

基于多重测量矢量的含旋转部件 目标 ISAR 成像方法

张 群, 蒋国建, 康 乐, 李开明

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对逆合成孔径雷达(ISAR)中含旋转部件目标成像问题,提出了一种基于多重测量矢量和压缩感知(CS)的含旋转部件目标 ISAR 成像方法。通过分析目标主体信号和旋转部件信号的多普勒差异,建立目标主体信号在方位向的多重测量矢量(MMV)模型。由于主体信号在方位向具有固定支撑集,而旋转部件信号在此支撑集上不具有稀疏性,因此,利用 MMV 模型进行信号重建后即可获得目标的主体 ISAR 像。在此基础上,再利用逆 Radon 变换得到旋转部件的 ISAR 像。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词 旋转部件;ISAR 成像;压缩感知;多重测量矢量;逆 Radon 变换

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.04.006

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)04-0036-07

An ISAR Imaging Algorithm for Targets with Rotating Parts Based on Multiple Measurement Vectors

ZHANG Qun, JIANG Guojian, KANG Le, LI Kaiming

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract In view of solving the problem of radar targets with rotating structures in ISAR imaging, an ISAR imaging algorithm for targets with rotating parts based on multiple measurement vectors and compressed sensing (CS) is proposed. Through analyzing the Doppler difference between the target body signal and the rotating part signal, a model of the multiple measurement vectors (MMV) to the target body signal in direction of cross-range is established. Since the target body signal has a fixed support-set in direction of cross-range, and the rotating part signal does not have sparsity on this support-set, the body ISAR image of the target can be obtained after the signal reconstruction with the MMV model. On the basis of this, the ISAR image of the rotating part is obtained by inverse Radon transform. The simulation results show that the proposed algorithm is valid.

Key words rotating parts; ISAR image; compressed sensing (CS); multiple measurement vectors; inverse Radon transform

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61701530,61631019)

作者简介: 张 群(1964—),男,陕西合阳人,教授,主要从事雷达信号处理领域研究。E-mail:afeu29@163.com

引用格式: 张群, 蒋国建, 康乐, 等. 基于多重测量矢量的含旋转部件目标 ISAR 成像方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(4): 36-42. ZHANG Qun, JIANG Guojian, KANG Le, et al. An ISAR Imaging Algorithm for Targets with Rotating Parts Based on Multiple Measurement Vectors[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(4): 36-42.

在逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 成像中^[1],为简化处理,一般假设目标为刚体目标,此时目标上所有散射点都具有相同的运动参数。然而在实际成像时,目标往往不满足刚体模型,目标中部分散射点的运动状态较为复杂,存在机械振动、旋转运动等运动形式,对雷达回波信号产生频率调制,这种调制称之为“微多普勒 (Micro-Doppler) 效应”^[2-4]。微多普勒效应广泛存在于实际目标中,如螺旋桨飞机、直升机、弹道导弹、大型舰船等。当采用传统的距离-多普勒 (Range-Doppler, R-D) 算法对此类目标进行成像时,微多普勒效应会对目标主体信号产生干扰,表现为在 ISAR 图像中附加的干扰条带,降低了目标的 ISAR 图像质量。解决这一问题,主要有两种思路,一是从目标回波中剔除旋转部件信号以实现目标主体成像,二是通过分离目标主体和旋转部件的信号,分别进行成像处理。基于前一种思路,文献[5]利用 Chirplet 分解剔除了活动部件的成像干扰分量,并对成像图进行轮廓特征提取。但是,这类方法注重微动信号的分离和抑制,仅能获得目标主体部分的 ISAR 图像,损失了目标旋转部件的信息。而基于后一种思路,文献[6]利用 Hough 变换在谱图域分离了目标主体信号和旋转部件信号,实现了具有大旋翼的空中目标 ISAR 成像;文献[7]在双基地 ISAR 系统中对含旋转部件目标进行了研究,提出了一种修正的扩展 Hough 方法,成功分离了目标的微多普勒信号。然而,文献[6~7]均属于图像域处理的方法,当微动散射点较多时,在距离慢时间像中剔除微动信号会导致主体信号的严重缺损,从而影响成像质量。由于这一问题在图像域处理难以避免,因此需要考虑基于信号域处理的旋转部件信号分离方法。

