

空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法

白雪茹,周 峰,邢孟道,保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 针对具有高速旋转部件的空中微动目标 ISAR 回波,本文提出一种基于低调频率匹配滤波的刚体与高速旋转部件回波分离方法.同时针对高速旋转部件的回波特点,提出基于逆-Radon 变换的成像算法估计高速旋转散射点图像.最终同时得到微动目标刚体以及旋转部件的聚焦良好的 ISAR 图像.仿真和实测数据处理结果证明了所提算法的有效性.

关键词: 逆合成孔径雷达 (ISAR); 微动目标成像; 低调频率匹配滤波; F-Radon 变换

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 09-1937-07

2D ISAR Imaging Algorithm for Air Micro-Motion Targets

BAI Xue-ru, ZHOU Feng, XING Meng-dao, BAO Zheng

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

Abstract: For ISAR echoes of air micro-motion targets with high-speed rotating parts, this paper presents a low chirp rate matching based algorithm to separate the echoes of rigid body from that of the rotating parts. Meanwhile, an inverse Radon transform based algorithm is proposed to estimate the image of rotating scatters, according to the characteristics of micro-Doppler signals. Therefore, well-focused ISAR imaging for both the rotating parts and the rigid body can be obtained. Finally, the results of simulated and measured data have proved the validity of the proposed algorithm.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); micro-motion target imaging; low chirp rate matched filtering; inverse Radon transform

1 引言

对成像雷达而言,目标或目标部件在雷达视线方向上,相对于目标与雷达的径向距离的小幅、非匀速运动称为微动.由于存在相对于刚体部分的高速旋转,因此当采用逆合成孔径雷达 (ISAR) 对空中微动目标进行成像时,飞机螺旋桨、直升机旋翼、涡轮式发动机叶片,旋进的导弹弹头等微动旋转部件会在一定的姿态角范围内对雷达波形进行调制,从而产生含有周期性调制成分的雷达回波信号,即产生微多普勒效应^[1,2].如果采用传统 ISAR 成像方法对该类微动目标成像,则其旋转部件在 ISAR 图像中将表现为沿多普勒方向的调制干扰带,对目标的 ISAR 图像质量造成了很大的影响,增加了识别的难度.

现有的大部分微动目标成像算法着重研究微动目标的微多普勒提取方法,它们将微多普勒作为干扰信号进行分离和抑制^[1~4],而仅利用目标刚体回波成像.文献[1,2]对微动目标回波进行建模,并提出采用联合时

频分析方法对微多普勒特征参数进行提取.文献[3]采用自适应 chirplet 分解算法将目标刚体和旋转部件回波映射到不同的参数空间,并通过设置门限分离刚体回波.文献[4]则采用基于有序统计 (order statistics) 的方法分离旋转部件回波.以上方法在一定情况下可以获得良好的信号分离效果.但在实际应用中,目标旋转部件可能尺寸较大、转速很高,而现有雷达接收机的脉冲重复频率 (PRF) 很难达到方位向无混选采样要求.因此在对包含微多普勒的距离单元进行时频分析时,频谱的混迭会严重影响微多普勒参数的准确获取.即使旋转部件的转速很慢,距离单元中往往包含大量的散射点,从时频分布中很难精确估计出微多普勒参数.此外,由于 chirplet 集非常庞大,因此对信号的 chirplet 分解具有很高的运算复杂度^[4].上述微动目标成像算法注重微多普勒的分离和抑制,而仅获得目标刚体的 ISAR 图像.这种思路相当于摒弃了目标微动分量,损失了目标旋转部件的信息,因此获得的成像结果对目标的描述是不完全的.

收稿日期:2008-03-25;修回日期:2009-05-19

基金项目:自然科学基金重大项目 (No. 60890072);自然科学基金 (No. 60802081);武器装备预研基金 (No. 9140C0102090901)

为充分利用微动目标回波信息,有必要对旋转部件进行成像,这对目标描 and 识别述具有重要意义. 目前,对高速旋转部件成像的研究还在探索阶段. 在宽带雷达条件下,高速旋转的散射点会发生越距离单元走动,其距离-慢时间域回波包络为正弦曲线^[1,2]. 根据这一特点,文献[5]提出基于 Hough 变换以及扩展 Hough (EHT: Extended Hough Transform) 变换的算法对刚体、旋转部件参数进行搜索以实现回波分离,在此基础上分别进行旋转目标和刚体目标成像,取得了较好的效果. 由于 EHT 算法受到点扩散函数的影响,所得旋转目标图像会有较高旁瓣^[6],从而需要采用局部极大值准则对旋转散射点位置进行提取. 对于窄带雷达高速旋转目标数据而言,散射点不存在越距离单元走动现象,文献[7]提出采用基于相位匹配的二维搜索算法进行微多普勒参数估计.

