

基于 FRFT-CLEAN 的机动目标逆合成孔径激光雷达成像算法

阮航* 吴彦鸿 叶伟
(装备学院 北京 101416)

摘要: 逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Ladar, ISAL)对机动目标成像时,其回波信号存在距离向色散和方位向多普勒时变的问题。对于机动性满足二阶运动近似的目标,分析了其 ISAL 回波信号特征,该文提出一种基于 FRFT-CLEAN 的 ISAL 成像算法。该算法利用分数阶 Fourier 变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)消除距离色散。在运动补偿后,利用 FRFT 并结合 CLEAN 技术(FRFT-CLEAN)实现对机动目标的方位成像。仿真实验证明了该方法的有效性。

关键词: 逆合成孔径激光雷达(ISAL); 机动目标; 分数阶 Fourier 变换; CLEAN 技术

中图分类号: TN957.52; TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)07-1540-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01423

Inverse Synthetic Aperture Ladar Imaging Algorithm for Maneuvering Target Based on FRFT-CLEAN

Ruan Hang Wu Yan-hong Ye Wei
(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: When imaging maneuvering target with Inverse Synthetic Aperture Ladar (ISAL), dispersion and Doppler frequency time-variation exist in the echo signal in range and cross-range direction, respectively. For targets of which the maneuverability can be approximated as a second-order motion, the characteristics of the ISAL echo signal are analyzed, and an imaging algorithm based on Fractional Fourier Transform (FRFT-CLEAN) is proposed. FRFT is used for range dispersion elimination. After motion compensation, a method combining FRFT and CLEAN technique (FRFT-CLEAN) is proposed for azimuth imaging. Simulation results demonstrate the validity of this algorithm.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Ladar (ISAL); Maneuvering target; Fractional Fourier Transform (FRFT); CLEAN technique

1 引言

由于结合了相干激光技术和逆合成孔径技术,逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Ladar, ISAL)突破了衍射极限的限制,是理论上可以在数千公里距离上实现厘米级分辨率的唯一光学手段^[1]。ISAL 的上述优势使其得到了越来越广泛的关注。2002 年美国海军实验室实现了世界上第 1 个扫描式 2 维 SAL 系统^[2]。2011 年洛克希德马丁公司利用光纤激光器和脉冲式掺铒光纤放大器组成的实验设备进行了机载飞行实验并获取了 2 维图像^[3]。国内在该方面也开展了相关理论和实验研究,并取得了重要进展^[4,5]。

目前,对非合作目标 ISAL 成像算法的研究才刚起步。文献[6]和文献[7]分析指出,即使对于慢速

匀速运动目标,对目标 ISAL 成像时也存在距离色散的问题,并提出了基于重排维格纳分布(RSPWVD)的 ISAL 成像算法,通过估计运动速度构造补偿因子消除距离向色散。虽然 RSPWVD 方法能同时兼顾交叉项抑制和频率分辨率,但运算量较大,处理过程复杂,不利于 ISAL 对目标快速成像的要求。此外,对机动目标 ISAL 成像的研究,目前还未见有公开文献发表。ISAR 中的机动目标成像一般采用基于时频分析的方法,其必须在交叉项抑制、频率分辨率和运算效率三者中平衡^[8]。而由于 ISAL 在实现高分辨率的同时伴随着高采样率、大数据量,ISAR 中的机动目标成像算法在 ISAL 中的成像效率较低,不利于 ISAL 快速、实时成像。为此,本文提出了一种针对机动目标的 ISAL 成像算法。对于机动性满足二阶运动近似的机动目标,建立了其 ISAL 回波信号模型,分析了光外差探测回波信号的距离向色散效应和方位多普勒时变效应。首先利用分数阶 Fourier 变换(FRFT)进行距离压缩消除

2012-11-08 收到, 2013-01-18 改回

*通信作者: 阮航 dragonruan@zju.edu.cn

距离色散^[9], 在平动补偿后, 对方位向数据利用FRFT结合CLEAN技术实现方位成像。最后, 仿真实验的结果验证了本文方法的有效性。

2 ISAL 回波模型

假设ISAL通过发射超大带宽的线性调频激光信号实现距离向的高分辨, 其发射信号可表示为

$$s_t(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi k_r t^2) \quad (1)$$

其中

$$\text{rect}(t_k/T_p) = \begin{cases} 1, & |t_k| \leq T_p/2 \\ 0, & |t_k| > T_p/2 \end{cases}$$

T_p 为脉冲宽度, f_c 为发射信号载频, k_r 为调频斜率, t_k 为快时间, 也即脉冲内时间, t_m 为慢时间, 也即脉冲间时间, 满足全时间 $t = t_k + t_m$ 。