压缩感知 (Compressed Sensing, CS) 理论是由数学家 Donoho 于 2006 年提出的一种新的信号获取与处理理论^[8]。2007 年,Baraniuk 等人首次将 CS 理论应用到雷达成像中,证明了压缩感知雷达成像的可行性^[9]。CS 理论中的基本模型就是从单重测量信号中恢复未知的稀疏信号,称之为单重测量矢量 (SMV) 模型。多重测量矢量 (MMV) 模型是在 SMV 模型的基础上被提出的,即从多重测量信号中恢复具有相同稀疏结构的未知稀疏信号。目前基于 MMV 模型的重建算法主要有凸优化算法、贪婪算法和基于时序结构的稀疏贝叶斯算法三类^[10]。文献[11]对 MMV 模型在 ISAR 成像中的应用进行了研究,将 ISAR 成像过程中的所有一维距离像作为一个整体,而后将 ISAR 成像问题转化为 MMV 模

型的稀疏重构问题并对其优化求解。

本文主要将 MMV 模型应用到含旋转部件目标 ISAR 成像中。首先建立了含旋转部件目标的 ISAR 成像转台模型,分别对目标主体信号和旋转部件信号的多普勒进行分析,得出目标主体信号在方位向的稀疏性和旋转部件信号在方位向的非稀疏性;而后建立目标主体信号的线性模型,找到目标主体信号在方位向的固定支撑集。通过低维观测信号与恢复矩阵,利用 MMV-OMP 算法即可获得目标主体信号的成像结果。在此基础上,从回波信号分离得到旋转部件信号,并利用逆 Radon 变换对其进行成像。

本文组织结构如下:第 1 节简单介绍了压缩感知基本理论与 MMV 模型,第 2 节建立了含旋转部件目标信号模型,第 3 节提出了含旋转部件目标 ISAR 成像方法,第 4 节通过仿真实验来验证本文方法的有效性,最后一节是结论。

1 压缩感知基本理论与 MMV 模型

假设一个未知的 N 维信号 x 可以被线性表示,即: $x = \Psi s$, Ψ 为基矩阵。如果系数向量 s 中存在 k ($k \ll N$) 个非零元素,则称 s 为信号 x 在基矩阵 Ψ 上的 k 稀疏表示。

如果利用低维观测矩阵 Φ 对信号 x 进行观测,则得到 M 维的观测信号 y , 可以表示为:

$$y = \Phi x = \Phi \Psi s = A^{\text{cs}} s \quad (1)$$

其中 $A^{\text{cs}} = \Phi \Psi$ 。对于上式的求解,如果 A^{cs} 满足约束等距特性 (Restricted Isometry Property, RIP), 可将其转化为最小 l_1 范数凸优化问题^[12]:

$$\min \|s\|_1, \quad \text{s.t. } y = A^{\text{cs}} s \quad (2)$$

解得系数向量 \hat{s} 后可利用基矩阵 Ψ 重建原始信号 x , 即:

$$\hat{x} = \Psi \hat{s} \quad (3)$$

对于 M 个 N 维信号 x 来说,如果每个信号的稀疏结构相同,那么可以利用观测矩阵 Φ 对 M 个信号同时进行观测,得到 M 个观测结果,即:

$$Y = \Phi X \quad (4)$$

式中: $X = [x_1, x_2, \dots, x_M]$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_M]$ 。这种利用信号稀疏结构特性的 CS 观测模型称为多重测量矢量 (MMV) 模型^[13]。

2 含旋转部件目标信号模型

假设目标的平动补偿已经完成,则 ISAR 成像模型可以用转台模型表示,如图 1 所示。图中 O 点

为目标成像中心,成像投影平面由坐标系 XOY 构成,雷达到目标成像中心的距离为 R_{ref} 。在成像时间内,主体散射点 P 的坐标为 (x, y) ,以角速度 ω 匀速转动,到成像中心的距离为 R_p ,初相为 θ_0 。坐标系 $UO'V$ 中,旋转散射点 Q 以角速度 ω_Q 绕 O' 作半径为 r_Q 的匀速圆周运动,初相为 θ_Q 。