本文对宽带雷达条件下的空中微动目标成像算法进行了研究. 由于微动目标的刚体部分在成像时间内机动性较小,因此其散射点在距离-慢时间回波为线性调频信号,而且其调频率远低于旋转散射点微多普勒的调频率. 根据这一特征,本文提出基于低调频率匹配滤波的微多普勒分离方法,通过设置初始频率门限完成对刚体和旋转目标回波的分离. 对于刚体回波,采用传统的 RD 算法进行成像. 针对高速旋转部件距离-慢时间域回波包络特点,采用逆-Radon (F Radon) 变换对旋转部件进行成像. 同 EHT 算法相比,该方法旁瓣较低,可以提高高速旋转散射点的位置估计精度.

2 微动旋转目标信号模型

本文分析基于下述条件:首先,目标满足固定散射点模型;其次,目标的平动已经被完全补偿. 图 1 为包含

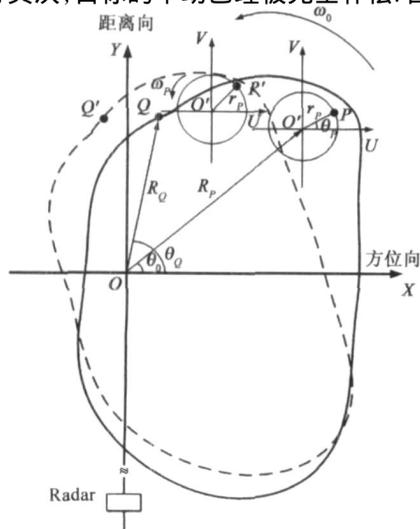


图1 微动旋转目标转台模型

一个高速旋转散射点 P 以及一个刚体散射点 Q 的微动目标 ISAR 成像转台模型. 图中 O 点为目标成像中心, 坐标系 XOY 构成成像投影平面, 雷达到成像中心的距离为 R_0 . 在成像时间内, 刚体散射点以角速度 ω_0 匀速转动, 其中 Q 点的初相为 φ_0 , 到成像中心距离为 R_Q . 坐标系 UOV 中, 高速旋转散射点 P 绕 O 作半径为 r_p , 角速度为 ω_p , 初相为 φ_p 的匀速圆周运动. O 到成像中心距离为 R_p . 图中虚线表示微动目标转过很小一个角度时对应的散射点几何分布.

假设雷达发射 LFM 脉冲, 其波形为

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

其中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}$, f_c 为中心频率, T_p 为脉

宽, ω 为调频率. 用参考距离为 $R_{\text{ref}} = R_0$ 的 LFM 信号对回波信号进行 dechirp 处理, 假设目标共包含 i 个散射点, 则

$$s(\hat{t}, t_m) = \sum_i \sigma_i \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[-j \frac{4}{c} \hat{t} R_i(t_m)\right] \exp\left[-j \frac{4}{c} R_i(t_m)\right] \quad (2)$$

其中 c 为光速, σ_i 为第 i 个散射点的后向散射系数. 若 R_i 表示散射点与雷达的距离, 则 $R_i(t_m) = R_i - R_0$. 对式(2)进行距离压缩后得到:

$$s(r, t_m) = \sum_i \sigma_i B \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - R_i(t_m))\right) \exp\left[-j \frac{4}{c} R_i(t_m)\right] \quad (3)$$

其中 B 为信号带宽. 不失一般性, 以下讨论仅针对单一散射点回波进行. 根据图 1, 散射点 Q 对应的 R_Q 为:

$$R_Q(t_m) = R_Q \sin(\omega_0 t_m + \varphi_0) \quad (4)$$

对于远距离小目标而言, 由于成像时间较短, 刚体散射点不易发生越距离单元走动. 平动补偿后其回波包络与慢时间无关. 为获得与距离分辨率相等的方位分辨率, 通常所需的积累角很小. 在小角度条件下, Q 点的多普勒为

$$f_{dQ} = \frac{2}{d} \frac{d(x_Q \sin(\omega_0 t_m) + y_Q \cos(\omega_0 t_m))}{dt_m} = \frac{2}{d} \omega_0 x_Q \quad (5)$$

