

一种联合极化的距离瞬时多普勒 ISAR 成像方法

郭 睿, 臧 博, 张 龙, 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 在传统的逆合成孔径雷达 (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 成像中, 基于 Clean 技术的距离瞬时多普勒 ISAR 成像能够有效地提取散射点中心, 因此得到了广泛应用。相比于传统 ISAR, 极化逆合成孔径雷达 (polarimetric inverse synthetic aperture radar, Pol-ISAR) 能够提供更丰富的信息。本文研究了一种联合极化的距离瞬时多普勒 ISAR 成像技术, 该方法能够对多个极化通道进行联合距离瞬时多普勒成像处理, 更准确地提取强散射点信息, 减少目标数据量, 使各极化通道信息得到有效的融合, 同时也能进一步减弱噪声的影响, 避免大量虚假点的产生。仿真数据验证了本文方法的有效性。

关键词: 极化逆合成孔径雷达; 距离瞬时多普勒; 极化解调频 Clean

中图分类号: TN 958

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.04.11

ISAR imaging via RID combined with polarimetric technique

GUO Rui, ZANG Bo, ZHANG Long, XING Meng-dao

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In the traditional inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging, the range-instantaneous Doppler (RID) algorithm based on Clean technique has been widely used to extract the scattering center. Comparing with the traditional ISAR, the polarimetric ISAR (Pol-ISAR) can supply more information about the target. An ISAR imaging method via RID algorithm combined with polarimetric technique is proposed. With this method, the bright scatterers are extracted accurately and the data volume decreases greatly, the fusion of polarimetric channel information performs well. Meanwhile, the effect of noise is weakened farther, thus avoiding false point targets. By simulated data, the effectiveness of the propose method is validated

Keywords: polarimetric inverse synthetic aperture radar (Pol-ISAR); range-instantaneous Doppler (RID); polarimetric dechirp Clean (Pol-DC)

0 引 言

逆合成孔径雷达能全天候、全天时的对远距离运动目标进行成像, 最终对这些目标进行有效的分类识别。因此, 需要对散射中心进行提取, 抑制由散布函数带来的能量扩散, 同时减少逆合成孔径雷达 (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 目标分类识别的数据量。其中, Clean 技术^[1-6]被用来对 ISAR 目标进行强散射点提取, 对信号进行重构之后, 进行 RID 成像处理^[7], 获取目标的高分辨图像。随着雷达技术的发展, 全极化技术被拓展到 ISAR 领域。利用全极化信息, 采用不同的方法对极化散射矩阵进行分解, 能够对图像进行更准确的解译和理解^[8-9]; M. Martorella 等致力于极化与 ISAR 技术的结合, 对 ISAR 目标进行了有效的成像和识别处理^[10]; 国内学者则采用多种谱估

计方法提取极化散射中心, 进行超分辨成像和目标识别^[11]; 同时, 基于带宽外推的超分辨方法也被推广到极化领域, 一种极化带宽外推超分辨方法^[12]得到了详细的描述和验证。

本文正是在这种背景下, 结合 Dechirp Clean (以下简称 DC) 技术^[3, 6], 提出一种 Pol-DC 技术, 对多个极化通道进行联合 RID 处理, 与采用传统 DC 技术的单通道 RID 成像相比, 本方法能够更好的对各极化通道信息进行融合, 同时经过极化通道的组合, 对噪声的抑制效果也明显优于单通道处理方法。

1 极化 ISAR 信号模型

设极化 ISAR 系统中正交天线分别为水平和垂直极化 (记为 H 和 V)。极化 ISAR 系统发射线性调频信号, 对接

收稿日期: 2010-03-05; 修回日期: 2010-12-09。

基金项目: 国家自然科学基金 (60890072); 博士点基金 (20090203120013); 陕西省自然科学基金 (2009JQ8022) 资助课题

作者简介: 郭睿 (1985-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为极化 SAR/ISAR 信号处理技术。E-mail: gr2003@126.com

收到的目标回波经过预处理^[7], 包络补偿和自聚焦^[13]后, 各个距离单元的信号为该距离单元上各散射点回波和噪声之和。设含有 P 个散射点的信号模型可以表示为

