

基于 RWT 的旋转微动目标二维 ISAR 成像算法

吴 亮¹, 黎 湘¹, 魏玺章¹, 张旭峰¹, 凌永顺²

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 解放军电子工程学院, 安徽合肥 230337)

摘 要: 本文针对旋转微动目标的二维 ISAR 成像问题, 首先, 分析了目标旋转微动及刚体部件在距离-慢时间域的回波特性; 其次, 提出了基于解正弦调频 RWT 的旋转微动部件成像算法, 同时, 提取旋转微动散射点的位置参数并滤除其回波, 对剩余回波采用基于 RWT 方法进行刚体回波重建, 并利用传统 RD 算法获得刚体 ISAR 像; 最后, 仿真结果证明了本文算法的有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 微动目标成像; Radon-Wigner 变换

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1302-07

2D ISAR Imaging Algorithm for Rotating Micro-Motion Target Based on RWT

WU Liang¹, LI Xiang¹, WEI Xi-zhang¹, ZHANG Xu-feng¹, LING Yong-shun²

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. PLA College of Electronics Engineering, Hefei, Anhui 230337, China)

Abstract: To resolve the problem of 2D ISAR imaging of rotating micro-motion targets, firstly, this paper analysis the range-slow-time echo characteristics of rotating micro-motion and rigid parts. The Sine-Demodulation RWT based imaging algorithm for rotating micro-motion parts is proposed. The position parameters of rotating micro-motion scatters are estimated and their echoes are removed. The remained echoes, based on RWT, are used to reconstruct the rigid signals and ISAR imaging for rigid parts is performed by RD algorithm. Finally, simulation results have proved the validity of the proposed algorithm.

Key words: inverse synthetic aperture radar (ISAR); micro-motion target imaging; Radon-Wigner transformation (RWT)

1 引言

目标微动是指目标相对于雷达的径向距离上小幅、非匀速运动或运动分量, 微动目标对雷达回波信号调制产生微 Doppler 效应^[1~3]. 目标微动表征了目标运动状态的细节, 旋转微动是微动目标的一种典型的运动形式, 转动的地面天线、旋转的电动机、飞机螺旋桨、直升机旋翼、涡轮式发动机叶片以及弹道导弹等目标都具有旋转微动特征, 研究旋转微动目标雷达成像对于目标准确描述具有重要意义. 对旋转微动目标进行成像, 采用传统二维 ISAR 成像算法在距离向将产生正弦曲线变化^[1,2], 而在方位向会出现散焦现象, 即在目标二维 ISAR 像中存在干扰条带, 因此, 有待对旋转微动目标成像进一步研究.

较早的有关旋转微动目标成像的研究侧重于微 Doppler 提取和目标刚体成像^[1,2,4,5]. 文献[1,2]中时频分析方法受到目标回波多普勒谱可能出现频谱混迭的影响, 而文献[4]的有序统计方法也是基于频谱实现的.

文献[5]的自适应 Chirplet 分解方法受到庞大 Chirplet 集带来高的运算复杂度的制约. 目前, 对旋转微动目标成像的研究主要包括直接对旋转微动目标或部件进行二维及三维 ISAR 成像^[6~11]. 文献[6~8]提出了利用旋转微动目标的运动特性进行三维 ISAR 成像方法, 而文献[9]研究了窄带雷达情况下基于目标回波时频特性的成像方法, 本文不再详述. 文献[10,11]对宽带雷达情况下的旋转微动目标二维 ISAR 成像进行了详细研究. 文献[10]提出基于 Hough 变换及扩展 Hough 变换方法, 从而获得了目标旋转微动及刚体部件 ISAR 像, 而文献[11]提出基于低调频率匹配滤波方法实现了目标旋转微动和刚体部件回波的分离, 利用传统 RD 算法对刚体进行成像, 再采用逆-Radon 变换对旋转微动部件进行成像, 具有较好的效果. 虽然基于逆-Radon 变换方法比扩展 Hough 变换具有更低的旁瓣, 提高了旋转微动散射点的位置估计精度, 但是, 逆-Radon 变换的精度受到低方位采样率 (即 PRF) 的影响. 进一步从信号处理的本质来看, 基于逆-Radon 变换和扩展 Hough 变换的方法都只利

用了目标回波在距离-慢时间域的包络信息进行成像,这种忽略回波相位信息只利用幅度信息的方法对旋转微动散射点位置估计精度是有限的,对相互临近的散射点难以进行分辨。

本文对宽带雷达情况下的旋转微动目标的二维 ISAR 成像进行研究。旋转微动散射点在距离向将发生越距离单元走动,回波包络在距离-慢时间域为正弦曲线^[1,2],而回波相位表现为正弦调频及线性调频的复合调制,同时,刚体散射点回波则为线性调频信号^[10]。因此,为了充分利用目标回波的幅度和相位信息,本文提出了基于解正弦调频 Radon Wigner 变换(RWT)的旋转微动部件成像算法,对解正弦调频 RWT 结果通过设置阈值提取旋转微动散射点的位置,对距离-慢时间域目标回波进行频域滤波,从而滤除目标旋转微动回波分量。基于 RWT 方法,对于剩余回波进行刚体回波重建,并采用传统的 RD 算法进行成像。