其中 $x_Q = R_Q \cos(\varphi_0)$, $y_Q = R_Q \sin(\varphi_0)$ 为散射点 Q 的直角坐标. 由式(5)知刚体散射点具有恒定多普勒. 考虑到目标刚体尺寸较大或可能存在机动性, 采用低调频率 LFM 信号对其慢时间回波进行近似. 由于刚体惯性较大, 因此调频率不会很高. 此时 Q 点多普勒为

$$f_{dQ}(t_m) = f_{dQ} + \omega_0 x_Q t_m = \frac{2}{d} \omega_0 x_Q t_m + f_{dQ} \quad (6)$$

高速旋转散射点 P 对应的 R_p 为(考虑到 r_p, R_p 远

小于 R_0)

$$R_p(t_m) = R_p \sin(\omega_0 t_m + \phi_0) + r_p \sin(\omega_p t_m + \phi_p) \quad (7)$$

对应多普勒为

$$f_{dP}(t_m) = \frac{2}{\lambda} v_{xO} + \frac{2}{\lambda} v_p r_p \cos(\omega_p t_m + \phi_p) \quad (8)$$

其中 x_O 为点 O 的横坐标. 由式(6)与式(8)可知, 在时频平面上刚体散射点 Q 的多普勒对应以 $\frac{2}{\lambda} v_{xO}$ 为起始点, 以 ω_0 为斜率的直线, 其调频率为时间的慢变量; 而点 P 的多普勒对应以 $\frac{2}{\lambda} v_{xO}$ 为中心的正弦曲线, 其多普勒调频率为 $-\frac{2}{\lambda} v_p r_p \sin(\omega_p t_m + \phi_p)$, 在 $t_m = (l + 1/2 - \phi_p)/\omega_p$ (l 为整数) 处取得极值. 由于 ω_p 较高, 因此其调频率为慢时间的快变量. 当波长为 0.03m 时, 图 2 给出了当 $\phi_0 = 0.08$, $\phi_p = 0.1$, $\omega_p = 10$, $r_p = 0.5$ m, $x_O = x_p = 5$ m 时, 刚体与高速旋转散射点回波的时频分布曲线, 其中正弦为高速旋转点 P 的时频分布, 直线则为刚体散射点 Q 的时频分布.

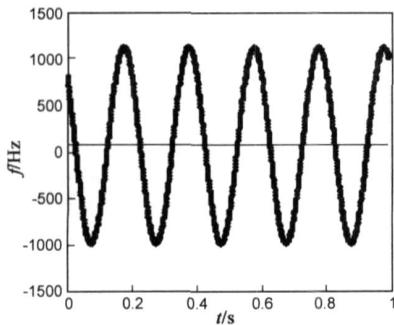


图2 微动旋转目标刚体、高速旋转散射点的理论时频分布

3 微动目标刚体回波的分离和成像

根据以上分析, 在较短的观测时间内目标刚体散射点回波的时频分布对应斜率为 ω_0 的直线, 而高速旋转散射点回波的时频分布则对应于一组斜率正、负交替变化的直线组. 如果将其斜率记为 ω_l , 则满足 $|\omega_l| \gg |\omega_0|$. 由于正弦分量和线性调频分量具有不同的调频率特性, 因此可在距离-慢时间域采用低调频率匹配滤波算法实现回波分离. 假设目标慢时间样本数为 N , 则刚体与旋转部件回波的分离算法流程如下:

step 1 根据目标刚体特性设定调频率搜索范围 M , 本文采用的数字调频率范围是 $M \in [-0.15, 0.15]$.

step 2 用 $e^{j k \omega^2}$ ($k \in M$) 对存在微多普勒分量的距离单元回波 $s(t)$ 进行相位匹配, 并计算其频谱. 遍历 k 值, 将不同 k 对应的最大频谱幅度进行比较, 则最大值对应的 k_{max} 即为刚体散射点的多普勒调频率, 此时 $k_{max} = \omega_0$. 最大频谱幅度处对应的频率 f_{0max} 则为初始频率.

step 3 重构刚体散射点回波并记录, 从 $s(t)$ 频谱

中滤除估计出的刚体散射点回波频谱.

step 4 将剩余频谱转化到时域, 更新信号 $s(t)$.

step 5 重复 step2 ~ step4, 当所估计刚体散射点回波能量低于门限时, 停止搜索.

step 6 从原始回波中减去估计出的刚体回波, 得到旋转散射点的回波.