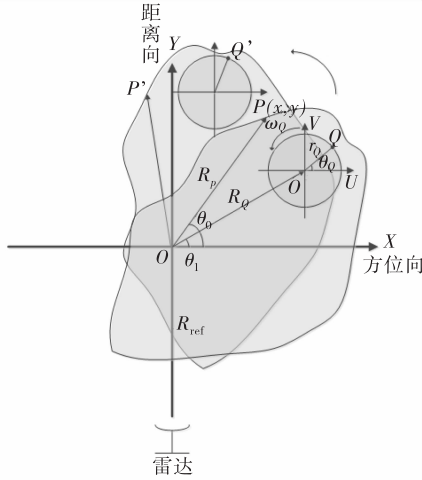


图1 含旋转部件目标转台模型

雷达发射线性调频信号:

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\beta \hat{t}^2\right)\right) \quad (5)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数; T_p 为时宽; f_c 为载频; β 为调频率; \hat{t} 表示快时间。用参考距离 R_{ref} 的参考信号对回波信号进行解线频调(Dechirp)处理,假设目标上有 m 个主体散射点 P_m 和 n 个旋转散射点 Q_n ,则回波信号可以表示为:

$$s(\hat{t}, t_m) = \sum_{i=1}^m \sigma_{P_i} \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}\beta \hat{t} R_{\Delta i}(t_m)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta i}(t_m)\right) + \sum_{k=1}^n \sigma_{Q_k} \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}\beta \hat{t} R_{\Delta k}(t_m)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta k}(t_m)\right) \quad (6)$$

式中: σ_{P_i} 、 σ_{Q_k} 分别为第 i 个主体散射点和第 k 个旋转散射点的散射系数; c 为光速; $\lambda = c/f_c$ 为波长; $R_{\Delta i}(t_m) = R_i - R_{\text{ref}}$, $R_{\Delta k}(t_m) = R_k - R_{\text{ref}}$, R_i 、 R_k 分别表示主体散射点与旋转散射点到雷达的距离。

对式(6)进行距离压缩后,得到距离压缩信号为:

$$s(r, t_m) = \sum_{i=1}^m \sigma_{P_i} B \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - R_{\Delta i}(t_m))\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta i}(t_m)\right) + \sum_{k=1}^n \sigma_{Q_k} B \cdot \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - R_{\Delta k}(t_m))\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta k}(t_m)\right) \quad (7)$$

式中: B 为带宽。

由图1可得,主体散射点 P 对应的 $R_{\Delta P}$ 为:

$$R_{\Delta P(t_m)} = R_p \sin(\omega t_m + \theta_0) \quad (8)$$

在小角度观测条件下, $\sin \omega t_m \approx \omega t_m$, $\cos \omega t_m \approx 1$,则 P 点的多普勒为:

$$f_{dP'} = \frac{2}{\lambda} \frac{d(R_p \sin(\omega t_m + \theta_0))}{dt_m} \approx \frac{2\omega R_p \cos \theta_0}{\lambda} = \frac{2\omega x}{\lambda} \quad (9)$$

而对于旋转散射点 Q ,其对应的 $R_{\Delta Q}$ 为:

$$R_{\Delta Q(t_m)} = R_Q \sin(\omega t_m + \theta_1) + r_Q \sin(\omega_Q t_m + \theta_Q) \quad (10)$$

同理可以推出 Q 点的多普勒为:

$$f_{dQ}(t_m) = \frac{2}{\lambda} (\omega R_Q \sin \theta_1 + \omega_Q r_Q \cos(\omega_Q t_m + \theta_Q)) \quad (11)$$

由式(9)、(11)可得主体散射点的多普勒为恒定值,因此对目标主体信号在方位向做傅里叶变换就可以实现方位向聚焦。而旋转散射点的多普勒附加了一个正弦调频信号,直接在方位向做傅里叶变换将导致散焦,产生宽度与旋转半径为正比的干扰条带。

3 含旋转部件目标 ISAR 成像方法

3.1 目标主体回波分离与成像

在小角度观测条件下, $R_{\Delta P(t_m)} \approx x \omega t_m + y$,由此可将目标主体的基频回波信号重新表示为^[14]:

$$s_1(\hat{t}, t_m) \approx \iint \sigma(x, y) e^{-j4\pi \frac{\omega}{\lambda} \hat{t} x} e^{-j4\pi \frac{\beta}{c} \hat{t} y} dx dy \quad (12)$$