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{i=1}^P \mathbf{a}_i(t) e^{j2\pi(f_{0i}t + \frac{1}{2}m_i t^2) + j\varphi_{0i}} + \mathbf{e}(t) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} s^{HH}(t) & s^{HV}(t) \\ s^{VH}(t) & s^{VV}(t) \end{bmatrix}$ 为极化回波散射矩阵; $\mathbf{a}_i(t) =$

$\begin{bmatrix} a_i^{HH}(t) & a_i^{HV}(t) \\ a_i^{VH}(t) & a_i^{VV}(t) \end{bmatrix}$ 为第 i 个散射点的散射系数矩阵; t 为慢

时间; f_{0i} 为第 i 个散射点的初始频率; m_i 为调频率; φ_{0i} 为初始相位; $\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} e^{HH}(t) & e^{HV}(t) \\ e^{VH}(t) & e^{VV}(t) \end{bmatrix}$ 为噪声分量的散射矩阵。

由互易性原理可知, 在单站、远场、互易性介质条件下, 雷达目标的极化散射矩阵是对称的, 即 $s^{HV} = s^{VH}$ 。

与传统 ISAR 系统中的单极化发射信号相比, 由于发射信号中存在 H 和 V 两种极化波, 经过目标照射, 最终可以录取到 HH, HV(或 VH), VV 多种极化方式下的回波信号, 因此式(1)采用矩阵形式来描述信号的模型。同时需要说明的是, 对目标回波进行预处理时, 需要对散射矩阵中的多极化通道进行联合处理。从式(1)中可以看出, 接收到的不同极化方式下的回波经过预处理, 包络补偿和自聚焦后, 其散射点的初始频率和调频是相同的, 不同的只是散射系数, 这是由目标的散射特性决定的。

为了结合极化信息与 ISAR 技术, 对接收到的极化散射矩阵进行 Pauli 基展开^[7], 得到如下的极化回波散射向量表示

$$\mathbf{s} = \frac{1}{\sqrt{2}} [s^{HH} + s^{VV} \quad s^{HH} - s^{VV} \quad 2s^{HV}]^T = [s^1 \quad s^2 \quad s^3]^T \quad (2)$$

式中, T 为转置操作; 上标 $x=1, 2, 3$ 表示第 x 个组合极化通道。为了简便, 将 $\mathbf{s}(t)$ 简写为 \mathbf{s} 。

采用 Pauli 基展开得到极化散射向量具有以下优点:

(1) Pauli 矩阵是以基本散射机理的形式给出的, 将 Pauli 展开的散射向量可以写成如下形式

$$\mathbf{s} = \|\mathbf{s}\| [\cos \alpha e^{j\phi_1} \quad \sin \alpha \cos \beta e^{j\phi_2} \quad \sin \alpha \sin \beta e^{j\phi_3}]^T \quad (3)$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示对向量取范数; α 代表的是散射目标内部的自由度, 用来表示散射机制的类型; β 代表散射物的倾角; ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 表示目标的相位角。

因此, 与直序展开得到的极化散射向量 $\mathbf{s} = [s^{HH} \quad s^{HV} \quad s^{VV}]$ 相比, Pauli 基展开更能表示极化散射机制。

(2) 经过 Pauli 基展开后得到的散射向量对噪声的敏感度也降低。由于 Pauli 基展开后的散射向量相当于对 HH, HV 和 VV 极化通道进行了线性组合, 随机噪声在这个重新组合过程中会被抵消。

(3) 将多个极化通道的信号进行了组合, 在后续的极化通道联合处理中可以提高对极化信息的融合。

(4) 同时, 在后续的极化 ISAR 目标识别过程中, 采用 Pauli 基展开更有利于对极化散射矩阵的分解和特征提取。

与式(2)的 Pauli 基展开相对应, 从散射系数矩阵中也能得到如下的散射系数向量表示^[13]

$$\mathbf{a}_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [a_i^{HH} + a_i^{VV} \quad a_i^{HH} - a_i^{VV} \quad 2a_i^{HV}]^T = [a_i^1 \quad a_i^2 \quad a_i^3] \quad (4)$$

经过 Pauli 分解后的回波信号仍可以记为式(1)的形式, 只是其中的信号 $\mathbf{s}(t)$ 和散射系数 \mathbf{a} 已经采用式(2)和式(4)中的向量形式来进行表示。