当满足远场近似条件时, 在 $t = t_k + t_m$ 目标 P 点离雷达距离 $R_p(t_k, t_m)$ 为

$$R_p(t_k, t_m) \approx R_0(t_k, t_m) + x_p \sin \theta(t_m) + y_p \cos \theta(t_m) \quad (2)$$

式(2)中由于脉冲持续时间很短, 因此忽略了快时间转动分量的影响, 且有

$$R_0(t_k, t_m) = R_0 + v_0(t_k + t_m) + \frac{1}{2!} a(t_k + t_m)^2 + \dots \quad (3)$$

$$\theta(t_m) = \omega t_m + \frac{1}{2!} \Omega t_m^2 + \dots \quad (4)$$

式(3)中, R_0 为雷达到目标参考点的初始距离, v_0 为雷达视线方向初始速度, a 为加速度。式(4)中, ω 为转动角速度, Ω 为转动角加速度。事实上, 考虑到常规目标运动时具有较大的惰性, 以及ISAL很短的成像时间(小于1s), 在此可只考虑机动目标的二阶运动分量, 即

$$R_0(t_k, t_m) = R(t_m) + v(t_m)t_k + \frac{1}{2} a t_k^2 \quad (5)$$

$$\theta(t_m) = \omega t_m + \frac{1}{2} \Omega t_m^2 \quad (6)$$

其中 $v(t_m) = v_0 + a t_m$, $R(t_m) = R_0 + v_0 t_m + a t_m^2 / 2$ 。

因此, 式(2)可重写为

$$R_p(t_k, t_m) = \tilde{R}(t_m) + v(t_m)t_k + \frac{1}{2} a t_k^2 \quad (7)$$

其中满足

$$\tilde{R}(t_m) = R(t_m) + x_p \sin \theta(t_m) + y_p \cos \theta(t_m) \quad (8)$$

因此, P 点的回波信号可表示为

$$s_r(t_k, t_m) = \sigma_p \text{rect}\left[\frac{t_k - \tau}{T_p}\right] \cdot \exp[j2\pi f_c(t - \tau) + j\pi k_r(t_k - \tau)^2] \quad (9)$$

其中 σ_p 为回波信号幅度, 延时 $\tau = 2R_p(t_k, t_m)/c$ 。

ISAL采用光外差相干探测接收回波信号。若以目标质心为参考点, 假设参考距离 R_{ref} , 对应的延

时 $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/c$, 则参考信号为

$$s_{\text{ref}}(t_k, t_m) = \text{rect}\left[\frac{t_k - \tau_{\text{ref}}}{T_p}\right] \cdot \exp\left[j2\pi f_c(t - \tau_{\text{ref}}) + j\pi k_r(t_k - \tau_{\text{ref}})^2\right] \quad (10)$$

经过光外差探测后的信号为

$$\begin{aligned} s(t_k, t_m) &= s_r(t_k, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(t_k, t_m) \\ &= \sigma_p \text{rect}\left[\frac{t_k - \tau}{T_p}\right] \exp[j2\pi f_c(\tau_{\text{ref}} - \tau)] \\ &\quad \cdot \exp[j2\pi k_r(\tau_{\text{ref}} - \tau)t_k] \\ &\quad \cdot \exp[-j\pi k_r(\tau_{\text{ref}} - \tau)^2] \end{aligned} \quad (11)$$

将式(9), 式(10)代入式(11)中, 可得

$$\begin{aligned} s(t_k, t_m) &= \sigma_p \text{rect}\left[\frac{t_k - \tau}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi(P_0 + P_1 t_k \right. \\ &\quad \left. + P_2 t_k^2 + P_3 t_k^3 + P_4 t_k^4)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中, 包络将出现时间上的展缩, 但不影响对距离向相位色散的分析, 在此不对其进行讨论。 P_0, P_1, P_2, P_3 和 P_4 分别为

$$P_0 = -2f_c \frac{\tilde{R}(t_m) - R_{\text{ref}}}{c} + 2k_r \frac{\tilde{R}(t_m)^2 - R_{\text{ref}}^2}{c^2} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= -2f_c \frac{v(t_m)}{c} + 4k_r \frac{\tilde{R}(t_m)v(t_m)}{c^2} \\ &\quad - 2k_r \frac{\tilde{R}(t_m) - R_{\text{ref}}}{c} \end{aligned} \quad (14)$$

$$P_2 = -\frac{af_c}{c} + 2ak_r \frac{\tilde{R}(t_m)}{c^2} + 2k_r \frac{v(t_m)^2}{c^2} - 2k_r \frac{v(t_m)}{c} \quad (15)$$

$$P_3 = 2ak_r \frac{v(t_m)}{c^2} - \frac{ak_r}{c} \quad (16)$$

$$P_4 = k_r a^2 / 2c^2 \quad (17)$$

3 回波信号多普勒特性分析

3.1 脉冲内多普勒特性及其对距离像展宽的影响

从之前分析可知, 当目标机动近似为二阶运动时, 经外差探测后的ISAL回波信号存在高阶相位分量, 利用传统DFT进行距离压缩将产生距离像谱峰分裂和展宽, 下面针对这一现象进行分析。

