cdot \exp(-j2\pi f_k t) + n \quad (10)$$

其中 K 定义为强散射点的数目, n 表示加性噪声, 定义时间与频率分辨率分别为 Δt 和 Δf_d 。设脉冲重复频率为 f_r , 即慢时间序列为 $\mathbf{t} = [1 : N]^T \cdot \Delta t$,

$\Delta t = 1/f_r$, $N = T_a/\Delta t$, 其中 N 为脉冲数。多普勒序列为 $\mathbf{f}_d = [1:Q] \cdot \Delta f_d$, $Q = f_r/\Delta f_d$, 其中 Q 为对应 Δf_d 的多普勒单元数, 构建密集字典即为

$$\Psi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_q, \dots, \varphi_Q\},$$

$$\varphi_q(t) = \exp[-j2\pi \mathbf{f}_d(q) \cdot t], \quad 0 \leq q \leq Q \quad (11)$$

则式(10)可以重写如下

$$s(t) = \Psi\theta + n \quad (12)$$

其中 θ 为矢量, 其非 0 分量对应于 K 个最大散射点的复幅度。若 $s(t)$ 的维数较低, 即式(12)中方程个数小于未知量的个数, 要克服此欠定方程的非确定性得到准确的 θ 求解是相当困难的。利用 CS 估计多普勒单元散射点复幅度值, 其修正凸优化问题为

$$\min(\|\theta'\|_1), \quad \text{s.t.} \quad \|s(t) - \Psi\theta'\|_2 \leq \varepsilon \quad (13)$$

其中 θ' 是复幅值在 $\varepsilon = \|\mathbf{n}\|_2$ 噪声下对应于字典 Ψ 的估计值。对于式(13)的优化问题可利用加能量门限的贪婪算法来求解^[7], 也可用较为精确但运算效率较低的凸优化方法进行求解^[8]。式(13)相当于外推相干积累时间以外的孔径。式(13)中 1-范式表示能量聚集于 θ' 。式(13)中的 2-范式所示的不等式约束将噪声压制在 ε 下, 使得信号得以精确重构。由于信号的最大估计误差与噪声成正比^[8], 故在噪声水平较低时用 CS 方法可以得到较好的成像效果。而在实际应用中, 信号的稀疏度和噪声水平一般是未知的, CS 算法的性能与 ε 参数的设置密切相关, 对于具有稀疏性的 ISAR 信号, 可直接从包含其噪声的距离单元获得其噪声样本。基于噪声均匀分布的假设, 可以先将噪声的距离单元先加以区分, 即用能量门限进行噪声单元选择, 门限可表示如下

$$\lambda = S_m^2 + \left[\sum_{i=1}^I |S_i^2 - S_m^2| / N \right]^{1/2} \quad (14)$$

其中 S_i 表示距离像的平均能量, S_m 是整个距离像矩阵的平均能量。当平均能量在门限以下即表示此距离单元只含噪声。

3 基于相干投影与重置加权 CS 算法的高分辨成像

在 CS 成像中, 有限脉冲序列实现 ISAR 成像被转化为一个 1-范数优化问题, 即求解强散射点的位置和幅度。由于在宽带信号的距离高分辨下, 信号能量分布在多个距离单元, 单一的距离单元的信号信噪比仍然较低。在低信噪比情况下, 求解式(13)的非确定性将显著增加, 导致成像质量的下降。故可将信号 $s(t)$ 进行相干积累提高信噪比, 其过程可表示为

$$s_c(t) = \mathbf{A} \cdot s(t) = \mathbf{A}\Psi\theta + n = \Theta\theta + n' \quad (15)$$

其中 $s_c(t)$ 是某一距离单元做相干积累后信号与噪声之和。 \mathbf{A} 是对应相干积累操作的 $N \times N$ 维矩阵, n' 表示相干积累操作后的噪声。此处 \mathbf{A} 表示对应于 N 点的快速傅里叶变换(FFT)矩阵。在 CS 中, 常用一个随机非相干的矩阵来增强 Θ 行之间的正交性^[9], N 的值相对较大的情况下, 随机投影在 Ψ 上既不会增加 Θ 的列正交性, 也不会提高测量值的信噪比。而对应于相干积累的投影可以改善信噪比并且保持 Φ 的非相干性。故重写优化问题如下:

$$\min(\|\theta'\|), \quad \text{s.t.} \quad \|s_c(t) - \mathbf{A}\Psi\theta'\| \leq \varepsilon' \quad (16)$$