2 Pol-DC 技术

由于传统的 RD 成像中点散布函数的存在, 主瓣能量会出现扩散, 因此常采用 Clean 等方法估计出多个主要散射点的初始频率、调频率和复振幅等参数对信号进行重构。这里对已有的 DC 技术^[3]进行扩展, 采用基于 Pol-DC 技术的 RID 方法对目标进行成像处理, 具体的 Pol-DC 处理按照以下的步骤进行迭代。

步骤 1 最亮散射点的选择

对经过 Pauli 基展开后的信号, 如式(2)所示, 按照式(4)找出其中最亮散射点所在的极化通道 x^*

$$x^* = \underset{(x)}{\operatorname{argmax}} (s^x) \quad (5)$$

步骤 2 第 x^* 个极化通道的参数估计

假设目标包含 P 个强散射点, 则第 x^* 个极化通道的目标回波为

$$s^{x^*}(n) = \sum_{k=1}^P \hat{a}_k^{x^*}(nT_a) e^{j2\pi(f_{0k}nT_a + \frac{1}{2}m_k(nT_a)^2) + j\varphi_{0k}} \quad (6)$$

第 k 个信号分量的频率 f_{0k} , 调频率 m_k 和复振幅 $\hat{a}_k^{x^*}$ 可以从式(7)~式(10)获得

$$C(f_0, m) = \sum_{n=1}^N \{ [s_{k-1}^{x^*}(n) \cdot e^{-j2\pi(f_0 nT_a + \frac{1}{2}m nT_a^2)}] \} / N \quad (7)$$

$$\{\hat{f}_{0k}, \hat{m}_k\} = \underset{[]}{\operatorname{argmax}} [| C(f_0, m) |] \quad (8)$$

$$\hat{\varphi}_{0k} = \operatorname{angle} (C(\hat{f}_{0k}, \hat{m}_k)) \quad (9)$$

$$\hat{a}_k^{x^*}(nT_a) = \operatorname{Abs} [\operatorname{IFT} (\operatorname{Win}_k^{x^*}(f) \cdot \operatorname{FFT}(s_{k-1}^{x^*}(n) \cdot e^{-j2\pi(\hat{f}_{0k}(nT_a) + \frac{1}{2}\hat{m}_k(nT_a)^2 - j\hat{\varphi}_{0k})}))] \quad (10)$$

式中, $\operatorname{Win}_k^{x^*}(f) = \begin{cases} 1, & f_{Lk} < f < f_{Rk} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 为第 k 个分量的频域窗

函数, 其中 $f_{Rk} > 0, f_{Lk} < 0$ 。

步骤 3 其他极化通道参数估计

通过式(9), 第 x^* 个极化通道中第 k 个信号分量的参数 f_{0k}, m_k 和复幅度 a^{x^*} 都被估计出来了, 对于剩余的其他两个极化通道, 只需要对其复幅度进行估计。仍采用式(10)的方法进行估计。其中, x^* 用 $x \neq x^*$ 的其余两个组合极化通道替代。

步骤 4 强散射点信号的移除

在频域减掉已估计的第 k 个信号后, $s_k^x(n)$ 为

$$s_k^x(n) = \operatorname{IFT}((1 - \operatorname{Win}_k^x(f)) \cdot$$

$$\operatorname{FFT}(s_{k-1}^{x^*}(n) e^{-j2\pi\hat{f}_{0k}(nT_a)^2 - j\pi\hat{m}_k(nT_a)^2})) e^{j2\pi\hat{f}_{0k}(nT_a)^2 + j\pi\hat{m}_k(nT_a)^2} \quad (11)$$

式中, $x=1,2,3$ 。

步骤 5 迭代门限的设置

通过式(13),在频域减掉已估计的第 k 个信号,这时剩余信号的能量为

$$E_k = \sum_{x=1}^3 E_k^{(s^x)} \quad (12)$$

式中, $E_k^{(s^x)}$ 为第 j 个通道的剩余能量。当 $E_k/E=\lambda$ 时(一般 λ 取为 0.1,当存在噪声时可以取 0.2~0.4),停止迭代, E 为总的初始能量。

3 基于 Pol-DC 的极化 ISAR RID 成像算法

对采用 Pol-DC 方法的 RID 成像算法进行总结,具体步骤如下:

步骤 1 对原始极化通道数据进行联合预处理,主要是相干化处理(针对高速目标的运动补偿);

步骤 2 对预处理后的极化通道数据各自进行包络补偿和自聚焦处理^[14];

步骤 3 采用 Pauli 基对步骤 2 中得到的数据进行展开,如式(2),得到新的极化回波向量;