注意到 step2 的相位匹配过程相当于在时频平面上沿斜率为 k ($k \in M$) 的直线对对应频点处的信号 (LFM 信号以及正弦调频信号) 时频分布值进行累加 (如图 2 所示), 并根据累加后的幅度大小对刚体回波进行分离. 假设旋转散射点的后向散射系数与刚体散射点的后向散射系数相当. 在低调频率匹配过程中, 高速旋转散射点对应的正弦调频信号始终处于失配状态. 此外, 越距离单元走动使该类散射点能量分散于多个距离单元之中, 因此其积累峰值更不易超过刚体回波的积累峰值. 所以根据能量门限进行刚体回波与旋转部件回波的分离是可行的.

当高速旋转散射点的后向反射系数远大于刚体散射点的后向反射系数时, 基于低调频率匹配滤波和能量准则的微多普勒分离算法可能出现下述情况: 在时频平面上, 沿斜率为 k 的直线对失配状态下的正弦曲线积累后同样会获得较高峰值, 其幅度甚至会超过刚体散射点在匹配状态下的最大幅度. 因此, 仅以能量为判据进行微多普勒分离会产生虚假刚体回波. 下面就该问题进行详细分析. 假设高速旋转散射点的散射系数近似恒定 (或采用平均值代替), 并且仅考虑回波的相位项 (包络对匹配滤波过程影响很小). 对于散射点 P 而言, 其距离压缩之后的信号为:

$$s_1(r, t_m) = A_r \exp \left\{ -j \frac{4}{\lambda} (R_p \sin(\omega_0 t_m + \phi_0) + r_p \sin(\omega_p t_m + \phi_p)) \right\} \quad (9)$$

令 $Z = \frac{4}{\lambda} r_p$, 上式改写为:

$$s_2(r, t_m) = A_r \exp \left\{ -j 2 f_{dO} t_m - j Z \sin(\omega_p (t_m + \frac{t_m}{\omega_p})) \right\} \quad (10)$$

其中 f_{dO} 为 O 点的多普勒, 采用 Bessel 函数将式(11)展开^[9], 并计算其频谱:

$$s_3(r, f_m) = A_r F \left\{ \begin{matrix} J_l(Z) \exp \left\{ -j(2 f_{dO} + l \omega_p) \left(t_m + \frac{t_m}{\omega_p} \right) \right\} \\ = A_r J_l(Z) \text{sinc}(T_m(f_m - f_{dO} - l \omega_p)) \end{matrix} \right\} \quad (11)$$

其中 T_m 为成像积累时间, l 为整数, $f_{dO} = \frac{2}{\lambda} v_{xO}$. 从式中可知相邻谱线间隔为旋转频率 ω_p . 在实际应用中, $|l|$ 取接近 $Z+1$ 的整数是 $J_l(Z)$ 不可忽略的最大阶数.

因此频谱的带宽近似为 $2Z$, 即带宽由散射点的旋转半径 r_p 决定。

根据式(12)可知, 谱线的幅度由后向散射系数以及 $J_l(Z)$ 共同决定。当采用 X 波段宽带成像雷达对空中小目标进行观测时, Z 一般为 10^2 量级, 这时 $J_l(Z)$ 对应 10^{-2} 量级。对相同的 Z 值, 谱线幅度由低频向高频逐渐增大。最高频幅度最大可为低频幅度的 3 倍, 即 $J_{l_{\max}}(Z)/J_0(Z) \approx 3$ 。由于匹配信号 e^{jkn^2} 的调频率 k 很小, 匹配过程可被等效为在时频平面上沿水平线的积累。本文着重研究螺旋桨飞机的微动成像, 其螺旋桨叶片的后向散射系数约为刚体的 5~8 倍。因此如果出现虚假的刚体信号分量, 则其对应的初始频率往往位于频谱的高频部分并且远大于刚体散射点的初始频率。图 3(a) 为频谱宽度随 Z 变化情况。图 3(b) 给出了 $l \in [-450, 450]$, $Z = 380$ 时 $J_l(Z)$ 的变化。

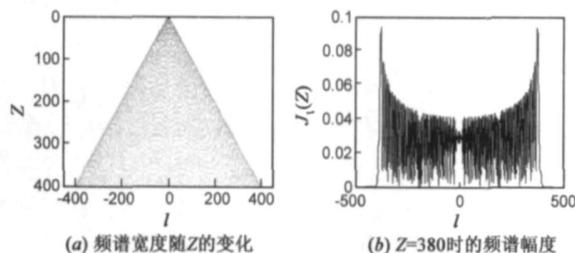


图3 参数Z对频谱的影响

根据以上分析, 考虑到低调频率匹配过程中较小空中微动目标刚体回波的初始频率远小于虚假刚体散射点回波的初始频率, 可以通过对初始频率设置门限 f_{THD} 以抑制低调频率匹配滤波过程中虚假的刚体回波。因此算法中的 step2 可以增加以下判据: 对估计出的初始频率 $f_{0\text{max}}$ 与 f_{THD} 进行比较, 若 $|f_{0\text{max}}| > f_{\text{THD}}$ 则将该分量判为旋转散射点回波, 否则判为刚体散射点回波。