其中 ε' 表示对应于 n' 的噪声水平。考虑到 $\min(\|\theta'\|)$ 的代价函数中将信号与噪声同等对待, 而期望以最大限度提取信号分量并同时抑制噪声。事实上, 在距离-多普勒平面上信号与噪声的辨别直接取决于其像素幅度, 即信号的能量通常聚集在某些像素单元中具有很强的峰值, 而噪声分布在整个平面上且幅值相对较低。因此, 需要罚函数能够根据分量 θ' 所代表的幅值信息加以辨别, 对强信号分量以较高的优先级提取。用加权将式(16)的优化问题表示为

$$\min(\|\mathbf{W}\theta'\|_1), \quad \text{s.t.} \quad \|s_c(t) - \mathbf{A}\Psi\theta'\|_2 \leq \varepsilon' \quad (17)$$

其中 \mathbf{W} 为的对角阵, 其对角线元素 w_i 为与 θ' 的第 i 个分量的对应的权值。权值序列的设定与 θ 的先验信息有关, 这里用权值迭代重置法根据 θ' 的估计值重新设定权值, 对于第 k 次迭代, 最小化及约束如下

$$\min(\|\mathbf{W}^{(k)}\theta^{(k)}\|_1), \quad \text{s.t.} \quad \|s_c(t) - \mathbf{A}\Psi\theta^{(k)}\|_2 \leq \varepsilon' \quad (18)$$

其中 $\mathbf{W}^{(k)}$ 是所有分量进行第 k 次更新的权矢量, 即 $w_i^{(k)} = \frac{1}{|\theta_i^{(k)}| + v}$, 且 $v > 0$ 是为了达到严格最小稳

定引入的参数, 当结果收敛时或迭代过程大于一定次数时迭代过程停止。开始迭代时一旦估计出强散射点, 重置权值过程在后续迭代中降低其在代价函数中的贡献, 使得次强散射点在后续迭代中被提取。式(18)的一种改进表达式如下

$$\min(\|x^{(k)}\|_1), \quad \text{s.t.} \quad \|s_c(t) - \mathbf{A}\Psi(\mathbf{W}^{(k)})^{-1}x^{(k)}\|_2 \leq \varepsilon' \quad (19)$$

且 $\theta^{(k)} = (\mathbf{W}^{(k)})^{-1}x^{(k)}$ 。这里权值用于字典(更新)而不是用于估计系数, 然后利用贪婪算法减少计算复杂度, 算法流程如下:

(1) 确定噪声样本并计算噪声水平。

(2) 相干积累得到 $s_c(t)$, 设定迭代次数计数初始值 $k = 0$ 和最大值 k_0 以及初始权值 $w_i^{(k)} = 1, i = 1, \dots, N$ 。

(3) 令 $k = k + 1$ 并解 1-范数最小化问题 $\min(\|x^{(k)}\|_1), \text{ s.t.}: s_c(t) = \mathbf{A}\Psi(\mathbf{W}^{(k)})^{-1}x^{(k)}$ 。

(4) 计算系数矢量 $\theta^{(k)} = (\mathbf{W}^{(k)})^{-1}x^{(k)}$ 。

(5) 重复(4)直到 $k = k_0$ 或 $\|s_c(t) - \mathbf{A}\Psi(\mathbf{W}^{(k)})^{-1}x^{(k)}\|_2 \leq \varepsilon'$ 停止。

4 实测数据处理

4.1 不同噪声下的改进 CS 方法成像对比

以下用不同信噪比下的实测数据来验证改进 CS 的 ISAR 成像方法有效性。实验数据为加高斯白噪声的雅克-42 飞机的实测数据。其参数如下：发射信号带宽 400 MHz，载频 10 GHz，脉冲重复频率为 100 Hz，原始回波数据信噪比在 20 dB 以上。实验中，只用了中间 64 个回波脉冲，信噪比分别为 8 dB，5 dB，3 dB 和 0 dB。在实验中将 RD 算法、CS 算法与改进 CS 算法在不同信噪比下的成像结果进行对比，其中 CS 方法中用到的是 256 列字典矩阵。由图 2(a)可以看出为 RD 成像质量随着信噪比的降低急剧下降，尤其是在 SNR 为 0 dB 时，某些强散射点被噪声淹没。图 2(b)分别为 CS 的成像结果。对比 RD 与 CS 获得的图像可以看出，在高信噪比下，RD 提取出的目标几何特性相比 CS 较少，而其虚假散射点较多。而在低信噪比下，例如 0 dB 时，两种方法由于无法获得正确的散射点估计与和产生过多的虚假点均失效。可见在低信噪比时，以

计算复杂度为代价的 CS 方法均无法获得较好的成像效果。图 2(c)为改进 CS 方法的结果，显然改进 CS 算法在各种不同的信噪比下与 CS 相比，图像虚假点少并且聚焦度好，效果明显要好，即改进 CS 算法的图像可以更好地进行目标的几何特性的描述。