式(12)相位项对快时间求导可得ISAL回波脉冲内多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_d(t_k, t_m) &= -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi(t_k, t_m)}{\partial t_k} \\ &= -[P_1 + 2P_2 t_k + 3P_3 t_k^2 + 4P_4 t_k^3] \end{aligned} \quad (18)$$

可见, 在某一方位时刻 t_m , 目标回波的脉冲内多普勒频率项由固定频率 P_1 , 线性调频项 P_2 , 高次非线性调频项 P_3 和 P_4 组成, 其中线性调频项 P_2 , 高次非

线性调频项 P_3 和 P_4 将使距离像产生展宽。假设脉冲持续时间为 T_p ，则对应的频谱分辨率为 $1/T_p$ 。因而脉冲内多普勒效应产生的频谱展宽可表示为

$$\Delta f_d = \Delta f_{d2} + \Delta f_{d3} + \Delta f_{d4} \\ = 2P_2T_p + 3P_3T_p^2 + 4P_4T_p^3 \quad (19)$$

假设发射信号带宽 $B = k_r T_p$ ，距离向分辨率 $\delta_r = c/2B$ ，由此产生的频谱单元展宽量为

$$\Delta N = \Delta f_d / (1/T_p) = 2P_2T_p^2 + 3P_3T_p^3 + 4P_4T_p^4 \\ = \Delta N_2 + \Delta N_3 + \Delta N_4 \quad (20)$$

$$\Delta N_2 = 2P_2T_p^2 \\ = \frac{T_p}{\delta_r} \left[\frac{-af_c}{k_r} - 2v(t_m) + \frac{2a\tilde{R}(t_m)}{c} + \frac{2v(t_m)^2}{c} \right] \quad (21)$$

$$\Delta N_3 = 3P_3T_p^3 = \frac{3T_p^2}{\delta_r} \left[\frac{av(t_m)}{c} - \frac{a}{2} \right] \quad (22)$$

$$\Delta N_4 = 4P_4T_p^4 = T_p^3 a^2 / \delta_r c \quad (23)$$

在此以带宽 $B = 150$ GHz，脉宽 $T_p = 100$ μ s，波长 $\lambda = 1.55$ μ m 为例对上述结果进行分析，此时距离分辨率 $\delta_r = 0.001$ m：

(1) ΔN_2 中加速度(第1项)和速度(第2项)对频谱展宽有影响，其中当速度 $v(t_m) > 5$ m/s 时就能产生1个单元的频谱展宽，影响十分明显，需在成像中补偿。在加速度足够大时， ΔN_2 随慢时间不同，其频谱展宽也不同，在成像时需在每个方位时刻逐一补偿；

(2) 对大多数目标， ΔN_3 第1项由于 $c \gg av(t_m)$ 且 $T_p^2 \ll \delta_r$ ，因而可忽略。第2项只有当 $a > 10^4$ m/s² 时才会有影响。因此在大多数情况下，认为三次非线性调频分量对距离像展宽的影响可以忽略；

(3) 由于 $T_p^3 a^2 \ll \delta_r c$ ，因此 ΔN_4 可忽略。

综上所述可知，经过光外差探测后的机动目标 ISAL 回波信号可近似为调频斜率相同的多分量线性调频信号。因此，式(12)可近似为

$$s(t_k, t_m) \approx \sigma_p \text{rect} \left[\frac{t_k - \tau}{T_p} \right] \\ \cdot \exp \left[j2\pi (P_0 + P_1 t_k + P_2 t_k^2) \right] \quad (24)$$

3.2 方位多普勒特性分析

为便于分析，在此假设已完成距离压缩和平动补偿，并转换成以目标质心为参考点的平面转台模型，则同一距离单元子回波信号可表示为

$$\hat{s}_p(t_m) = \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (x_p \sin \theta(t_m) + y_p \cos \theta(t_m)) \right] \quad (25)$$

其中 λ 为发射信号波长。

由于激光波长极短，ISAL 实现高分辨只需很小的相对转角。由式(6)及小转角条件，对式(25)求导

可得多普勒频率为

$$f_{da}(t_m) \approx f_{da}(x_p, t_m) + f_{da}(y_p, t_m) \quad (26)$$

$$f_{da}(x_p, t_m) = -\frac{2}{\lambda} (\omega + \Omega t_m) x_p \quad (27)$$

$$f_{da}(y_p, t_m) = \frac{2}{\lambda} \left(\omega^2 t_m + \frac{3}{2} \omega \Omega t_m^2 + \frac{1}{2} \Omega^2 t_m^3 \right) y_p \quad (28)$$