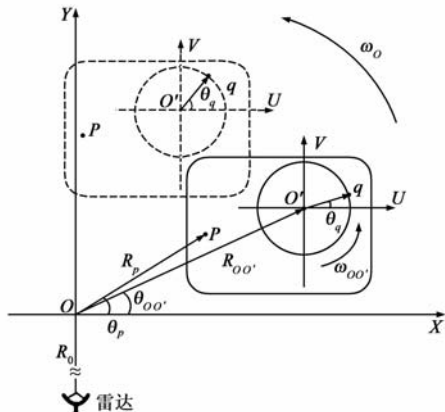


图1 旋转微动目标ISAR成像的转台模型

2 旋转微动目标回波信号分析

在宽带雷达条件下,本文采用散射点模型对旋转微动目标建模分析^[2,5]。假设目标相对于雷达的平动分量已被补偿,旋转微动目标转化为转台目标,如图1所示。坐标系 XOY 为二维 ISAR 成像平面,转台成像中心 O 离雷达距离为 R_0 。假设目标刚体部件包含 P 个散射点,旋转微动部件包含 Q 个散射点,在成像相干积累时间 T_{CP} 内,目标以角速度 ω_0 匀速转动。刚体部件第 p 个散射点离中心 O 的距离和初始方位分别为 R_p 及 θ_p ; 旋转微动部件第 q 个散射点以角速度 $\omega_{0'}$ 绕旋转中心 O' 匀速转动,在旋转微动坐标系 $UO'V$ 中,它与 O' 的距离和初相分别为 r_q 及 θ_q ,而旋转中心 O' 与 O 的距离和初相分别为 $R_{00'}$ 及 $\theta_{00'}$ 。对于所有 P 个刚体散射点,其散射系数 σ_p ($p=1,2,\dots,P$) 假定恒定;而所有 Q 个旋转微动散射点,其散射系数 σ_q ($q=1,2,\dots,Q$) 在成像时间内仍以其平均值代替、假定不变,且都以角速度 ω_0 匀速转动。

假设宽带雷达以脉冲重复频率 PRF 发射脉宽为 T_p 、带宽为 B 的 LFM 信号,根据散射点模型,以单个散射点 i 进行分析,其回波信号为:

$$s_i(\hat{t}, t_m) = \sigma_i \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c}}{T_p}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2R_i(t_m)}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_i(t_m)}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (1)$$

$$\text{其中, } \text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}, f_c \text{ 为信号载频, } \gamma = \frac{B}{T_p}$$

为调频率, \hat{t} 为快时间,慢时间 $t_m = m \cdot (1/\text{PRF})$, m 为整数,而 t 为全时间, $t = \hat{t} + t_m$, $R_i(t_m)$ 为 t_m 时刻散射点 i 离雷达的距离。用参考距离 $R_{\text{ref}} = R_0$ 对回波进行 dechirp 处理^[11]可得:

$$s_i(\hat{t}, t_m) = \sigma_i \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}\gamma\hat{t}R_{\Delta i}(t_m)\right\} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_{\Delta i}(t_m)\right\} \quad (2)$$

其中, c 为光速, λ 为载波波长, $R_{\Delta i}(t_m) = R_i(t_m) - R_0$ 。

对式(2)进行距离压缩可得距离-慢时间域信号为:

$$s_i(s, t_m) = \sigma_i B \text{sinc}\left\{\frac{2B}{c}[s - R_{\Delta i}(t_m)]\right\} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_{\Delta i}(t_m)\right\} \quad (3)$$

则对于旋转微动目标的所有散射点,其距离-慢时间域信号可表示为:

$$s_R(s, t_m) = \sum_{p=1}^P \sigma_p B \text{sinc}\left\{\frac{2B}{c}[s - R_{\Delta p}(t_m)]\right\} \exp(j\Phi_p) + \sum_{q=1}^Q \sigma_q B \text{sinc}\left\{\frac{2B}{c}[s - R_{\Delta q}(t_m)]\right\} \exp(j\Phi_q) \quad (4)$$

其中, $\Phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda}R_{\Delta p}(t_m)$ 及 $\Phi_q = -\frac{4\pi}{\lambda}R_{\Delta q}(t_m)$ 。

由图1,对于刚体散射点, $R_{\Delta p}(t_m) = R_p \sin(\omega_0 t_m + \theta_p)$,传统的二维 ISAR 成像算法只需很小转台旋转角度,成像相干积累时间内,对于远距离小目标,刚体散射点不发生越距离单元走动,包络近似不变,而相位项 Φ_p 可进行一阶近似, $\Phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_p \sin\theta_p + R_p \cos\theta_p \cdot \omega_0 t_m)$,当考虑目标尺寸较大或存在机动性时, Φ_p 可进行二阶近似:

$$\Phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda}\left(y_p + f_p t_m + \frac{1}{2}\alpha_p t_m^2\right) \quad (5)$$

其中, $y_p = R_p \sin\theta_p$, $f_p = x_p \omega_0 = R_p \cos\theta_p \omega_0$, f_p 和 α_p 分别为散射点初始频率和调频率,刚体惯性一般较大, α_p 较小,刚体回波慢时间域近似为低调频率 LFM 信号^[11]。