对于靠近旋转中心的小旋转半径散射点而言, 参数 Z 较小, 对应频谱幅值较高(如图 3(a) 所示), 匹配获得的初始频率可能低于门限值 f_{THD} 。因此如果出现虚假的刚体信号, 则很难根据以上准则进行准确分离。但这类散射点的调频率以及初始频率均很低(低调频率匹配), 具有高频谱聚中集性, 所以不会影响刚体图像。另外, 能量很低的刚体回波也可能被划分到高速旋转目标的回波之中, 因此旋转散射点图像的中心会出现虚假点, 但它们对旋转部件的成像几乎没有影响。

综合以上分析, 本文所述的低调频率匹配滤波算法可以完成对刚体和旋转部件回波的分离, 因此算法效率较高。同时, 由于该算法仅对低调频率 LFM 信号进行匹配, 因此比 chirplet 分解算法更为简便。

4 基于逆-Radon 变换的高速旋转目标 ISAR 成像

本文对旋转目标成像分析基于以下假设条件: 首

先, 微动目标旋转部件的转速在观测时间内近似恒定; 其次, 飞机螺旋桨等部件的散射点由于以相同的中心作圆周运动而具有相同的角频率, 所以通过时频分布、自相关、频谱分析等方法可以对其进行准确估计, 从而没有必要对角频率进行搜索; 最后, 在成像时间内散射点的后向散射系数近似为恒定。

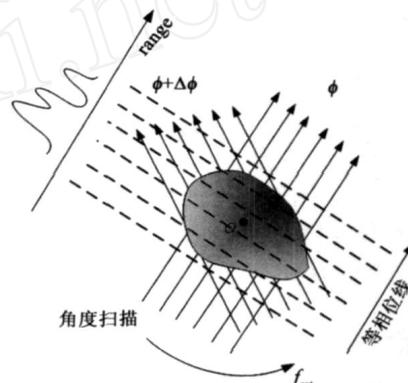


图4 旋转目标成像示意图

在散射点模型下, 将目标 ISAR 回波进行平动补偿转化为转台模型后, 等效于目标固定而雷达围绕成像中心点 O 对其进行均匀扫描, 并形成逆合成孔径阵列流形。对远距离的小目标(如飞机, 导弹等), 照射电磁波波前近似为平面。采用高分辨雷达进行成像时, 某时刻 t 接收的回波为方位角 $\phi(t)$ 处目标的一维距离像。相对于成像中心点 O 而言, 距离像每点的值等于垂直于雷达视线平面上空间分布函数的积分, 并乘以随距离变化的相位因子。假设脉冲重复频率为 PRF, 目标旋转频率为 f_{rot} 。在“一步一停”条件下, 旋转目标回波的录取过程如图 4 所示, 其中虚线表示入射电磁波的等相位线。该过程等效为以下步骤:

step 1 在给定方位角 ϕ 对目标发射回波并进行直线扫描, 并对反射回波进行接收, 获得旋转目标在角 ϕ 处的正交投影切片序列(HRRP)。

step 2 雷达转过角度 ϕ , $\phi = \phi_m = 2 f_{\text{rot}} / \text{PRF}$ 。

step 3 重复 step 1 扫描。

因此, ISAR 成像相当于以 ϕ 为间隔在连续的方位角 ϕ_i 处对目标分布函数进行连续正交投影切片(即 Radon 变换), 并以距离为纵坐标, 方位为横坐标将接收到的切片排列在二维直角坐标中, 而 ISAR 成像的目的就是通过不同方位角对应的投影切片序列重建目标散射点位置。

本文主要研究宽带成像雷达回波, 因此高速旋转部件边沿散射点的旋转半径远大于距离分辨率而会产生越距离单元走动现象。在较短的成像时间内, 旋转散射点 P 的回波包络可被表示为

$$\text{mag} \{ s_p(r, t_m) \} =$$

$$pB \text{sinc} \left(\frac{2B}{c} (r - R_p \sin \theta_0 - r_p \sin(\theta_m + \theta_p)) \right) \quad (12)$$

其中 r 表示距离单元. 可以看出在距离-慢时间平面上, 高速旋转散射点的回波包络表现为以 $R_p \sin \theta_0$ 为中心, 以 r_p 为旋转半径的正弦曲线.