式中: $\sigma(x, y)$ 表示目标主体的散射系数。

将回波信号 $s_1(\hat{t}, t_m)$ 离散表示成大小为 $N \times M$ 的矩阵 s_{mm} ,同样地,成像场景划分为 $L \times H$ 的网格,其方位向间隔为 $\Delta x = \lambda/(2\Delta\theta)$,距离向间隔为 $\Delta y = c/(2B)$,则在 $(h\Delta x, l\Delta y)$ 处的散射系数为 $\sigma(x_h, y_l) = \sigma_{lh}$,其中 $\Delta\theta$ 表示成像积累角。令 Δf 表示频率采样间隔, T 为脉冲重复周期,可以得出下式成立:

$$\begin{cases} \Delta\theta = \omega HT \\ \beta \hat{t} = n \Delta f \\ B = L \Delta f \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)得到目标主体的 ISAR 观测信号离散模型为:

$$S_1 = [s_{mm}] = \sum_{h,l} \sigma_{lh} \cdot e^{-j2\pi \frac{mh}{H}} \cdot e^{j2\pi \frac{ml}{L}} \quad (14)$$

式中: $n = 0, 1, \dots, N-1$; $m = 0, 1, \dots, M-1$; $l = 0, 1, \dots, L-1$; $h = 0, 1, \dots, H-1$ 。上式可以表示为:

$$S_1 = \mathbf{F}_\sigma \Phi \quad (15)$$

得到距离向的冗余傅里叶基 $\Phi = [\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{N-1}]$ 和方位向的冗余傅里叶基 $F = [F_0, F_1, \dots, F_{M-1}]$, 其中 $\varphi_n = e^{j2\pi n t}$, $F_m = e^{j2\pi m x}$ 。

对主体回波信号 S_1 进行距离压缩, 可将主体回波距离压缩信号 S_{r1} 表示为:

$$S_{r1} = S_1 \Phi^{-1} = F \sigma \quad (16)$$

此时将目标回波距离压缩信号重新表示为:

$$S_r = S_{r1} + S_{r2} = F \sigma + S_{r2} \quad (17)$$

式中: S_{r2} 为旋转散射点的回波信号 S_2 进行距离压缩后得到的信号, 具体表示为:

$$S_{r2} = \sum_{k=1}^n \sigma_{Q_k} B \text{sinc} \left(\frac{2B}{c} (r - R_{\Delta k}(t_m)) \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta k}(t_m) \right) \quad (18)$$

在 ISAR 成像中, 单个脉冲信号进行距离压缩后可以得到目标强散射点在距离向上的信息, 对于多个脉冲信号形成的回波矩阵来说, 距离压缩以后就可以得到目标的距离-慢时间谱图, 在目标不越距离单元徙动时, 则对于目标主体散射点来说, 目标主体散射中心回波距离压缩后的能量聚集于固定的某个距离单元内, 多个脉冲中包含的距离向信息相同, 其距离-慢时间谱图由直线谱构成。因此可以将 MMV 模型应用到 ISAR 成像中, 如图 2 所示。

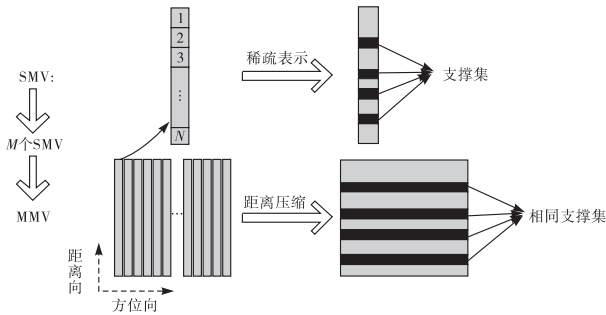


图 2 MMV 模型

在 CS 理论中, A^{cs} 需满足 RIP 性质, 文献[15]已证明当观测矩阵 Φ 和基矩阵 Ψ 不相干时, A^{cs} 高概率满足 RIP 性质。本文选择广义单位阵 $\Phi = [\varphi_{k,m}]$ 作为观测矩阵, 其中 $(k = 1, 2, \dots, K; m = 1, 2, \dots, M)$ 。满足与傅里叶基 F 不相干。在 Φ 中的任意行向量 Φ_k 中, 随机选取一个元素为 1, 其他元素均为 0。对距离压缩后的回波信号 S_r 进行观测得到:

$$S'_r = \Phi S_r = \Phi F \sigma + \Phi S_{r2} = A^{cs} \sigma + \Phi S_{r2} \quad (19)$$