对于旋转微动散射点, $R_{\Delta q}(t_m) = R_{00'} \sin(\omega_0 t_m +$

$\theta_{0O'}$) + $r_q \sin(\omega_O t_m + \theta_q)$, 其中, 第一项为旋转微动中心 O' 距离分量, 对于所有旋转微动散射点都是相同的; 第二项为旋转微动散射点在旋转坐标系 $UO'V$ 中的自身距离分量. 第一项距离分量在包络和相位项上效果和刚体散射点相同; 第二项距离分量为旋转微动目标所特有, 反映了旋转微动散射点对回波包络和相位项的影响(即微 Doppler 效应), 旋转微动散射点发生越距离单元走动, 包络为正弦曲线(文献[10,11]正是基于此对旋转微动部件进行成像), 而相位项 Φ_q 可表示为:

$$\Phi_q = -\frac{4\pi}{\lambda} \left[\left(y_{O'} + f_{O'} t_m + \frac{1}{2} \alpha_{O'} t_m^2 \right) + r_q \sin(\omega_O t_m + \theta_q) \right] \quad (6)$$

其中, $y_{O'} = R_{0O'} \sin \theta_{0O'}$, $f_{O'} = x_{O'} \omega_O = R_{0O'} \cos \theta_{0O'} \omega_O$, 初始频率 $f_{O'}$ 和调频率 $\alpha_{O'}$ 对所有旋转微动散射点是相同的, 由目标旋转微动中心的转台转动所产生. 从式(6)可知, 旋转微动部件回波在慢时间域为正弦调频和低调频率 LFM 的复合调制信号.

由上分析, 旋转微动目标在距离-慢时间域回波信号表示为:

$$\begin{aligned} s_R(s, t_m) = & \sum_{p=1}^P \sigma_p B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s - y_p] \right\} \exp(j\Phi_p) \\ & + \sum_{q=1}^Q \sigma_q B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s - y_{O'} \right. \\ & \left. - r_q \sin(\omega_O t_m + \theta_q)] \right\} \\ & \cdot \exp(j\Phi_q) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, Φ_p 和 Φ_q 分别为式(5)和式(6)所示.

3 基于解正弦调频 RWT 的目标旋转微动部件成像

本文对旋转微动部件进行成像, 首先, 刚体散射点回波将对旋转微动部件成像产生干扰, 必须有效抑制刚体回波对成像的影响; 其次, 对于旋转微动部件, 必须综合利用其散射点回波的幅度及相位信息, 从而对散射点进行有效分辨, 获得清晰的旋转微动部件二维 ISAR 像. 因此, 本文提出了基于解正弦调频 RWT 的成像算法.

3.1 基于解正弦调频 RWT 的成像算法

根据式(7), 旋转微动回波在距离-慢时间域位置由下式决定:

$$s = y + r \sin(\omega_O t_m + \theta) \quad (8)$$

其中, r 及 θ 为旋转半径和角度的搜索参数, y 为旋转微动部件回波包络的正弦曲线中心搜索参数.

首先, 获取旋转微动中心位置 $y_{O'}$. 文献[11]提到正弦曲线包络在距离-慢时间域平面上对称分布, 通过判断微多普勒效应连续距离单元的中心位置, 从而确定 $y_{O'}$ 的估值 $\hat{y}_{O'}$. 本文通过在距离域搜索, 对 $s_R(s, t_m)$ 包

络进行逆-Radon 变换, 判断变换结果的最大值获取 $y_{O'}$ 的估值. 设距离域取值区间为 $[-s_{\max}, s_{\max}]$, 则 $\hat{y}_{O'}$ 通过下式确定:

$$\hat{y}_{O'} = \arg \max_{y_{\text{sea}}} \{ \text{IRT} \{ \text{mag} \{ s_R(s, t_m) \mid s \in [-s_{\max} + y_{\text{sea}}, s_{\max}] \} \} \} \} \quad (9)$$

其中, y_{sea} 为距离域搜索参数, 当 y_{sea} 为负, $s \in [-s_{\max}, s_{\max} - y_{\text{sea}}]$, $\text{mag} \{ \cdot \}$ 为信号包络, $\text{IRT} \{ \cdot \}$ 为逆-Radon 变换.

其次, 在距离-慢时间域提取位置为 (r, θ) 旋转微动散射点的回波分量. 假设搜索参数 (r, θ) 与旋转微动部件某个散射点 q' 的位置相同, 即 $r = r_{q'}$ 及 $\theta = \theta_{q'}$, $q' \in (1, 2 \cdots Q)$ 时, 根据式(8), $s = \hat{y}_{O'} + r \sin(\omega_O t_m + \theta)$, 对 $s_R(s, t_m)$ 进行旋转微动散射点回波分量提取的结果可表示为:

$$s_R(t_m) = s_{ri}(t_m) + s_{ro}(t_m) + s_{q'}(t_m) \quad (10)$$

其中,

$$\begin{aligned} s_{ri}(t_m) &= \sum_{p=1}^P \sigma_p B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s - y_p] \right\} \\ &\cdot \exp[j\Phi_p] \Big|_{s=\hat{y}_{O'}+r_{q'}\sin(\omega_O t_m+\theta_{q'})} \\ s_{ro}(t_m) &= \sum_{q \neq q'} \sigma_q B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s - y_{O'} - r_q \sin(\omega_O t_m + \theta_q)] \right\} \\ &\cdot \exp[j\Phi_q] \Big|_{s=\hat{y}_{O'}+r_{q'}\sin(\omega_O t_m+\theta_{q'})} \\ s_{q'}(t_m) &= \sigma_{q'} B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s - y_{O'} - r_{q'} \sin(\omega_O t_m + \theta_{q'})] \right\} \\ &\cdot \exp[j\Phi_{q'}] \Big|_{s=\hat{y}_{O'}+r_{q'}\sin(\omega_O t_m+\theta_{q'})} \\ &= \sigma_{q'} B \text{rect} \left(\frac{t_m}{T_{\text{CFI}}} \right) \exp[j\Phi_{q'}] \end{aligned}$$

$s_{ri}(t_m)$ 、 $s_{ro}(t_m)$ 和 $s_{q'}(t_m)$ 分别为刚体散射点、与搜索参数不同的旋转微动点及散射点 q' 的回波提取结果. $\text{rect}(t_m/T_{\text{CFI}})$ 为矩形窗函数, $t_m \in (0, T_{\text{CFI}})$.