当角加速度引起的角速度变化量小于初始角速度时，即 $\Omega T_{sa} < \omega$ 时，式(28)可近似为一阶曲线^[10]：

$$f_{da}(y_p, t_m) \approx \frac{2}{\lambda} (K_d t_m - \psi_0) y_p \quad (29)$$

$$K_d = \omega^2 + \frac{3}{2} \Omega \omega T_{sa} + \frac{3}{8} \Omega^2 T_{sa}^2 \quad (30)$$

$$\psi_0 = \frac{\Omega \omega T_{sa}^2}{16} \left(3 + \frac{\Omega}{\omega} T_{sa} \right) \quad (31)$$

其中 T_{sa} 为 ISAL 成像时间。此时式(26)可简化为

$$f_{da}(t_m) = k_a t_m + f_a \quad (32)$$

$$k_a = \frac{2}{\lambda} (K_d y_p - \Omega x_p), \quad f_a = -\frac{2}{\lambda} (\omega x_p + \psi_0 y_p) \quad (33)$$

因此，对于单散射点，其子回波为一 LFM 信号。多个散射点时，二阶运动近似的机动目标 ISAL 回波信号可近似为多分量的 LFM 信号：

$$\hat{s}(t_m) = \sum_{i=1}^I \sigma_i \exp \left[j2\pi \left(\phi_{0i} + f_{ai} t_m + \frac{1}{2} k_{ai} t_m^2 \right) \right] \quad (34)$$

其中 ϕ_{0i} 为常数， k_{ai} 与 f_{ai} 满足式(33)。

4 基于 FRFT 的 ISAL 成像算法

4.1 基于 FRFT 的距离向成像

分数阶 Fourier 变换的定义为^[11]

$$X_\alpha(u) = F^\alpha [x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) K_\alpha(u, t) dt \quad (35)$$

$$K_\alpha(u, t) = \begin{cases} \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp \left(j\pi \left((t^2 + u^2) \cot \alpha - 2ut \csc \alpha \right) \right), & \alpha \neq n\pi \\ \delta(u - t), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(u + t), & \alpha = (2n \pm 1)\pi \end{cases} \quad (36)$$

其中 $n = 1, 2, \dots$ 。FRFT 相当于信号的时频分布在旋转某角度后在频率轴上的投影。当旋转角度为 $\pi/2$ 时，FRFT 就变为传统的 Fourier 变换。

式(24)中，用 FRFT 代替 DFT 对光外差探测后的 ISAL 回波信号进行距离压缩，即有

$$S_\alpha(u, t_m) = \sigma_p A(u) \cdot \exp(j2\pi P_0) \\ \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect} \left[\frac{t_k - \tau}{T_p} \right] \exp \left[j2\pi (P_1 - u \csc \alpha) t_k \right] \\ \cdot \exp \left[j\pi (2P_2 + \cot \alpha) t_k^2 \right] dt_k \quad (37)$$

其中 $A(u) = \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp(j\pi u^2 \cot \alpha)$ 。当旋转角度 $\alpha = -\arccot(2P_2)$ 时(此时称为最优旋转角)，可得到

回波信号能量高度聚集的分数阶 Fourier 分布, 也即目标的 1 维距离像:

$$S_{\alpha}(u, t_m) = \sigma_p T_p A(u) \exp(j2\pi P_0) \cdot \text{sinc} \left[T_p \left(\frac{u}{\sin \alpha} - P_1 \right) \right] \quad (38)$$

其中 $A(u) = \sqrt{1 + j2P_2} \exp(-j2\pi P_2 u^2)$ 。

可见, 利用 FRFT 进行距离向压缩避免了进行速度补偿, 加之 Ozaktas 等人^[11]提出的分解型离散算法可借助 FFT 实现快速计算, 其计算复杂度为 $O(N \log_2 N)$ 。同时, 由于 FRFT 是一种线性变换, 不存在交叉项的影响, 且具有很高的时频分辨率。图 1 所示为利用 FRFT 进行距离向成像的原理图。

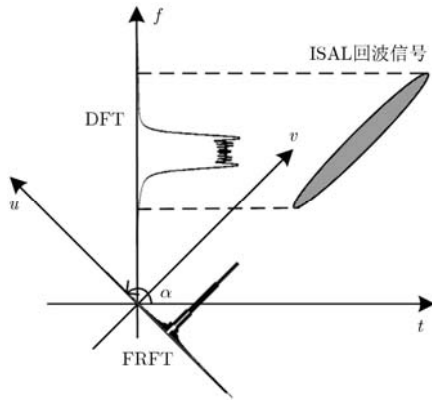


图 1 DFT 与 FRFT 实现距离压缩原理图

FRFT 旋转角度的取值是距离向压缩的关键。

由于实际中目标运动参数是未知的, 因此要通过搜索获取最优旋转角。在此可利用包络波形熵进行最优旋转角的估计。FRFT 变换的旋转角度越接近最优旋转角, 目标各散射点回波能量聚集性就越好, 包络波形熵也就越小。