假设成像平面上散射点 P 的空间分布函数为 $f_P(x, y) = \delta(x - x_P, y - y_P)$, 则该函数的 Radon 为^[6]

$$g_P(r, \phi) = \iint f_P(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - r) dx dy = \delta(x_P \cos \phi + y_P \sin \phi - r) \quad (13)$$

由于 Delta 函数仅在 0 处非零, 因此在变换域散射点对应的曲线为

$$g_P(r, \phi) : r = x_P \cos \phi + y_P \sin \phi = r_p \cos(\phi - \theta_p) \quad (14)$$

比较式(12)与式(14)可以看出, 散射点位置在成像平面上重建的过程即相当于对距离-慢时间域回波进行 FRadon 变换. 在成像积累时间内, 散射点转过的角度可以通过估计 f_{rot} 求得. 对于式(12)中的 $R_p \sin \theta_0$ 项, 由于正弦曲线的包络在距离-慢时间平面上对称分布, 因此存在微多普勒效应连续距离单元的中心位置即为 $R_p \sin \theta_0$ 的位置.

根据以上分析, 空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法步骤为:

- step 1 对回波进行平动补偿, 将其转化为转台模型.
- step 2 采用低调频率匹配滤波算法将刚体回波与旋转部件回波分离.
- step 3 对于刚体回波, 采用 RD 算法进行成像.
- step 4 对于旋转目标回波, 在估计旋转频率的基

础上采用式(14)中的 FRadon 变换进行成像.

以上讨论针对单一的、散射系数较强的高速旋转点成像. 当一个距离单元存在多个散射点时, 其分布特点粗略可以分为三类: 仅包含一个大的特显点, 其他为杂波; 不包含特显点, 而仅含有其他小散射点组成的杂波; 少数几个特显点, 以及杂波. 因此对于给定的某距离单元而言, 式(13)中的包络实际由自身项和交叉项共同组成. 当旋转部件做快速转动时, 距离单元内散射点的分布情况变化较快. 强散射点自身项的包络表现为正弦曲线, 而小散射点的自身项包络以及交叉项随目标转动起伏很快, 而且能量远低于强散射点的能量, 因此对 FRadon 变换过程的影响较小. 所以本文忽略了散射点交叉项而仅考虑强散射点自身项影响.

5 仿真数据处理

以下采用仿真数据验证本文方法的有效性. 仿真数据的参数如下: 雷达载频为 f_c 为 10GHz, 信号带宽 B 为 800MHz, PRF 为 800Hz. 散射点在成像平面上的分布如图 5(a) 所示. 4 个旋转散射点(用 ‘*’ 表示)以目标成像中心为旋转中心, 旋转半径为 1.5m, 转动频率 f_{rot} 为 6.67Hz. 两个刚体散射点位于相同距离单元(用 ‘o’ 表示), 其中一个位于目标成像中心, 另一个与其间距为 0.75m, 转动频率 f_0 为 0.04Hz. 高速旋转散射点的反射系数为刚体散射点的 8 倍. 仿真数据距离采样为 500 个单元, 回波数为 512 次.

图 5(b) 为距离压缩后采用低调频率匹配滤波方法估计出的归一化初始频率 f_{max} 模值. 其中第 1、6 个频率分量的初始频率很低, 对应刚体回波. 将归一化频率门