由式(10)知, 在 $s = \hat{y}_{O'} + r_{q'} \sin(\omega_O t_m + \theta_{q'})$ 位置, $s_{q'}(t_m)$ 表达式中 sinc 函数完整取得了峰值; $s_{ri}(t_m)$ 几乎无法获得 sinc 函数的峰值, 因此, 刚体散射点回波得到有效抑制; 对于 $s_{ro}(t_m)$, 由于 $s_R(t_m)$ 在距离域 s 按距离分辨单元离散取值, 与散射点 q' 距离大于一个距离分辨单元的其他旋转微动点, $s_{ro}(t_m)$ 中 sinc 函数取值较小, 而和散射点 q' 位置临近的旋转微动点(即距离小于一个距离分辨单元), $s_{ro}(t_m)$ 中 sinc 函数取值较大, 从而影响到旋转微动散射点的成像分辨.

再次, 进一步对 $s_R(t_m)$ 乘以相位项因子 $\exp(j\Phi_{\text{DFM}})$, 从而实现对旋转微动散射点回波解正弦调频. 解正弦调频相位项 Φ_{DFM} 可表示为:

$$\Phi_{\text{DFM}} = \frac{4\pi}{\lambda} r \sin(\omega_O t_m + \theta) \quad (11)$$

其中, $r \neq 0$, $\omega_{O'}$ 可以通过时频分布、频谱分析及自相

关^[13]等方法进行准确估计,因此以下分析假定 $\omega_{O'}$ 为已知.仍假设 $r = r_{q'}$ 及 $\theta = \theta_{q'}$,则解正弦调频结果可表示为:

$$s_{\text{DFM}}(t_m) = s'_{ri}(t_m) + s'_{ro}(t_m) + s'_{q'}(t_m) \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} s'_{ri}(t_m) &= \sum_{p=1}^P \sigma_p B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s - y_p] \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left[j(\Phi_p + \Phi_{\text{DFM}}) \right] \Big|_{s=\hat{y}_{O'}+r_q \sin(\omega_{O'} t_m + \theta_q)} \\ s'_{ro}(t_m) &= \sum_{q \neq q'} \sigma_q B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s - y_{O'} - r_q \sin(\omega_{O'} t_m + \theta_q)] \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left[j(\Phi_q + \Phi_{\text{DFM}}) \right] \Big|_{s=\hat{y}_{O'}+r_q \sin(\omega_{O'} t_m + \theta_q)} \\ s'_{q'}(t_m) &= \sigma_{q'} B \text{Rect} \left(\frac{t_m}{T_{\text{CPI}}} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(y_{O'} + f_{O'} t_m + \frac{1}{2} \alpha_{O'} t_m^2 \right) \right] \end{aligned}$$

第一项为刚体回波解正弦调频项, $s'_{ri}(t_m)$ 在慢时间域为正弦调频及 LFM 的复合调制;第二项 $s'_{ro}(t_m)$ 表示与搜索参数不同的旋转微动散射点的解正弦调频结果,仍为正弦调频及 LFM 的复合调制.最后一项 $s'_{q'}(t_m)$ 为旋转微动散射点 q' 经过解正弦调频后的结果,在慢时间域为 LFM 信号.

对 $s_{\text{DFM}}(t_m)$ 在慢时间域进行时频分析, Winger-Vill 分布对 LFM 信号具有良好的时频聚集性,而 Winger-Vill 分布作为一种双线性变换,对正弦调频及 LFM 的复合调制信号不具有好的时频局域性^[14].本文利用 RWT 对 $s_{\text{DFM}}(t_m)$ 进行处理,从而获得 $s'_{q'}(t_m)$ 的良好能量积累,同时有效抑制 $s'_{ri}(t_m)$ 和 $s'_{ro}(t_m)$ 的影响,从而进一步消除刚体回波对成像影响,同时对位置相互临近的旋转微动点回波影响进行有效抑制.

综上所述,基于解正弦调频 RWT 的成像结果由下式表示:

$$I(r, \theta) = \max \left\{ \text{RWT} \left\{ s_R(s, t_m) \exp(j\Phi_{\text{DFM}}) \right\} \Big|_{s=y+r \sin(\omega_{O'} t_m + \theta)} \right\} \quad (13)$$

其中, y 值由式(9)确定,对 r 及 θ 参数搜索,可以获得各个位置的 RWT 结果最大值,当 r 及 θ 与旋转散射点位置相同时, RWT 结果取得峰值,反之, RWT 结果无法取得峰值.

3.2 成像误差分析和搜索步长选择

由 3.1 节可知,成像误差由 $y_{O'}$ 、 r 及 θ 的误差产生.假设它们误差分别为 $\delta y_{O'}$ 、 δr 及 $\delta \theta$,在提取旋转微动散射点回波分量及解正弦调频时, $\delta y_{O'}$ 、 δr 及 $\delta \theta$ 分别对距离-慢时间回波的包络和相位产生影响,下面对这种影响进行分析.

