

doi:10.3788/gzxb20154402.0228002

机动目标逆合成孔径激光雷达方位成像快速算法

王宏艳¹, 阮航², 吴彦鸿¹

(1 装备学院, 北京 101416)

(2 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要:针对逆合成孔径激光雷达对机动目标成像时存在方位多普勒时变的问题,提出了一种基于方位时频域 keystone 变换的机动目标逆合成孔径激光雷达方位成像快速算法.利用多分量线性调频子回波信号的调频斜率与起始频率的比值为常量这一特点,在方位时频域采用 keystone 变换将多分量线性调频信号同时转换为多分量单频信号,利用快速傅里叶变换实现方位聚焦.采用基于分数阶傅里叶变换和最小熵的线性调频参量估计方法,实现了对调频斜率与起始频率比值的精确、快速估计.结果表明,与现有的基于 Radon-Wigner 变换的距离-瞬时多普勒成像算法相比,所提出的算法成像效率大大提高,且能够保留更多的目标细节信息,适合于逆合成孔径激光雷达的实时成像.

关键词:逆合成孔径激光雷达;keystone 变换;匀加速转动;分数阶傅里叶变换;最小熵

中图分类号:TN958

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)02-0228002-6

Fast Azimuth Imaging Algorithm of Inverse Synthetic Aperture Ladar for Maneuvering Targets

WANG Hong-yan¹, RUAN Hang², WU Yan-hong¹

(1 *The Academy of Equipment, Beijing 101416, China*)

(2 *Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China*)

Abstract: The Doppler frequency time-variation exist in the received echo when imaging maneuvering targets by Inverse Synthetic Aperture Laser radar (ISAL). Based on a keystone transform in the azimuth time-frequency domain, a fast azimuth imaging algorithm of ISAL for maneuvering targets is proposed. Since the ratio of the chirp rate to the initial frequency is constant for all multicomponent linear frequency modulation subechoes in each range cell, all these multicomponent linear frequency modulation subechoes can be simultaneously transformed into multi-component single frequency subechoes by using the keystone transform in the azimuth time-frequency domain, and hence fast Fourier transform can be used for azimuth focusing. In addition, a precise and efficient method based on the fractional Fourier transform and the minimum entropy is proposed to estimate the ratio of the chirp rate to the initial frequency. Simulation results prove that, comparing with the range-instantaneous Doppler algorithm based on the Radon-Wigner transform, the proposed algorithm is more efficient and can preserve more information details of the target.

Key words: Inverse synthetic aperture ladar; Keystone transform; Uniformly accelerative rotating; Fractional Fourier transform; Minimum entropy

OCIS Codes: 120.0280; 280.3420; 280.5600; 280.6730

基金项目:国家高技术研究发展计划资助

第一作者:王宏艳(1978-),女,副教授,博士,主要研究方向为逆合成孔径激光雷达技术. Email:yhgnaw@163.com

收稿日期:2014-07-08;录用日期:2014-09-16

<http://www.photon.ac.cn>

0 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)二维分辨率在距离向具有很好的一致性,可在远距离上获取目标的高分辨图像^[1-3].与逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)一样,ISAL也是通过发射大带宽信号实现径向高分辨,利用目标相对雷达的等效转动产生的多普勒实现横向高分辨^[4].对比等效匀速旋转模型,如果目标做机动运动,其回波信号方位多普勒具有时变性,无法用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)实现方位聚焦^[5,6].

在 ISAR 成像中,机动目标的成像基于时频分析,包括联合时频(Joint Time-frequency, JTF)分布法^[7]、基于维格纳-威利分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)法^[8,9]、Radon-Wigner 变换(Radon-Wigner Transform, WVT)法^[10],以及其他基于多信号分量分解或提取的方法^[11-13].其中,JTF法需要对目标的运动参量进行搜索估计,运算量较大;WVD法必须在成像分辨率、交叉项抑制和运算效率三者中进行平衡;Radon-Wigner法及其他基于多信号分量分解或提取的方法都是通过对子分量的逐个估计或分离来实现高分辨成像,其运算量非常大,算法效率较低.而 ISAL 成像需要提取的子回波数量极大,以上方位成像算法在 ISAL 成像中的效率有限,不符合 ISAL 实时成像的要求.

机动目标的 ISAL 子回波可近似为多分量的线性调频(Multicomponent Linear Frequency Modulation, MLFM)信号,它们的调频斜率和起始频率的比值都可近似为转动角加速度与转动角速度的比值.基于此,本文在方位时频域采用 keystone 变换,将所有 MLFM 子回波同时转换为频率与散射点方位位置有关的单频信号,并用 FFT 实现方位聚焦.该方法避免了对子回波分量的逐个估计和分离,大大提高了成像速度,且不存在交叉项的影响.本文还给出了一种基于分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)和最小熵准则的转动角加速度和角速度比值的快速估计方法.仿真结果表明,本文方法可实现对机动目标的 ISAL 方位快速成像,且不存在目标细节信息的损失.