假设某次回波在旋转角度 α_i 的 FRFT 变换后的实包络序列为 $|S_{\alpha_i}(u)| = |S_{\alpha_i}(1), S_{\alpha_i}(2), \dots, S_{\alpha_i}(N)|$, N 为距离采样点数, 则实包络熵定义为

$$H_{\alpha_i}(n) = -\sum_{n=1}^N p_{\alpha_i}(n) \ln[p_{\alpha_i}(n)] \quad (39)$$

其中 $p_{\alpha_i}(n) = |S_{\alpha_i}(n)| / \left(\sum_{n=1}^N |S_{\alpha_i}(n)| \right)$ 。

则最优旋转角取值为

$$\{\alpha\} = \arg \min_{\alpha} [H_{\alpha_i}(n)] \quad (40)$$

4.2 基于 FRFT-CLEAN 技术的方位成像

由前分析可知, 二阶运动的机动目标 ISAL 回波信号可近似为多分量的 LFM 信号, 如式(34)所示。在此仍可采用 FRFT 进行方位成像, 然而与距离向处理不同, 由于不同散射点子回波信号的调频斜率不同, 这里不能直接用 FRFT 同时获取所有目

标的方位像, 但可通过 FRFT 结合 CLEAN 技术实现对所有散射点方位像的分离。

在此将式(34)重写如下:

$$\hat{s}(t_m) = \hat{s}(\phi_{0l}, f_{al}, k_{al}, t_m) + \sum_{i=1}^{I, i \neq l} \hat{s}(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t_m) \quad (41)$$

其中 $\hat{s}(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t_m)$ 表示第 i 个子回波分量。

当旋转角度 α 与第 l 个散射点子回波的调频斜率满足 $\alpha = -\text{arc cot}(k_{al})$ 时, 对回波作 FRFT 可得

$$\hat{S}_{\alpha}(u) = \hat{S}_{\alpha,l}(u) + \sum_{i=1}^{I, i \neq l} \hat{S}_{\alpha,i}(u) \quad (42)$$

$$\hat{S}_{\alpha,l}(u) = A(u) \sigma_l \exp(j2\pi \phi_{0l}) \text{sinc} \left[T_p \left(\frac{u}{\sin \alpha} - f_{al} \right) \right] \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{\alpha,i}(u) &= A(u) \sigma_i \exp(j2\pi \phi_{0i}) \\ &\cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[j2\pi (f_{ai} - u \csc \alpha) t_m] \\ &\cdot \exp[j\pi (k_{ai} + \cot \alpha) t_m^2] dt_m \end{aligned} \quad (44)$$

其中 $A(u) = \sqrt{1 - j \cot \alpha} \exp(j\pi u^2 \cot \alpha)$ 。可见, 只有第 l 个散射点子回波分量可实现方位聚焦, 其他子回波分量则无法聚焦。聚焦后的子回波频谱峰值位置为 $u = f_{al} \sin \alpha$, 经 $u' = u / \sin \alpha$ 变标后便可获得该散射点的方位像。

实际中, 由于同一距离单元内各散射点强度相差很大, 强信号分量的存在会影响对弱信号分量的检测。在此, 可通过 CLEAN 技术在 FRFT 域从大到小实现强、弱信号分量的分离, 具体步骤如下:

(1) 分离第 i 个分量时, 以步长 $\Delta \alpha$ 对各旋转角度下的回波序列作 FRFT 并取模, 形成在分数阶 Fourier 分布平面 (α, u) 上的 2 维分布 $\hat{S}_i(\alpha, u)$:

$$\begin{aligned} \hat{S}_i(\alpha, u) &= \left[|F^{\alpha_0}(\hat{s}_i(t_m))|, |F^{\alpha_0 + \Delta \alpha}(\hat{s}_i(t_m))|, \right. \\ &\quad \left. \dots, |F^{\alpha_0 + M \Delta \alpha}(\hat{s}_i(t_m))| \right]^T \end{aligned} \quad (45)$$