步骤 4 采用第 2 节中的 Pol-DC 技术进行成像处理,得到组合极化通道 HH+VV、HH-VV 和 HV 的图像;

步骤 5 对步骤 4 中得到的极化通道图像进行伪彩处理。

图 1 为采用 Pol-DC 进行极化 ISAR RID 成像的完整流程图。

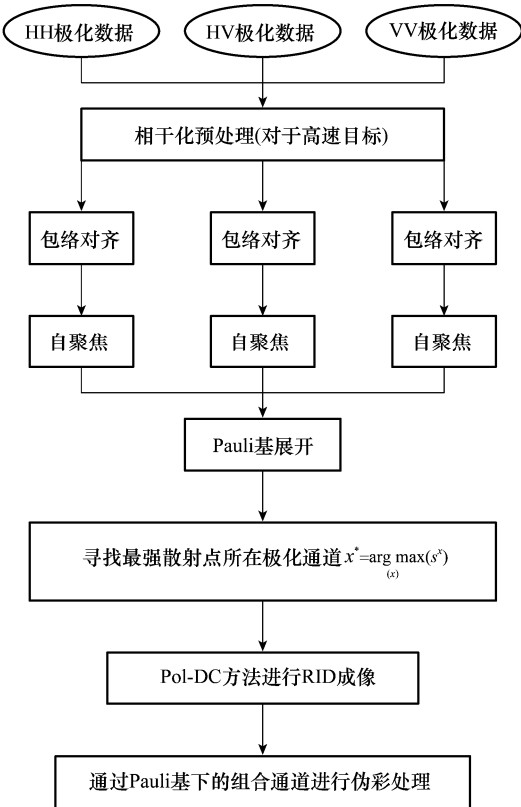


图 1 采用 Pol-DC 技术的极化 ISAR RID 成像流程图

需要说明的是,在进行伪彩处理时,本文直接采用了 Pauli 基展开下的极化组合通道进行 RGB 三原色处理(R 对应 $|HH-VV|/\sqrt{2}$, G 对应 $|\sqrt{2}|HV|$, B 对应 $|HH+VV|/\sqrt{2}$),得到伪彩合成图;对于传统的单通道 ISAR 成像处理,我们将处理后的极化通道采用直序展开,进行 RGB 三原色处理(R 对应 $|HH|$, G 对应 $|HV|$, B 对应 $|VV|$),得到伪彩合成图。

4 实验结果分析

按照表 1 设置仿真参数,在场景中放置 6 个散射点,其极化散射系数矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1+1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1-1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & 1/2 \\ 1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 3/2 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

在进行 Pauli 基分解后,相应的散射向量为 $[\sqrt{2} \ 0 \ 0]^T$, $[0 \ \sqrt{2} \ 0]^T$, $[\sqrt{2} \ 1 \ 1]^T$, $[0 \ \sqrt{3}/2 \ 1/\sqrt{2}]^T$, $[\sqrt{2} \ 0 \ 0]^T$, $[\sqrt{2} \ 1/\sqrt{2} \ \sqrt{3}/2]^T$ 。其中,根据互易性原理^[15], HV 和 VH 两个极化通道的散射系数被设置成相同的值,同时认为两通道的回波信号 $s^{HV} = s^{VH}$ 。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	设置值
中心频率/GHz	5.52
带宽/MHz	400
脉冲重复频率/Hz	400
脉冲宽度/ μ s	25.6
最小距离/m	15 000

图 2(a)给出了散射点在场景中的分布图,图 2(b)~图 2(d)分别为加入 5 dB 的噪声后,分别采用 RD,基于 DC 的 RID 和基于 Pol-DC 的 RID 方法的成像结果。可以看到,不同的极化通道点目标图像是各不相同的,这是由于在不同的极化通道中,目标的散射系数是不同的, HV 通道的成像结果中,只有三个点目标,因为其他三个点目标在 HV 极化方式下的散射系数都为零。从进行伪彩处理后的图像,可以看到不同散射特性的点目标,进行伪彩之后的颜色也不同,由于 HH 通道的散射系数比较大,所以图中各点目标主要表现为红色。

从图 2(b)中可以看到,在高信噪比的情况下, HH 和 VV 基本没有受到噪声的影响,但 HV 信号对噪声比较敏感,已经产生了严重的散焦现象。在图 2(b)其伪彩合成图中的点目标还是可以分辨的。