首先,解正弦调频造成的旋转微动散射点相位误差由 δr 及 $\delta \theta$ 产生,设 δr 和 $\delta \theta$ 引起相位误差分别为 $\delta \Phi_r$

和 $\delta \Phi_\theta$.由式(6)和式(11)知, $\delta \Phi_r = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r \sin(\omega_{O'} t_m + \theta)$, 当 $|\delta \Phi_r| < \pi/2$ 时,误差 $\delta \Phi_r$ 对 $s_{\text{DFM}}(s, t_m)$ 的 RWT 变换影响很小,因此满足如下条件时, δr 引起的相位误差可忽略.

$$|\delta r| < \frac{\lambda}{8} \quad (14)$$

同时, $\delta \Phi_\theta = \frac{4\pi}{\lambda} r [\sin(\omega_{O'} t_m + \theta + \delta \theta) - \sin(\omega_{O'} t_m + \theta)]$, 当 $|\delta \Phi_\theta| < \pi/2$ 时,误差 $\delta \Phi_\theta$ 对 $s_{\text{DFM}}(s, t_m)$ 的 RWT 变换影响很小,假设 $|\delta \theta| \ll \pi/2$,则有 $\delta \Phi_\theta \approx \frac{4\pi}{\lambda} r \cos(\omega_{O'} t_m + \theta) \delta \theta$, 因此, $|\delta \theta| < \lambda/(8r)$ 时, $\delta \theta$ 引起的相位误差可忽略; $\delta \theta$ 与参数 r 有关, r 越大, $\delta \theta$ 取值越小.而 r 减小, $\delta \theta$ 取值增大,可能不满足 $|\delta \theta| \ll \pi/2$ 的假设,因此,满足如下条件, $\delta \theta$ 引起的相位误差可忽略.

$$\begin{cases} |\delta \theta| < \lambda/(8r), & |r| > \Delta s \\ |\delta \theta| < B/(4f_c), & |r| \leq \Delta s \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\Delta s = c/2B$ 为距离分辨单元.

其次,在提取旋转微动散射点回波分量时,由式(8)知,距离域误差由 $\delta y_{O'}$ 、 δr 及 $\delta \theta$ 产生,假设分别为 $\delta s_{y_{O'}}$ 、 δs_r 和 δs_θ .由式(9)知, $\delta s_{y_{O'}}$ 在一个距离分辨单元之内,对回波包络影响可忽略;而由式(8)及式(14)知, δr 产生误差为 $|\delta r \sin(\omega_{O'} t_m + \theta)| \ll \Delta s$;再由式(8)及式(15)知, $\delta \theta$ 产生误差为 $|r \cos(\omega_{O'} t_m + \theta) \delta \theta| \ll \Delta s$.因此,距离域误差 $\delta s_{y_{O'}}$ 、 δs_r 及 δs_θ 在一个距离分辨单元之内,对 sinc 函数取值影响很小,距离域误差对回波包络影响可忽略.

由上分析, δr 及 $\delta \theta$ 满足式(14)和式(15)时,成像误差可忽略,因此,可确定 y_{sea} 、 r 及 θ 的搜索步长分别为:

$$\Delta y_{\text{sea}} = \Delta s, \Delta r = \lambda/8 \text{ 及 } \begin{cases} \Delta \theta = \lambda/(8r), & |r| > \Delta s \\ \Delta \theta = B/(4f_c), & |r| \leq \Delta s \end{cases}, \Delta r$$

和 $\Delta \theta$ 即为基于解正弦调频 RWT 成像的最佳分辨率.

4 目标刚体部件回波重建和成像

根据旋转微动部件的二维 ISAR 像 $I(r, \theta)$, 可以提取旋转微动散射点的位置,从而在目标距离-慢时间域回波 $s_R(s, t_m)$ 中去除旋转微动散射点回波分量,最后,对剩余回波进行刚体回波的重建并采用 RD 算法进行成像.

首先,可以采用以下步骤提取旋转微动散射点位置和 $f_{O'}$ 及 $\alpha_{O'}$ 的估值 $\hat{f}_{O'}$ 及 $\hat{\alpha}_{O'}$:

Step1 求 $I(r, \theta)$ 的最大值,并提取散射点位置 (r_q, θ_q) , 同时,根据式(13)知,在 RWT 结果最大值的位置对应 $f_{O'}$ 和 $\alpha_{O'}$ 的估值 $\hat{f}_{O'}$ 和 $\hat{\alpha}_{O'}$.由于 $f_{O'}$ 和 $\alpha_{O'}$ 对于所有旋转散射点相同, $\hat{f}_{O'}$ 和 $\hat{\alpha}_{O'}$ 只需一次估计.

Step2 使 $I(r_q \sim r_q + \Delta r, \theta_q \sim \theta_q + \Delta \theta) = 0$, 更新 I

(r, θ) .

Step3 返回 Step1, 直至 $I(r, \theta)$ 的最大值小于阈值.