在得到观测结果后, 可由恢复矩阵 A^{cs} 通过求解凸优化问题来求解。由于取得的支撑集中只包含有目标主体回波的信息, 因此利用此恢复矩阵求解的解中不包含有旋转部件回波的信息, 从而剔除旋转部件对目标主体信号的干扰。本文利用 MMV-OMP 重构算法对信号进行求解, 具体流程如表 1 所示。

表 1 多重观测矢量模型-正交匹配追踪算法

<p>输入: 多重测量矢量 S'_r, 感知矩阵 A^{cs}, 迭代总次数 J; 初始残差矩阵 $R = S'_r$, 迭代次数 $n = 1$, 索引集 $\Lambda_0 = \emptyset$, 匹配正交集 $\Omega_0 = \emptyset$;</p> <p>步骤 1: 求解使内积矩阵 $G = A^{csT} \cdot R$ 的行向量 l_1 范数取最大时的索引值集合 λ_n;</p> <p>步骤 2: 更新索引集 $\Lambda_n = \Lambda_{n-1} \cup \{\lambda_n\}$, 匹配正交集 $\Omega_n = \Omega_{n-1} \cup \{A^{cs}_{\Lambda_n}\}$;</p> <p>步骤 3: 使用最小二乘法, 求解 $\hat{\sigma}_{\lambda_n} = (\Omega_n^T \Omega_n)^{-1} \Omega_n^T S'_r$;</p> <p>步骤 4: 更新残差 $R = S'_r - \Omega_n \hat{\sigma}_{\lambda_n}$, $n = n + 1$;</p> <p>步骤 5: 判断是否满足 $n < J$, 若满足, 转步骤 2; 若不满足, 结束迭代;</p> <p>步骤 6: $\hat{\sigma} = \begin{cases} \hat{\sigma}_{\lambda_n}, & n = 1, 2, \dots, J \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$;</p> <p>输出: 稀疏信号 $\hat{\sigma}$。</p>

3.2 基于逆 Radon 变换的旋转部件成像

在得到目标主体 ISAR 像以后, 就可以利用其主体散射点分布来生成主体回波信号, 从而在回波信号中减去主体回波信号, 即可得到旋转部件回波信号, 对旋转部件回波信号利用逆 Radon 变换进行成像。

由式(7)可得旋转散射点 Q 的距离压缩回波信号为:

$$s_Q(r, t_m) = \sigma_Q B \text{sinc} \left(\frac{2B}{c} (r - R_{\Delta Q}(t_m)) \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta Q}(t_m) \right) \quad (20)$$

将式(10)代入上式, 并在小角度观测条件下进行化简得散射点 Q 的距离压缩回波信号包络为:

$$\text{mag} \{ s_Q(r, t_m) \} = \sigma_Q B \cdot \text{sinc} \left(\frac{2B}{c} (r - R_Q \sin \theta_1 - r_Q \sin(\omega_Q t_m + \theta_Q)) \right) \quad (21)$$

由上式可得旋转散射点 Q 在距离-慢时间的谱图为一以 $R_Q \sin \theta_1$ 为中心的正弦曲线, 幅度为 r_Q , 周期与旋转散射点 Q 相同。

逆 Radon 变换可以实现正弦曲线到参数空间的映射^[16]。将旋转散射点 Q 的距离-慢时间包络写为如下形式:

$$f(r, \theta) = \delta(r - r_Q \sin(\theta + \theta_Q)) \quad (22)$$

其逆 Radon 变换后图像为:

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(r, \theta) e^{-j2\pi r x} e^{j2\pi(k_x x + k_y y)} dr dk_x dk_y = \delta(x - r_Q \sin \theta_Q) \delta(y - r_Q \cos \theta_Q) \quad (23)$$

式中: $k_x = v \cos \theta$, $k_y = v \sin \theta$ 。因此, 利用逆 Radon 变换就可以实现旋转散射点在成像平面的重建。

4 仿真分析

4.1 点目标仿真实验

首先进行点目标仿真实验。仿真参数设置如下:雷达载频 f_c 为 10 GHz,带宽 B 为 600 MHz,发

射线性调频信号,脉冲宽度 T_p 为 10^{-6} s,PRF 为 256 Hz,目标运动速度为 300 m/s。假设目标由 5 个非旋转散射点和 2 个旋转散射点组成,如图 3(a)所示。其中 2 个旋转点(图中用“*”标出)的初始坐标分别为(3 m,0 m)和(0 m,3 m),旋转中心为成像中心,旋转半径为 3 m,旋转频率为 12 Hz。