图 2(c)为采用 DC 方法得到的 RID 成像结果,可以看到 HH, VV 两极化通道中的目标成像结果良好,但是对于噪声比较敏感的 HV 通道,由于受噪声影响无法得到正确的散射点信息,在与图 2(b) HV 通道中散焦点相同的位置上,产生了虚假点目标。最终导致在伪彩图中也出现了虚假点,这些虚假点多为绿色,是因为这些点只在 HV 通道有信息存在。

图 2(d)为采用本文的 Pol-DC 方法得到的 RID 成像结果,可以看到 HH+VV 中只有 5 个点目标,这是因为 Pauli 基展开后散射向量为 $[0 \ \sqrt{2} \ 0]^T$ 的点,其 HH+VV 的信息为零。同样,在 HH-VV 中只有 4 个点目标,这是因为有

两点的散射向量为 $[\sqrt{2} \ 0 \ 0]^T$,其 HH-VV 的信息为零。而 HV 通道中的点目标与图 2(b)中点目标位置保持一致,伪彩图中的点目标色彩基本与 Pauli 基下的散射向量保持一致。

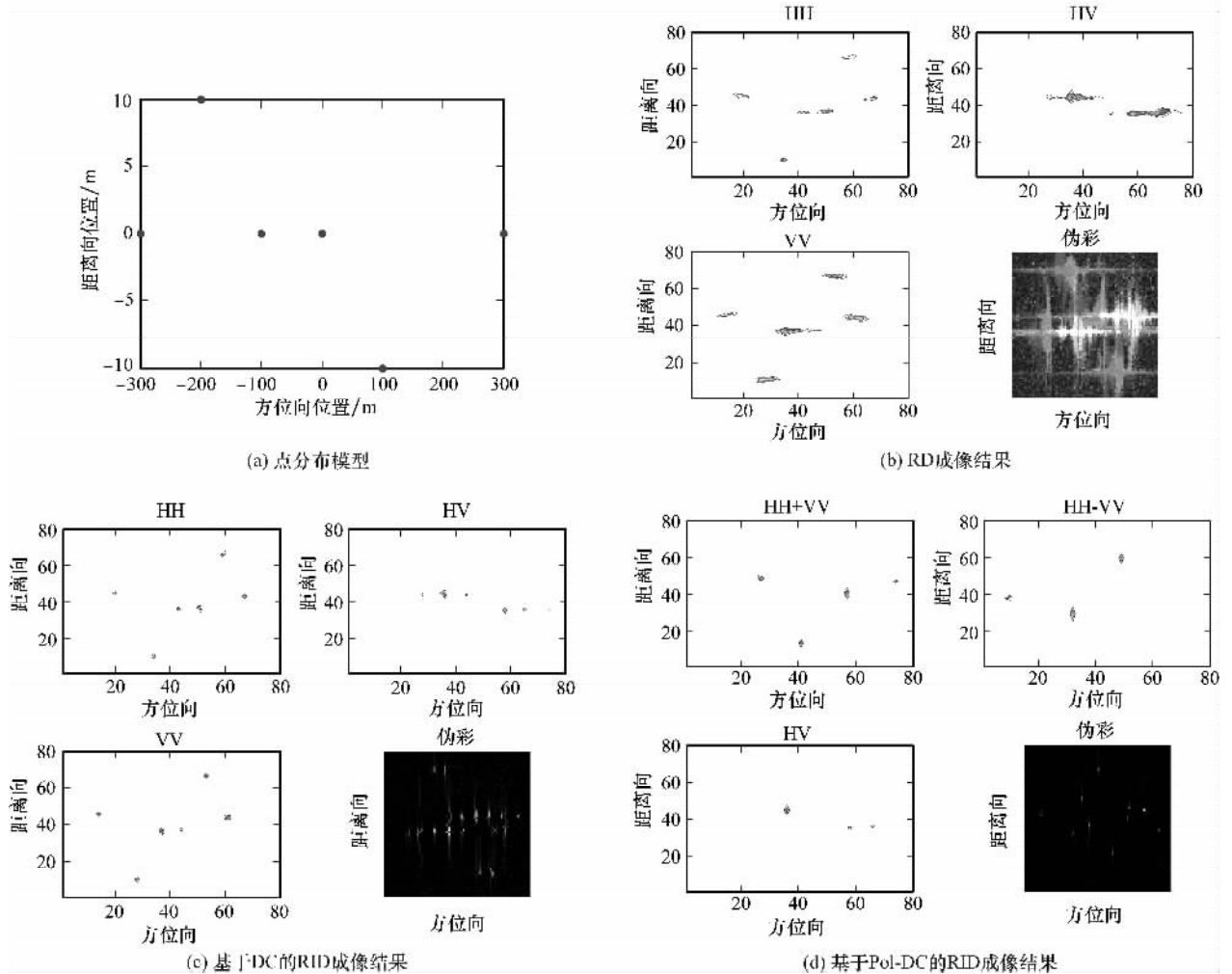


图 2 点分布模型及高信噪比下不同方法的成像结果