其中 $\hat{s}_i(t_m)$ 为已分离前 $i-1$ 个分量的回波信号, α_0 为起始旋转角, M 为搜索步长个数, T 为转置运算。

(2) 在 (α, u) 2 维分布上进行峰值搜索, 用窄带滤波器将峰值点分离, 并将该峰值点作为第 i 个分量的横向聚焦像 $\hat{S}_{\alpha_k}^i(u)$:

$$\{\alpha_k, u_k\}_i = \arg \max_{\alpha, u} \left[|\hat{S}_i(\alpha, u)| \right] \quad (46)$$

$$\hat{S}_{\alpha_k}^i(u) = \hat{S}_i(\alpha_k, u) W_i(u) \quad (47)$$

其中 $W_i(u)$ 是以 u_k 为中心的窄带滤波器。

(3) 将(2)中滤波器带外部分做旋转角度为 $-\alpha_k$ 的 FRFT, 作为下一个目标分离的源信号,

$$\hat{s}_{i+1}(t_m) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{S}_i(\alpha_k, u) (1 - W_i(u)) K_{-\alpha_k}(u, t_m) du \quad (48)$$

(4) 重复以上步骤, 直至当前距离单元内所有点目标横向像被分离。

(5)对分离出的各散射点横向像作变标处理 $u' = u / \sin \alpha$ 并进行线性叠加, 便得到方位像。

对所有距离单元都采用以上方法, 并将结果按距离单元序号排列, 便可获取 2 维 ISAL 图像。对机动目标的 ISAL 成像算法流程如图 2 所示。

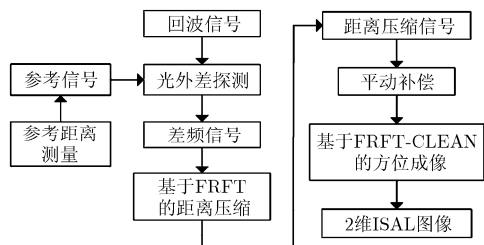


图 2 机动目标 ISAL 成像算法流程

5 仿真实验

仿真参数如下: ISAL 发射波长 $1.55 \mu\text{m}$, 带宽 150 GHz , 脉宽 $100 \mu\text{s}$, 距离采样点数为 256, 脉冲积累时间 0.155 s , 共积累 256 个脉冲。目标相对雷达的平动参数为: 初始速度 100 m/s , 加速度 30 m/s^2 ; 转动参数为: 角速度 0.005 rad/s , 角加速度 0.01 rad/s^2 。仿真中目标为缩小的 DC-10 飞机模型, 如图 3 所示。

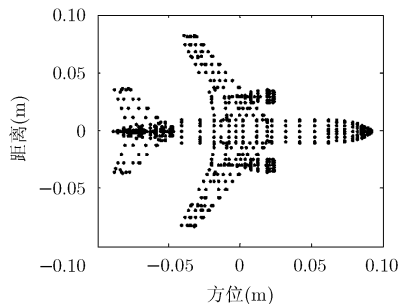


图 3 仿真点目标模型

图 4 为对第 100 次回波脉冲进行距离压缩的结果。图 4(a)中, 由于存在距离色散, 用 DFT 进行距离压缩出现了严重的距离像谱峰分裂和展宽, 实际上 DFT 等效为 $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$ 时的 FRFT。而采用旋转角度 $\alpha = 1.491 \text{ rad}$ 的 FRFT 进行距离压缩时, 包络波形熵最小, 此时获得了聚焦良好的 1 维距离像, 如图 4(b)所示。图 4(c)为搜索过程中包络波形熵的变化曲线, 其中, a, b 两点对应的旋转角度分别是 $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$ (即 DFT)和 $\alpha = 1.491 \text{ rad}$ 。对比图 4(a), 4(b)两图, 并结合图 4(c)分析可知, 若旋转角度越接近最优旋转角, 包络波形熵就越小, 此时距离像的聚焦程度也越好。上述分析表明基于 FRFT 的距离压缩方法是有效的。

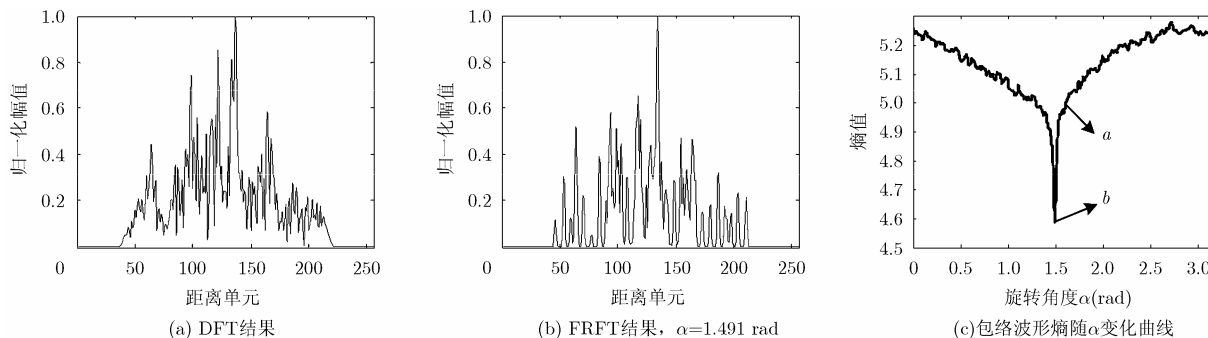


图 4 第 100 个脉冲的距离压缩结果

图 5 所示为在第 100 个距离单元方位子回波数据的平滑伪随机 Wigner 分布 (SPWVD)。可见, 二阶运动近似的目标点子回波可认为是调频斜率不同的多分量 LFM 信号, 其在时频图上表现为斜率不同的斜线。这之前理论分析一致。