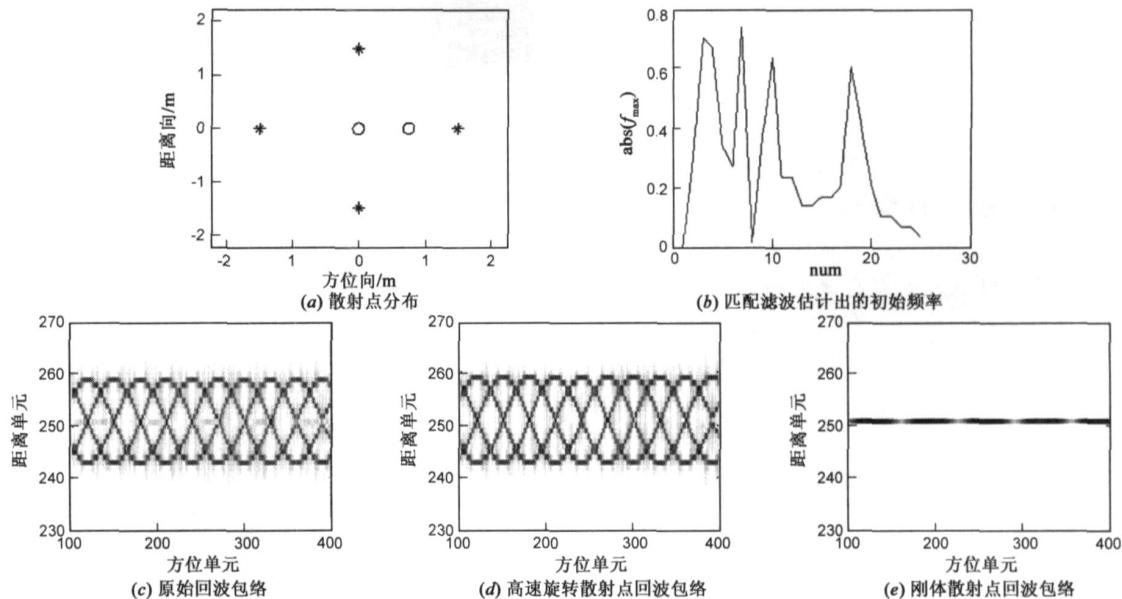


图5 回波信号的分解

限 f_{THD} 设置为 0.02, 则采用低调频率匹配滤波方法对刚体散射点回波进行分离的结果如图 5(d) ~ (e) 所示. 对于实测数据, 可根据图像频谱的宽度设置合适的 f_{THD} 值.

其中, 图 5(c) 为原始回波包络, 高速旋转部件回波和刚体回波混在一起. 应用低调频率匹配滤波分离后, 图 5(d) 为高速旋转部件的微多普勒, 图 5(e) 为刚体回波包络, 估计得到的数字初始频率分别为 0Hz、-0.0156Hz, 与式(5)一致. 图 7 为仿真目标的二维成像结果. 如图 6(a) 所示, 由于包含游动部件, 采用传统 RD 算法得到的图像存在较宽的微多普勒干扰带. 并且当高速旋转散射点后向散射系数较强时, 甚至会淹没目标刚体图像. 图 6(b) 为刚体回波的 RD 成像结果, 散射点聚焦良好, 并且与图 5(a) 分布相一致. 图 6(c) 为 EHF 方法获得的高速旋转目标成像结果. 而图 6(d) 为采用 F-Radon 变换对高速旋转目标的成像结果. 两幅图的横、纵坐标均为米. 比较图 6(c) 和图 6(d) 可以知道, F-Radon 变换算法产生的旁瓣远少于 EHF 变换的旁瓣.

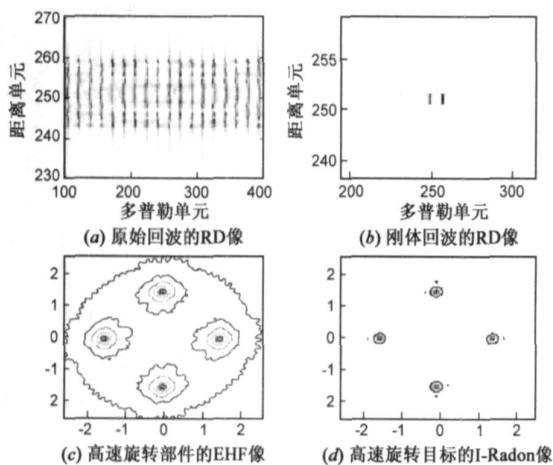


图 6 微动旋转目标的成像结果

6 An-26 实测数据成像结果

本节对 An-26 飞机 ISAR 实测数据进行处理, An-26 飞机为中型运输机, 在机身左右两侧各有一个涡轮螺旋桨. 成像雷达带宽为 400MHz, 脉冲重复频率为 400Hz. 由于 An-26 飞机的姿态原因, 在该组数据中雷达同时接收到两个螺旋桨的回波. 其中机头部分由于机动性较大而产生了散焦. 第 115 ~ 134, 125 ~ 145 个距离单元存在两个微多普勒带. 对应的螺旋桨旋转中心为第 125, 135 个距离单元. 为提高成像的准确性, 也可对旋转中心位置进行搜索. 采用与第一组数据相同的处理方法, 所得结果如图 7 所示. 其中图 7(c) ~ (d) 为分别对两个微多普勒带包络进行 F-Radon 变换后得到的图像, 估计螺旋桨直径分别为 2.61m, 2.01m, 小于实际的螺旋桨直径, 这是由螺旋桨转轴与成像平面存在的夹角引起的.