当加入 -13 dB 噪声时,分别采用 RD、基于 DC 的 RID 和基于 Pol-DC 的 RID 方法进行成像处理,结果如图 4 所示。从图 3(a)中可以看到,在低信噪比的情况下,HV 和 VV 受噪声影响很大,散焦非常严重,点目标已被淹没在噪声中,HH 通道虽然未被噪声淹没,但也出现了轻微的散焦,而从伪彩图中已经看不出点目标的存在,显示完全为随机噪声。

图 3(b)为采用 DC 方法得到的 RID 成像结果,可以看到,对应于图 3(a)中的 HH 通道,采用 DC 后 HH 中出现了虚假点;而 HV 和 VV 通道的点目标中混入了噪声点,无法正确恢复出真正的点目标。伪彩图中分布了很多随机噪声。

图 3(c)为采用本文的 Pol-DC 方法得到的 RID 成像结果,可以看到,受到噪声的影响,HH+VV 和 HH-VV 通道通过 Pol-DC 恢复出来的点目标,虽然位置仍与图 2(d)中两通道中点目标位置一致,但是都出现点目标信息的损失。HV 通道中的点目标与图 2(d)中点目标位置保持一致,从伪彩图中也可以看到噪声的影响,但此时还是可以分辨出目标和噪声的。

通过以上的分析,可以看出,基于 Pol-DC 的 RID 成像方法能够有效的对目标进行成像处理,相比于 DC 技术,受噪声影响降低,在低信噪比的情况下,基本不受噪声影响,对各极化通道信息进行了很好的融合和应用。