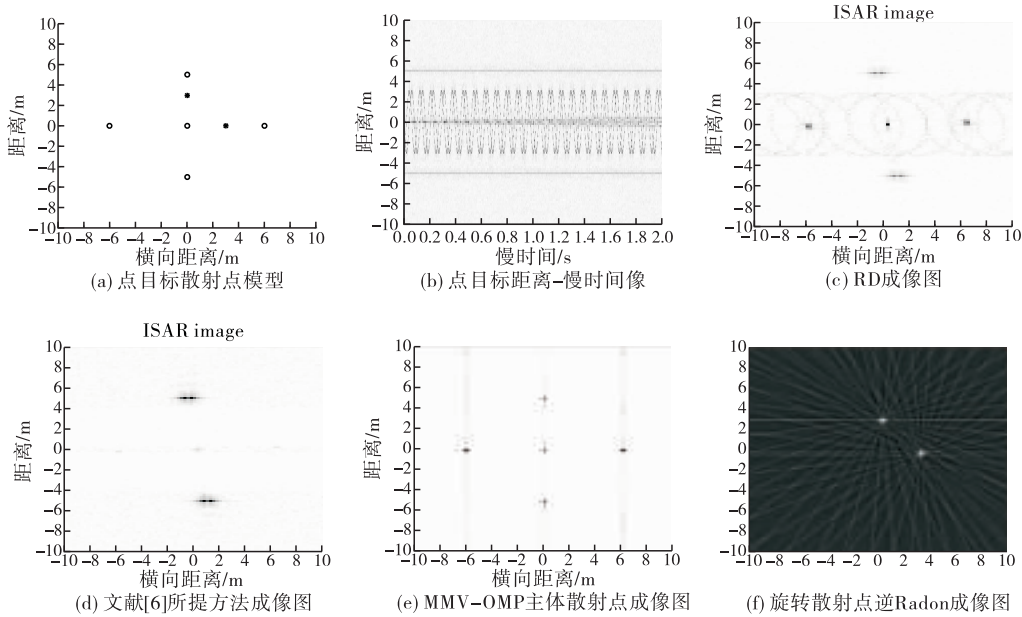


图3 点目标仿真结果

在回波信号中加入了高斯白噪声,信噪比 SNR 为 -13 dB。图 3(b)是点目标的距离-慢时间像,从图中可以看出目标的距离-慢时间像由非旋转散射点的直线谱和旋转散射点的正弦曲线谱构成。对回波信号利用传统的距离多普勒(RD)算法直接成像,得到的结果如图 3(c)所示:由于旋转散射点的存在,ISAR 图像中附加了沿多普勒方向的调制干扰带,成像结果受到了污染。图 3(d)是利用文献[6]所提图像域处理方法成像结果,由于旋转散射点旋转频率较高,由图 3(b)可以看出旋转散射点的正弦曲线谱较为密集,而利用文献[6]所提方法不仅仅会去掉距离慢时间谱图中的正弦曲线谱,也会使旋转散射点谱图和主体散射点谱图相交处均置 0,从而导致主体信号严重缺损,从图中可以看出,处于旋转散射点覆盖距离单元内的 3 个主体散射点成像效果较差。图 3(e)是利用本文所提方法成像结果,可以看出得到的目标主体像已基本消除了旋转散射点的影响,对比图像域处理方法也不会丢失主体散射点的信息,ISAR 图像的质量得到了提高。图 3(f)为利用逆 Radon 变换对旋转散射点回波进行成像结果。为进一步比较 RD 成像图与本文所提方法成像图的成像质量,分别计算点目标原图(不包含 2 个旋转散射点)、文献[6]所提方法成像图、RD 成像图、

和本文所提方法成像图的图像熵,如表 2 所示,可以看出 RD 成像图的图像熵值和文献[6]所提方法成像图的图像熵值相比原图熵值较大,本文所提方法成像图的图像熵值较低,聚焦效果较好,同时相比其他两种成像方法成像图更接近原图图像熵值,成像质量较高。