其次, 去除旋转微动散射点回波分量. 根据旋转微动散射点位置 (r_q, θ_q) , 微动散射点在距离-慢时间域取值所处的距离单元 $s_0 \in (\hat{y}_{O'} + r_q, \hat{y}_{O'} - r_q)$, 根据式(7)知, 第 q 个旋转微动点在距离单元 s_0 的回波为:

$$s_q(s_0, t_m) = \sigma_q B \text{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [s_0 - y_{O'} - r_q \sin(\omega_{O'} t_m + \theta_q)] \right\} \cdot \exp(j\Phi_q) \quad (16)$$

对 $s_q(s_0, t_m)$ 进行相位补偿可得:

$$s_{\text{comp}}(t_m) = s_q(s_0, t_m) \exp(j\Phi_{\text{comp}}) \quad (17)$$

其中, 补偿相位项 $\Phi_{\text{comp}} = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{2} \hat{\alpha}_{O'} t_m^2 + r_q \sin(\omega_{O'} t_m + \theta_q) \right]$. 由式(16)和式(17)知, $s_{\text{comp}}(t_m)$ 为单频信号, 频点在 $f_{O'}$ 处. 因此, 在 $\hat{f}_{O'}$ 处进行频域滤波, 从而去除旋转散射点回波. 虽然 $s_{\text{comp}}(t_m)$ 为单频信号, 但其幅度受 sinc 函数的影响, 可以选择在 sinc 函数取得峰值的位置对 $s_{\text{comp}}(t_m)$ 进行频域滤波. sinc 函数取值主要集中在峰值位置, 其他位置取值很小, 本文选择 sinc 函数峰值位置的 $[-1, 1]$ 区间, 则慢时间 t_m 取值为: $\Gamma = \{t_m | -\Delta s < s_0 - y_{O'} - r_q \sin(\omega_{O'} t_m + \theta_q) < \Delta s\}$.

对于目标回波 $s_R(s_0, t_m)$, $t_m \in \Gamma$ 先进行相位补偿并在频域滤波, 再变换回时域:

$$s_{\text{fl}}(s_0, t_m) = \text{IFFT} \{ \text{FFT} [s_R(s_0, t_m) \exp(j\Phi_{\text{comp}})] \cdot \text{Win}(f) \} \quad (18)$$

其中, $\text{Win}(f) = \begin{cases} 0, & f_L < f < f_H \\ 1, & \text{other} \end{cases}$, $f_L < \hat{f}_{O'}, f_H > \hat{f}_{O'}$ 令 $s_R(s_0, t_m) = s_{\text{fl}}(s_0, t_m) \cdot \exp(-j\Phi_{\text{comp}})$, 从而更新 $s_R(s_0, t_m)$.

根据式(18), 去除所有旋转微动点回波分量, 并更新回波 $s_R(s, t_m)$. 直接对更新后的回波 $s_R(s, t_m)$ 进行 ISAR 成像会受到未完全去除的旋转微动分量的影响.

最后, 根据式(4)和式(5), 刚体回波为低调频率 LFM 信号, 本文基于 RWT 进一步重建刚体散射点回波并采用传统 RD 算法进行成像, 其步骤为:

Step4 对于目标所在每个距离单元回波 $s_R(s, t_m)$, 在 RWT 结果 $D(f_0, \alpha)$ 的最大值处获得刚体散射点初始频率 f_0 .

Step5 重建刚体散射点回波并记录, 从 $s_R(s, t_m)$ 频谱中滤除已估计的刚体散射点回波频谱, 变换到慢时间域并更新 $s_R(s, t_m)$.

Step6 重复 Step4 和 Step5, 当估计的刚体散射点回波能量小于阈值, 停止刚体回波提取.

Step7 对已提取的刚体散射点回波采用 RD 算法进行成像, 获得刚体部件的 ISAR 像.

基于 RWT 的旋转微动目标成像算法流程如图 2 所示. 对于目标具有多个旋转微动部件的情况, 首先逐个对旋转微动部件成像, 再在距离-慢时间域去除所有旋转微动散射点回波分量, 最后, 重建刚体散射点回波并对刚体部件成像.

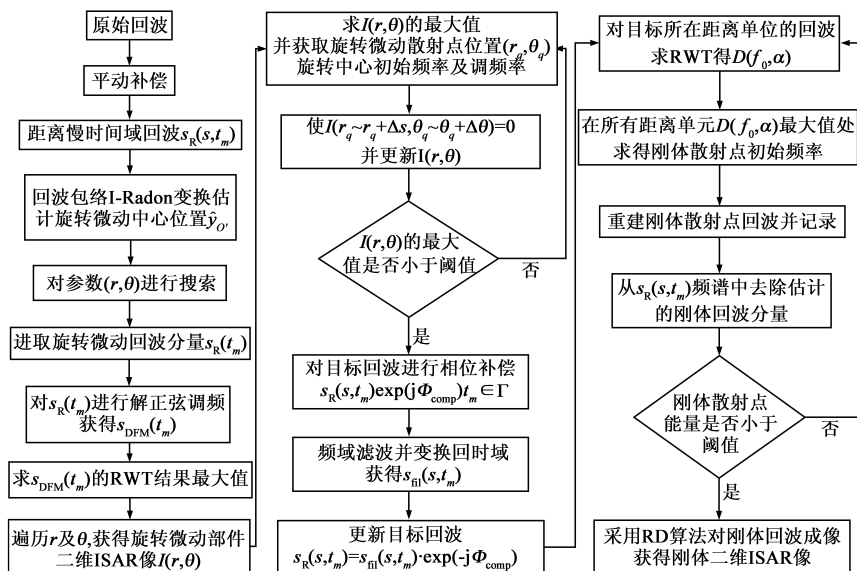


图2 基于RWT的旋转微动目标成像算法流程

5 仿真实验

雷达发射 LFM 信号, 系统参数设置为: 载频 f_c 为 10GHz, 带宽 B 为 1GHz, 脉冲重复频率 PRF 为 1kHz, T_{CPI} 为 0.511s, 即慢时间回波采样 512 次.