图 6 所示为方位成像过程中, 在分数阶 Fourier 分布平面 (α, u) 对距离单元 100 的前 4 个最大峰值进行搜索及 CLEAN 处理的过程, 其中旋转角度 $\alpha \in [0, \pi]$ 。在图 6(a)~6(c)中, 强信号分量淹没了弱信号分量, 使得对弱信号分量的检测和提取存在很大困难。而图 6(d)中, 采用 CLEAN 技术对强信号分量由强到弱逐个分离之后, 对弱信号分量的检测能力显著提高。

图 7 所示为 2 维 ISAL 成像结果。图 7(a)为 RD 算法的成像结果, 在距离色散和方位多普勒时变共同作用下, 目标出现了严重的散焦。图 7(b)为距离

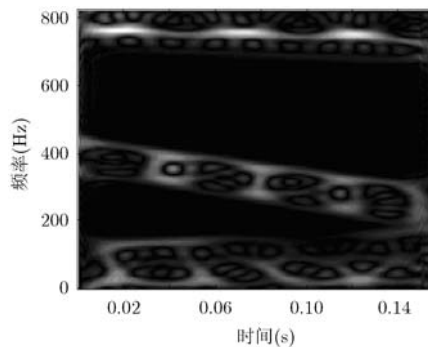


图 5 第 100 个距离单元子回波的 SPWVD

向 FRFT 压缩、方位向 DFT 压缩的结果，图中虽然距离像聚焦良好，但方位向由于多普勒时变的影响仍存在严重散焦，且横向距离到目标中心越远，散焦越严重。图 7(c)为距离向和方位向都采用 FRFT 压缩，但方位向未用 CLEAN 技术的结果。此时单个点目标聚焦良好，但由于强信号分量的旁

瓣淹没了弱信号分量，一方面，图像存在散射点的缺失，另一方面，提取的信号中有很大部分是强信号分量的旁瓣，并不能真实反映出目标上的散射点分布，导致无法对目标进行判读和识别。图 7(d)为采用本文方法的成像结果，图中目标点聚焦良好，结果正确，表明本文提出方法是有效的。