表2 图像熵值比较

	原图	文献[6]所提方法成像图	RD 成像图	MMV-OMP 成像图
图像熵	0.178 2	0.628 1	1.308 4	0.448 6

4.2 直升机模型仿真实验

为进一步验证本文所提方法的有效性,采用 64 个散射点构成的直升机仿真模型进行仿真实验。仿真参数设置如下:雷达载频 f_c 为 10 GHz,带宽 B 为 600 MHz,发射线性调频信号,脉冲宽度 T_p 为 10^{-6} s,PRF 为 300 Hz,目标运动速度为 100 m/s。设置 3 个旋转散射点模拟直升机水平旋翼的旋转,旋转半径均为 2 m,旋转频率为 6.566 7 Hz。

在回波信号中加入了信噪比 SNR 为 -13 dB 的高斯白噪声,图 4(a)为直升机散射点模型。首先对回波信号利用传统的距离多普勒(RD)算法直接成像,得到的结果如图 4(b)所示。由于旋转部件产生的微多普勒效应,对 ISAR 主体像产生了污染,成

像效果不佳。而后利用本文所提方法首先对 ISAR 主体部分进行成像,由图 4(c)可以看出,目标的固定散射点基本被重构出来,成像效果较佳。图 4(d)

为利用逆 Radon 变换对旋转散射点回波进行成像的结果,通过此图像可以得到 3 个旋转散射点相对旋转中心的初始位置。

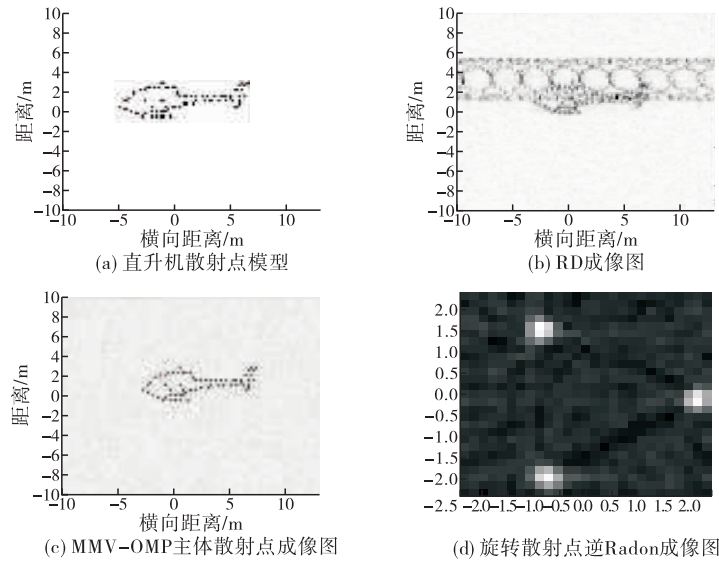


图 4 直升机散射点模型仿真结果

在回波信号中分别加入信噪比 SNR 为 -8 dB, -13 dB, -18 dB 的高斯白噪声,同时使用本文所提方法和文献[6]所提方法分别进行成像,得到的成像结果如图 5、6 所示。利用成像结果和原图计算均方差(MSE)来衡量图像重建质量,结果如表 3 所示。通过对比本文所提方法在不同信噪比下的成像结果和 MSE 可以发现,随着 SNR 的降低,图像重

建误差逐渐增大,成像质量逐渐下降。这是由于噪声的增大,干扰了距离压缩信号和恢复矩阵的相关性,使得成像质量下降。同时比较同一信噪比下不同成像算法的成像结果和 MSE 可以发现,利用本文方法所得 ISAR 像重建误差均小于文献[6]所提方法得到的 ISAR 像重建误差,因此本文所提方法的成像效果优于文献[6]所提方法。