5.1 仿真 1

旋转微动目标散射点位置分布如图 3 所示. 12 个旋转微动散射点 ('*' 表示) 以目标转台成像中心为旋转微动中, 旋转微动频率为 6.67Hz, 即旋转微动角速度 $\omega_{O'} = 6.67 * 2\pi$ (rad), 散射点位置分别为 $(1.35, 0)$,

$(1.5, 0), (1.575, 0), (0, -1.35), (0, -1.5), (0, -1.575), (-1.35, 0), (-1.5, 0), (-1.575, 0), (0, 1.35), (0, 1.5), (0, 1.575)$. 5 个刚体散射点(‘ \circ ’表示)的转动频率为 0.04Hz,即目标转台转动角速度 $\omega_0 = 0.04$

$\times 2\pi(\text{rad})$, 散射点位置分别为 $(0.75, 0), (0, 0.75), (-0.75, 0), (0, -0.75), (0, 0)$. 旋转微动散射点的反射系数为刚体散射点的 8 倍.

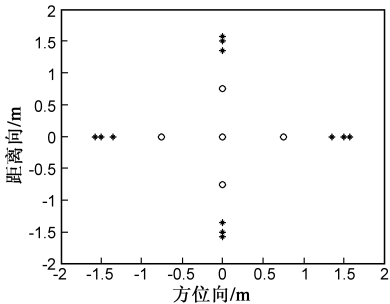


图3 旋转微动目标散射点位置

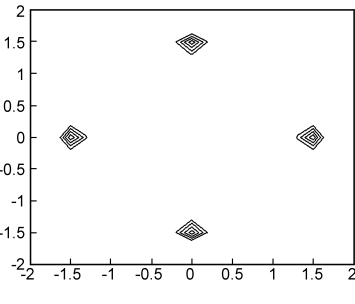


图4 旋转微动散射点逆-Radon成像结果

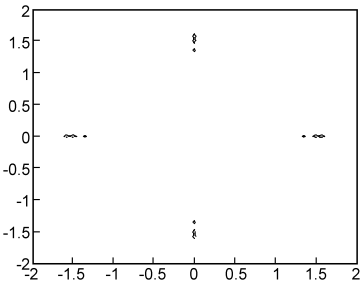


图5 本文方法成像结果

图 4 为旋转微动目标逆-Radon 成像结果,由于只利用目标回波在距离-慢时间域的包络信息进行成像,相互临近的三个旋转微动散射点成像结果为一个散射点;图 5 为本文基于解正弦调频 RWT 方法成像结果,相互临近的三个旋转微动散射点清晰可分辨,这与第 3 节的分析是一致的.比较图 4 和图 5 可知,本文基于解正弦调频 RWT 方法对旋转微动部件成像效果好于逆-Radon 变换方法,本文方法具有更高的成像分辨率,可以获得更加清晰的二维 ISAR 像.

5.2 仿真 2

仿真某型涡轮螺旋桨飞机如图 6 所示,飞机刚体部

件散射点以‘ \circ ’表示,机身左右两翼各有一个涡轮螺旋桨以‘ \ast ’表示.成像雷达参数设置如上.飞机原始回波加入复高斯白噪声,信噪比为 $\text{SNR} = -15\text{dB}$,其距离-慢时间像如图 7 所示,螺旋桨散射点散射系数一般约刚体的 5~8 倍^[11](本文假定螺旋桨散射系数为刚体的 6 倍),刚体回波比两个螺旋桨回波强度微弱得多.图 8 为飞机原始回波 RD 成像结果,旋转微动螺旋桨产生的微多普勒带分别在第 126~139 和 155~168 距离单元之间,旋转微动中心在第 133 和 161 个距离单元.飞机二维 ISAR 像受到两个螺旋桨微多普勒带的严重干扰,飞机 ISAR 像几乎不可辨识.

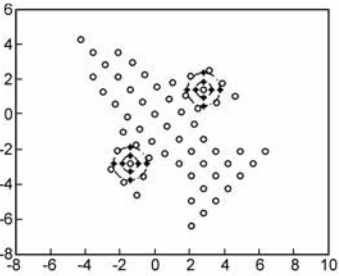


图6 某型涡轮螺旋桨飞机散射点模型

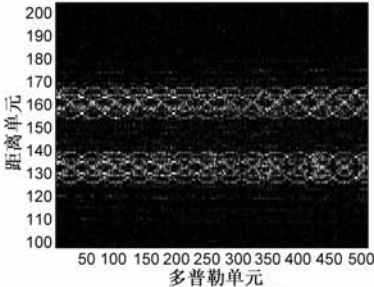


图7 目标距离-慢时间像

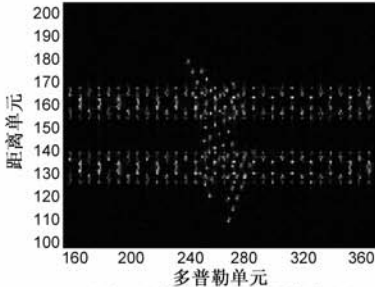


图8 原始回波RD成像结果

图 9 为飞机螺旋桨二维 ISAR 像,螺旋桨散射点清晰可分辨,其位置分布和图 6 相一致.本文基于解正弦调频 RWT 方法对旋转微动部件成像是有效的.