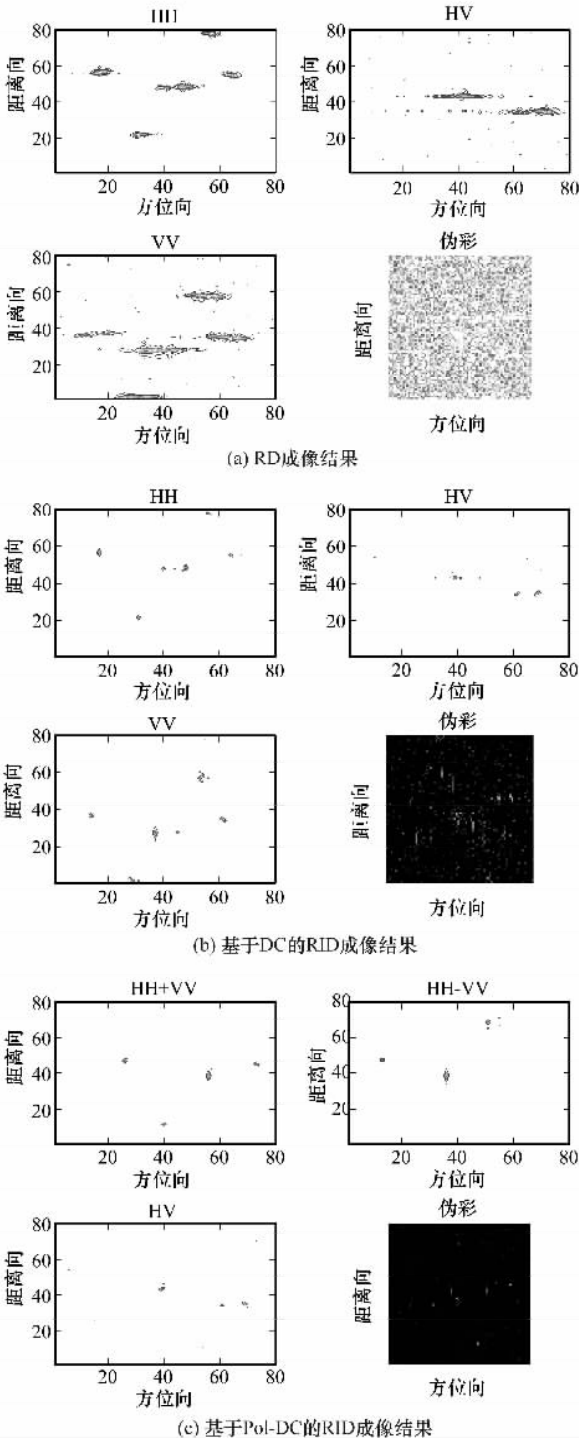


图 3 低信噪比下不同方法的成像结果

5 结 论

本文将传统的 DC 技术进行扩展,结合极化信息,提出了基于 Pol-DC 的极化 ISAR RID 成像方法。对于全极化信息的 ISAR 数据,采用 Pauli 基展开对极化通道进行了重新组合,联合多个极化通道同时进行 Pol-DC 处理,对散射点进行了更准确的提取,减少了后续分类识别的数据处理量,在极化通道信息得到很好融合的同时,比传统 ISAR

RID 成像更有效的对噪声进行了抑制。在本文中,我们采用不同信噪比下的仿真数据对基于 Pol-DC 的极化 ISAR RID 成像方法的有效性进行了验证。但是,由于国内极化 ISAR 现在进行的实测数据录取有限,因此如何处理实际中可能出现的一些问题将是我们需要关注和进一步研究的问题。同时,如何更好的开发利用极化 ISAR 数据中的极化信息,使得传统的 ISAR 技术能够更好的与极化信息结合也是我们今后将要研究的重点。

参 考 文 献:

- [1] Tsao J, Steinberg R D. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1988, 36(4): 543 - 556.
- [2] Choi I S, Kim H T. One-dimensional evolutionary programming-based CLEAN [J]. *IEE Electronic Letters*, 2001, 37(6): 400 - 401.
- [3] 邢孟道, 保铮. 外场实测数据的舰船目标 ISAR 成像[J]. *电子与信息学报*, 2001, 23(12): 1271 - 1276. (Xing M D, Bao Z. ISAR ship imaging of real data[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2001, 23(12): 1271 - 1276.)
- [4] Martorella M, Acito N, Berizzi F. Statistical clean technique for ISAR imaging [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3552 - 3559.
- [5] 黄小红, 邱兆坤, 许人灿. 空间轨道目标 ISAR 成像方法[J]. *数据采集与处理*, 2005, 20(2): 203 - 207. (Huang X H, Qiu Z K, Xu R C. ISAR ship imaging of space object in orbit[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2005, 20(2): 203 - 207.)
- [6] Gao Z Z, Li Y C, Xing M D. ISAR imaging of manoeuvring targets with the range instantaneous chirp rate technique[J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2009, 3(5): 449 - 460.
- [7] Xing M, Wu R, Bao Z. High resolution ISAR imaging of high speed moving targets[J]. *Proc. of Radar Sonar Navig*, 2005, 152(2): 58 - 67.
- [8] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 498 - 518.
- [9] 王超, 张红, 陈曦, 等. 全极化合成孔径雷达图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (Wang C, Zhang H, Chen X, et al. *Polarimetric SAR image processing* [M]. Beijing: Press of Science, 2008.)
- [10] Martorella M, Giusti E, Capira A, et al. Automatic target recognition by means of polarimetric ISAR images and neural networks[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(11): 3786 - 3793.
- [11] 代大海. 极化雷达成像及目标特征提取研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008. (Dai D H. *Polarimetric radar imaging and target feature extraction* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.)
- [12] Suwa K, Iwamoto M. A two-dimensional bandwidth extrapolation technique for polarimetric synthetic aperture radar images[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 45 - 53.
- [13] Martorella M, Palmer J, Bates B D, et al. Polarimetric hot spot processing for ISAR image autofocusing[C]//*Proc. of the IET International Conference on Radar Systems*, 2007.
- [14] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. (Bao Z, Xing M D, Wang T. *Radar imaging technology* [M]. Beijing: Press of Electronic Industry, 2005.)
- [15] Cameron W L, Rais H. Conservative polarimetric scatterers and their role incorrect extensions of the Camerondecomposition[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3506 - 3516.