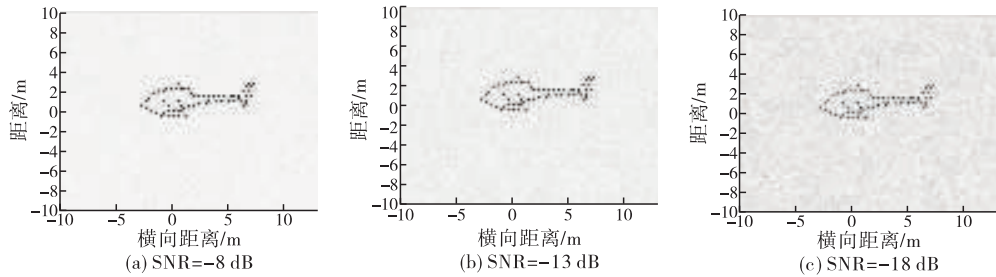


图 5 不同信噪比下 MMV-OMP 成像图

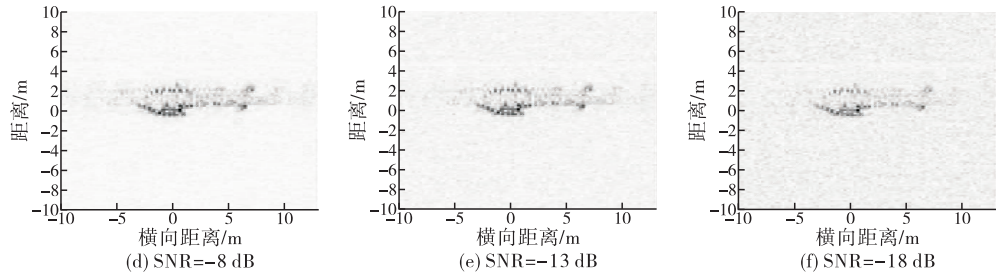


图 6 不同信噪比下文献[6]所提方法成像图

表 3 不同信噪比下图像重建误差

信噪比	MMV-OMP 成像图	文献[6]所提方法成像图
-8 dB	3.852 8 e-05	0.003 6
-13 dB	9.098 4 e-05	0.003 7
-18 dB	3.264 9 e-04	0.003 8

综上所述,本文所提方法可以在信噪比较高的条件下利用含旋转部件目标的回波信号分别得到目标主体的 ISAR 像和旋转部件的 ISAR 像,避免了图像域处理方法中主体回波信息丢失的缺陷,有效提高了目标主体的 ISAR 像质量。

5 结语

本文针对含旋转部件目标的 ISAR 成像问题,提出了一种基于多重测量矢量的含旋转部件目标 ISAR 成像新方法,利用主体信号和旋转部件信号在方位向的稀疏性差异,通过寻找主体信号在方位向的固定支撑集,对距离压缩信号进行重构求解,得到了目标主体的 ISAR 像。而后利用目标主体像来生成主体回波信号,以此得到旋转部件回波信号,并利用逆 Radon 变换对旋转部件进行成像。仿真实验验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 230-231.
- [2] CHEN V C, LI F, HO S S, et al. Analysis of Radar Micro-Doppler Signatures[J]. IEEE Proceedings Radar Sonar and Navigation, 2003, 150(4): 271-276.
- [3] 惠叶, 白雪茹. 基于 RID 序列的微动目标高分辨三维成像方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 548-556.
- [4] 罗迎, 龚逸帅, 陈怡君, 等. 基于跟踪脉冲的 MIMO 雷达多目标微动特征提取[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 575-584.
- [5] 张馨元, 齐玉涛, 林刚. 含旋转部件的动态目标特征提取方法研究[J]. 电波科学学报, 2019, 34(1): 65-69.
- [6] ZHANG Q, YEO T S, TAN H S, et al. Imaging of A Moving Target with Rotating Parts Based on the Hough Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [7] 朱仁飞, 张群, 罗迎, 等. 含旋转部件目标双基地 ISAR 微动特征提取及成像研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2359-2364.
- [8] DONOHO D L. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [9] BARANIUK R G, STEEGHS P. Compressive Radar Imaging[C]//IEEE Radar Conference. Boston, MA, USA; IEEE, 2007: 128-133.
- [10] 王法松, 张林让, 周宇. 压缩感知的多重测量向量模型与算法分析[J]. 信号处理, 2012, 28(6): 785-792.
- [11] 冯俊杰, 张弓. 多测量向量块稀疏信号重构 ISAR 成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 29(9): 1959-1964.
- [12] CANDES E J, TAO T. Near-Optimal Signal Recovery from Random Projections: Universal Encoding Strategies[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [13] 何其芳, 吴义成, 张群, 等. 多重测量矢量模型下的微动目标特征提取[J]. 太赫兹科学与电子学报, 2019, 17(5): 904-909.
- [14] ZHU D, WANG L, YU Y, et al. Robust ISAR Range Alignment via Minimizing the Entropy of the Average Range Profile[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 204-208.
- [15] BARANIUK R. A Lecture on Compressive Sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [16] 李康乐, 刘永祥, 姜卫东, 等. 基于逆 Radon 变换的微动目标重构研究[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(1): 74-79.

(编辑:刘勇)