4.2 不同回波脉冲个数的改进 CS 方法成像对比

下面用舰船的实测数据对改进 CS 的 ISAR 成像算法进行验证。为了验证其性能，人为地降低了采样回波脉冲数并且与传统的 RD 成像效果进行了对比。参数如下：中心频率为 15 GHz，带宽为 800 MHz，即分辨率为 0.1875 m，脉冲重复频率为 125 Hz。

图 3 给出了改进型 CS 算法与 RD 算法在用不同脉冲数成像结果的对比，RD 的所有图像中分辨率很低并且旁瓣较高，而改进 CS 算法的成像中可以看出舰船目标聚焦清晰，很好地表现了目标的形状和几何细节，注意到随着脉冲数的减少，改进 CS 算法的成像质量下降并不明显，即使用 16 个脉冲也可较好重建目标的 ISAR 图像，并且在所有 CS 的成像中，其目标的聚焦度较好并且虚假点较少。表明了改进 CS 方法可以在测量数据有限的情况下仍然实现较多强散射点的提取。

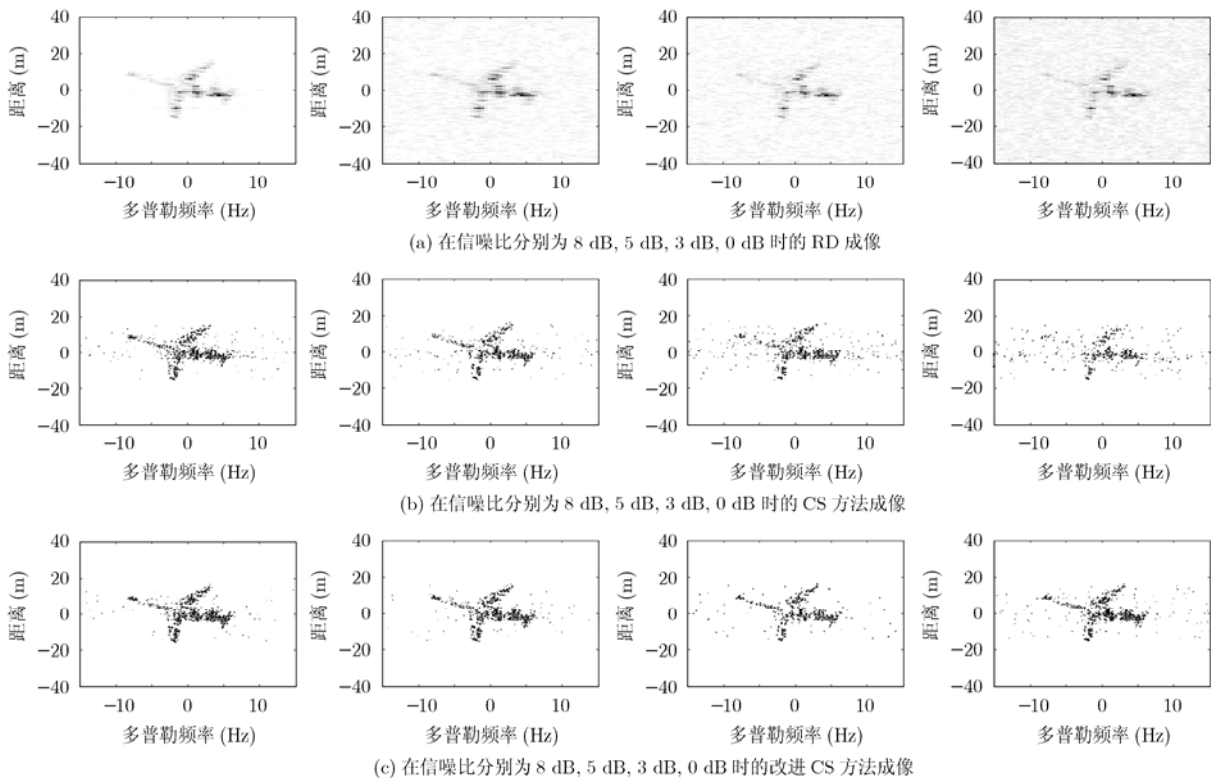


图 2 雅克-42 飞机在不同信噪比下 RD、CS 和改进 CS 的成像效果

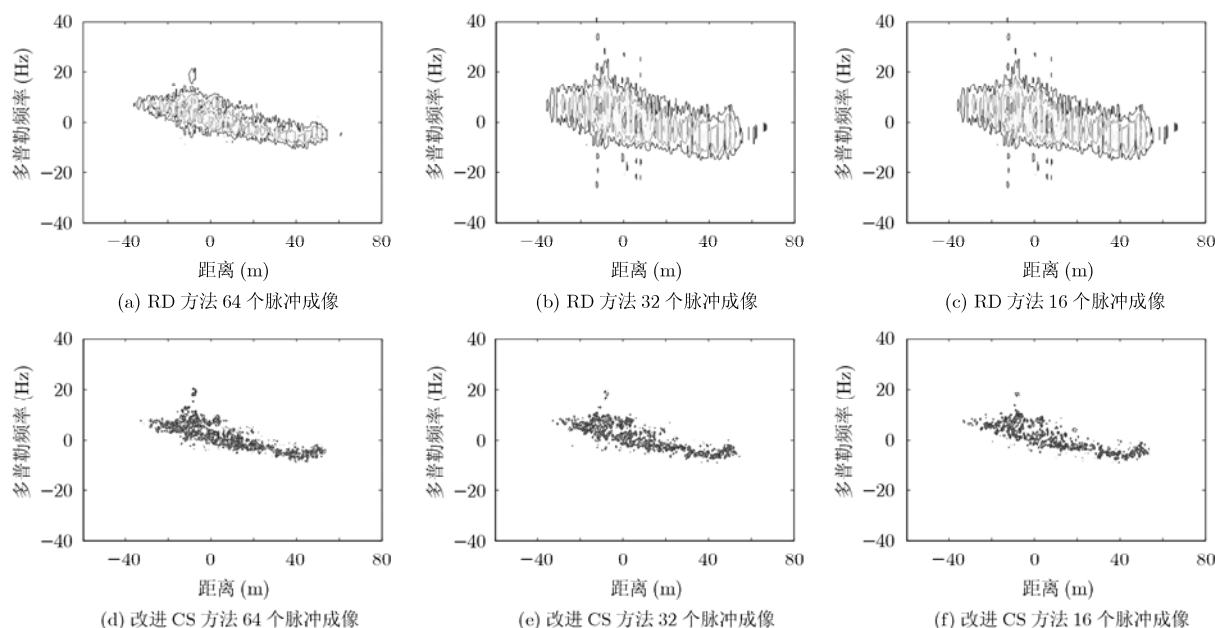


图3 用改进 CS 算法与 RD 算法在用不同脉冲成像结果对比

5 结论

由于基于传统参数化模型及直接利用 CS 的 ISAR 成像算法在噪声较强时,强散射点提取的数据减少和虚假点剧增,其成像性能急剧下降。故本文提出了一种基于改进压缩感知的高分辨成像算法,此算法用极其有限的回波脉冲即可在强噪声和杂波下有效地进行目标强散射点的精确提取。将相干投影和权值重置迭代法与 CS 算法结合,最后,通过不同的实测数据处理结果证明了改进 CS 算法在噪声下背景下的有效性,并利用有限个回波脉冲个数就可实现目标高分辨 ISAR 成像。

参考文献

- [1] 刘亚波, 李亚超, 邢孟道. 基于锥形尺度变换的弱小舰船目标检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2575-2580.
Liu Ya-bo, Li Ya-Chao, and Xing Meng-dao. Detection of weak ship target based on taper scale transform. [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2575-2580.
- [2] Lazarov A D. Iterative MMSE method and recurrent kalman procedure for ISAR image reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2001, 37(4): 1432-1440.
- [3] 王勇, 姜义成. 基于 Chirplet 自适应分解的舰船目标 ISAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 982-984.
Wang Yong and Jiang Yi-cheng. The ISAR imaging of ship based on adaptive chirplet decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(6): 982-984.
- [4] Donoho D. Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 5406-5425.
- [5] Zhang L, Xing M D, and Qui C W, et al. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2009, 6(3): 567-571.
- [6] Li Ya-chao, Xing Meng-dao, and Zhang Long, et al. Detection, parameter estimation and imaging of maneuvering target in wide-band signal[J]. *Science in Chian Series F: Information Sciences*, 2009, 52(6): 1015-1026.
- [7] Blumensath T and Davies M E. Davies. Stagewise weak gradient pursuits. Part II: Theoretical properties. http://www.see.ed.ac.uk/~tblumens/papers/BDSWCGP_II.pdf. 2008.
- [8] Grant M, Boyd S, and Ye Y. cvx: Matlab software for disciplined convex programming. <http://www.stanford.edu/~boyd/cvx/>. 2009.
- [9] Candès E, Romberg J, and Tao T, Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies?. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.

张 龙: 男, 1975年生, 讲师, 研究方向为逆合成孔径雷达成像.

张 磊: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标检测.

邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别.