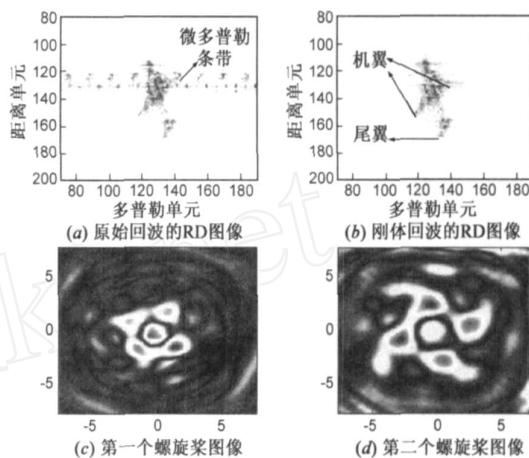


图 7 实测数据成像结果

7 结束语

针对空中微动旋转目标宽带雷达回波特点, 本文提出一种空中微动旋转目标二维 ISAR 成像方法. 该方法采用低调频率匹配滤波对刚体与高速旋转部件回波进行分离. 之后对微多普勒信号采用 F-Radon 变换获得高速旋转目标的 ISAR 图像; 并采用传统成像方法获得刚体图像. 仿真和实测数据处理结果证明该算法的有效性.

文中讨论假设目标刚体的机动性较小. 当机动性较大时 ($|a|$ 较大), 通过匹配滤波算法同样可以对其初始频率等参数进行估计并进行瞬时成像, 只需调整频率的匹配范围即可. 同时, 该方法可用于对高速旋转目标的三维成像. 通过采集目标沿雷达不同俯仰角视线的正交投影切片, 重建后将不同的旋转散射点二维分布进行合成即可以估计出散射点在空间中的三维分布函数.

另外, 由于回波包络由于受到 sinc 函数影响而存在展宽, 因此 F-Radon 变换成像算法的分辨率会有所降低. 同时实测数据往往存在 PRF 较低的情况, 由于方位采样率过低而会影响到 F-Radon 变换的精度. 因此, 低采样率条件下的回波数据处理方法, 以及稳健的幅度与相位信息相结合的成像算法将是下一步的研究方向.

参考文献:

- [1] Victor C Chen, Fayin Li, Sherr-Shyang Hoharry Wechsler, Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study[J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 2 - 21.
- [2] V C Chen, F Li, S-S Ho, H Wechsler. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271 - 276.
- [3] J Li, H Ling. Application of adaptive chirplet representation for

- ISAR feature extraction from targets with rotating parts[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig,2003,150(4):284 - 291.
- [4] Ljubisa Stankovic, Igor Djurovi C, et al. Separation of target rigid body and micro-Doppler effects in ISAR imaging [J]. IEEE Trans on AES,2006,42(4):1496 - 1506.
- [5] Qun Zhang, Tat Soon Yeo, Hwee Siang Tan, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform [J]. IEEE Trans on GRS,2008,46(1):291 - 299.
- [6] Anil K Jain. Fundamental of Digital Image Processing [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs,1989. 431 - 473.
- [7] Pawan Setlur, Moeness Amin, Thayanathan Thayaparan. Micro-Doppler Signal Estimation For Vibrating and Rotating Targets [A]. Proceedings of the Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications [C]. Sydney, Australia, 2005,2. 639 - 642.
- [8] 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 - 1277.
Xing Mengdao, Bao Zheng. ISAR ship imaging of real data [J]. Journal of electronics and information technology,2001,23(12):1271 - 1277. (in Chinese)
- [9] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京:国防工业出版社,1998. 403 - 406.
- [10] 保铮, 孙长印, 邢孟道. 机动目标的逆合成孔径雷达成像原理与算法[J]. 电子学报,2000,28(6):24 - 28.
Bao Zheng, Sun Changyin, Xing Mengdao. Principle and algorithm of inverse synthetic aperture radar imaging for maneuvering targets[J]. Acta Electronica Sinica,2000,28(6):24 - 28. (in Chinese)
- [11] Yang S Y, Yeh S M. Electromagnetic back scattering from aircraft propeller blades[J]. IEEE Trans on Magnetics,1997,33(3):1432 - 1435.

作者简介:



白雪茹 女,1984年10月生于陕西西安.现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室博士生,研究方向为 ISAR 成像,极化 ISAR 以及 ISAR 干扰等.

E-mail:angela_bai@126.com



周峰 男,1980年1月生于河南省通许县,副教授,主要研究方向为雷达成像、运动目标检测和 SAR 干扰研究.



邢孟道 男,1975年出生于浙江嵊州.教授,博士生导师,研究方向为雷达成像和模式识别等.



保铮 男,教授,1927年生于江苏南通.教授,博士生导师,中科院院士,中国电子学会会士,研究方向为雷达系统和现代信号处理等.