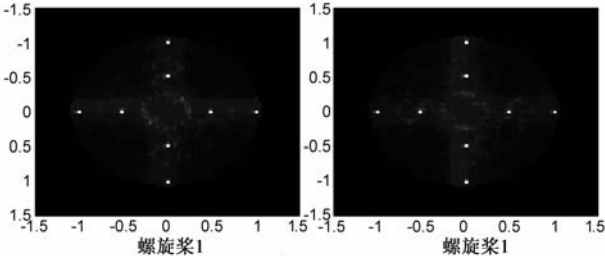


图9 飞机螺旋桨二维ISAR像

图 10 为目标回波去除螺旋桨回波分量后 RD 成像结果,两个螺旋桨产生的微多普勒带干扰基本去除,虽

然处于两个微多普勒带的少数刚体散射点散射强度被降低,但飞机二维像仍清晰可见.因此,第 4 节去除微动旋转回波分量的频域滤波方法是有效的.图 11 为重建刚体回波的 RD 成像结果,飞机二维 ISAR 像和图 6 中刚体散射点分布是一致的.

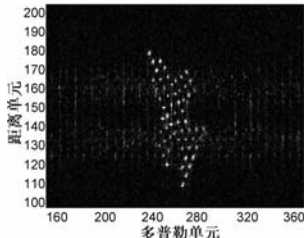


图10 去除螺旋桨回波的距离-慢时间像

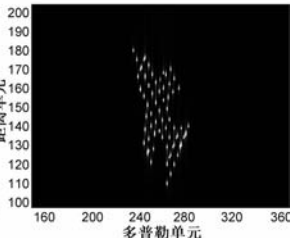


图11 去除螺旋桨回波的RD成像结果

从图 9 及图 11 可知,本文基于解正弦调频 RWT 方法对旋转微动部件成像,可以获得清晰的二维 ISAR 像;频域滤波消除旋转微动回波影响后,基于 RWT 重建刚体回波并进行 RD 成像获得了聚焦良好刚体二维 ISAR 像。

6 结束语

本文针对宽带雷达的旋转微动目标的二维 ISAR 成像问题,提出了基于解正弦调频 RWT 的旋转微动部件成像算法,利用逆-Radon 变换估计旋转微动中心,然后提取旋转微动散射点回波分量并进行解正弦调频,最后基于 RWT 获得旋转微动部件二维 ISAR 像;同时,进一步在距离-慢时间域进行频域滤波从而去除旋转微动散射点回波分量,基于 RWT 对刚体回波进行重建并利用 RD 算法对刚体部件进行成像.最终分别获得了目标旋转微动和刚体部件的聚焦良好的二维 ISAR 像.仿真结果表明本文算法的有效性。

参考文献

- [1] Victor C Chen, Fayin Li, Shen-Shyang, Hoharry Wechsler. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(1): 2 - 21.
- [2] Victor C Chen, F Li, S-S Ho, H Wechsler. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. IEEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271 - 276.
- [3] 庄钊文, 刘永祥, 黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520 - 525.
Zhuang Z W, Liu Y X, Li X. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520 - 525. (in Chinese)
- [4] Ljubisa Stankovic, Igor Djurović, 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] J Li, H Ling. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts[J]. IEEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 284 - 291.
- [6] Xing M D, Wang Q, Wang G Y, Bao Z. A matched-filter-bank-based 3-D imaging algorithm for rapidly spinning targets[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2106 - 2113.
- [7] Wang Q, Xing M D, Lu G Y and Bao Z. High resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(1): 22 - 31.
- [8] Bai X R, Xing M D, Zhou F, Bao Z. High-resolution three-dimensional imaging of spinning space debris[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2009 47(7): 2352 - 2362.
- [9] Li J, Qiu C W, Xing M D, Bao Z, Yeo T S. Time-frequency imaging algorithm for high speed spinning targets in two dimensions[J]. IET, 2010, 4(6): 806 - 817.

- [10] 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.
- [11] 白雪茹, 周峰, 邢孟道, 保铮. 空中微动旋转目标的二维 ISAR 成像算法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1937 - 1943.
Bai X R, Zhou F, Xing M D, Bao Z. 2D ISAR imaging algorithm for air micro-motion targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1937 - 1943. (in Chinese)
- [12] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 24 - 30.
Bao Z, Xing M D, Wang T. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005. 24 - 30. (in Chinese)
- [13] T Sato. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1999, 37(2): 1000 - 1005.
- [14] 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. 46 - 69.

作者简介



吴亮 男, 1983 年生于江西修水, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生. 主要从事 ISAR 成像及电子干扰对抗等领域的研究工作.
E-mail: liang915wu@163.com



魏玺章 男, 1976 生于河北吴桥, 博士, 副教授. 主要从事信息融合、雷达目标识别等领域的工作.
E-mail: liweiier@sina.com



黎湘 男, 1967 年生于湖南长沙. 工学博士, 国防科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员. 主要从事精确制导、信息融合、目标识别等领域的研究工作.
E-mail: xiangli@nudt.edu.cn

张旭峰 男, 1975 年生于湖南长沙. 工学博士, 国防科技大学讲师. 主要从事信息融合、目标识别等领域的研究工作.
E-mail: apollozxf@sina.com

凌永顺 男, 1937 年生于安徽定远. 解放军电子工程学院教授、博士生导师、工程院院士. 主要从事雷达/红外隐身及复合干扰技术等领域的研究工作。