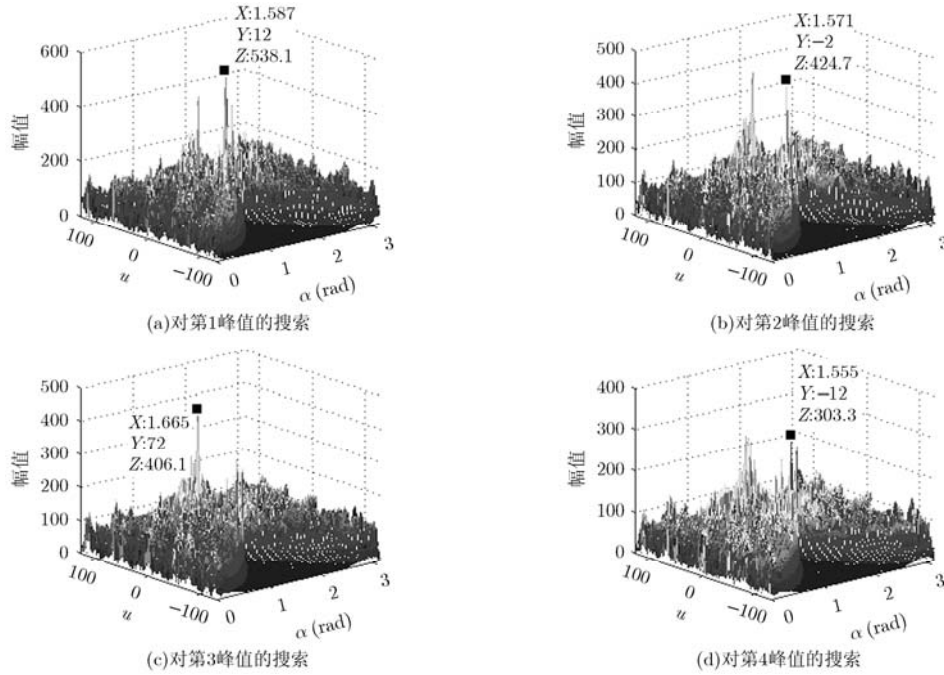


图 6 对距离单元 100 的前 4 个最强峰值的搜索过程

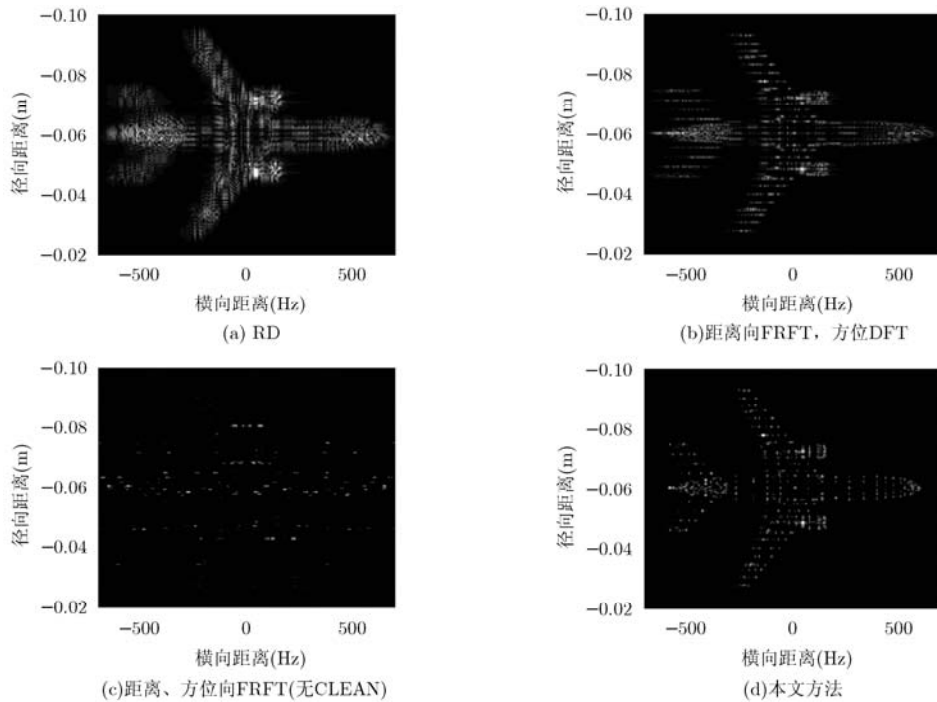


图 7 ISAL 2 维成像结果

6 结束语

ISAL 对机动目标成像时,传统的 RD 算法将产生严重的散焦,无法获取满意的图像。基于 ISAL 机动目标回波信号特征,本文提出了一种机动目标 ISAL 成像算法,当目标机动可近似为二阶运动时,利用 FRFT 可实现距离压缩,利用 FRFT-CLEAN 技术可实现方位成像,并最终实现对机动目标的高分辨 2 维成像。仿真实验验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 997-1000.
Liu Li-ren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 997-1000.
- [2] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [3] Krause B W, Buck J, Ryan C, *et al.* Synthetic aperture ladar flight demonstration[C]. Conference on Laser and Electro-Optics, Baltimore, 2011: 1-2.
- [4] Zhou Y, Zhi Y, Yan A, *et al.* A synthetic aperture imaging Ladar demonstrator with \varnothing 300 mm antenna and changeable footprint[C]. Proceedings of SPIE, 2010, 7818, DOI: 10.1117/12.859971.
- [5] 何劲, 张群, 邓冬虎, 等. 基于 ISAL 的含旋转部件目标成像及微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1284-1290.
He Jin, Zhang Qun, Deng Dong-hu, *et al.* Imaging and motion feature extraction for the targets with rotating parts in ISAL[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1284-1290.
- [6] 何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达成像算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1094-1100.
He Jin, Zhang Qun, Yang Xiao-you, *et al.* Imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging LADAR[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1094-1100.
- [7] 何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达高分辨成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1750-1755.
He Jin, Zhang Qun, Yang Xiao-you, *et al.* High resolution imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging LADAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1750-1755.
- [8] Lü X, Xing M, Wan C, *et al.* ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1): 141-153.
- [9] 尹治平, 张冬晨, 王东进, 等. 基于 FRFT 距离压缩的高速目标 ISAR 成像[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(9): 944-948.
Yin Zhi-ping, Zhang Dong-chen, Wang Dong-jin, *et al.* Range compression processing based on FRFT for ISAR imaging[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, 39(9): 944-948.
- [10] Li W C, Wang X S, and Wang G Y. Scaled Radon-Wigner transform imaging and scaling of maneuvering target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 2043-2051.
- [11] Ozaktas H M, Arikan O, Kutay M A, *et al.* Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(9): 2141-2150.

阮航: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为雷达成像、雷达对抗。

吴彦鸿: 男, 1971年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息获取与处理、信息对抗。

叶伟: 男, 1969年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息获取与处理、信息对抗。