1 回波信号建模

成像几何关系如图 1.目标相对雷达运动可分解为平动分量和转动分量,其中平动分量为 $R_0(t)$, t 为方位慢时间,同时目标围绕参考点 O 旋转,转动角速度 $\omega(t)$, $R_0(t)$ 对方位分辨率没有贡献,需要在方位成像

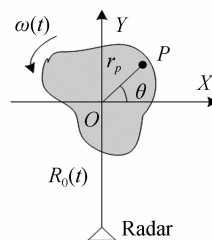


图 1 ISAL 成像几何

Fig. 1 ISAL imaging geometry

前补偿掉.由于 ISAL 距离分辨率很高,在对运动目标距离向成像过程中还存在距离像展宽的问题,需要进行速度补偿,相关方法见文献^[5].为简化分析和突出重点,假设距离压缩和平动补偿都已完成,此时,在距离单元 y 的回波表示为^[4-5]

$$s(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} (x_i \sin \theta(t) + y_i \cos \theta(t)) \right) \quad (1)$$

式中, N 为该距离单元内散射点的总数, (x_i, y_i) 为第 i 个散射点的坐标,且有 $y_i = y, i = 1, 2, \dots, N$. σ_i 为第 i 个散射点的回波幅值, λ 为激光信号波长, $\theta(t)$ 为 t 时刻的旋转角度.

对于机动目标, $\theta(t)$ 可以展开为

$$\theta(t) = \omega t + \frac{1}{2} \Omega t^2 + \frac{1}{6} \omega'' t^3 + \dots \quad (2)$$

式中, ω 为角速度, Ω 为角加速度, ω'' 为角加加速度.

考虑到 ISAL 成像时间极短(通常少于 1 s),同时对于机动并不十分剧烈的目标而言,式(2)可以只取到二次项,即

$$\theta(t) \approx \omega t + \frac{1}{2} \Omega t^2 \quad (3)$$

由于 ISAL 波长在微米量级,要实现毫米量级的成像分辨率,其需要的转动积累角在 mrad 量级,因此满足以下小角度近似条件,即

$$\sin \theta(t) = \sin \left(\omega t + \frac{1}{2} \Omega t^2 \right) \approx \omega t + \frac{1}{2} \Omega t^2 \quad (4)$$

$$\cos \theta(t) = \cos \left(\omega t + \frac{1}{2} \Omega t^2 \right) \approx 1 \quad (5)$$

将式(4)和(5)代入式(1)中,可得

$$s(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(x_i \omega t + \frac{1}{2} x_i \Omega t^2 + y_i \right) \right) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left(-j 2\pi \left(f_i t + \frac{1}{2} k_i t^2 \right) \right) \exp \left(-j \frac{4\pi y_i}{\lambda} \right) \quad (6)$$

式中, $f_i = 2x_i \omega / \lambda, k_i = 2x_i \Omega / \lambda$. 式(6)说明机动目标的 ISAL 子回波信号可视为 MLFM 信号.从式(6)不难发现,子回波信号的调频斜率 k_i 与起始频率 f_i 的比值为

$$K_{\omega} = k_i / f_i = \Omega / \omega \quad (7)$$

其只与转动参量有关,而与散射点的坐标无关.若目标上所有散射点的转动参量一致,则它们的子回波信号调频斜率和起始频率的比值也一致.

2 基于方位时频域 keystone 变换的方位快速成像算法

Keystone 变换在 ISAR 中被用于越距离单元徙动的校正^[14],可去除距离向频率对方位多普勒的耦合.本文在方位时频域采用 keystone 变换实现对机目标的方位快速成像.

将式(7)代入式(6)可得

$$s(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left(-j2\pi f_i \left(1 + \frac{1}{2} K_{\Omega_i} t \right) t \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi y_i}{\lambda} \right) \quad (8)$$

显然,第二个相位项为常量项,在之后的分析中可忽略.

对式(8)作变换

$$\left(1 + \frac{1}{2} K_{\Omega_i} t \right) t = \tau \quad (9)$$

得到

$$\tilde{s}(\tau) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left(-j2\pi f_i \tau \right) = \sum_{i=1}^N \sigma_i \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \omega x_i \tau \right) \quad (10)$$

从式(10)可见,通过式(9)变换之后,式(8)中的 MLFM 信号变为多分量单频信号,其信号频率为 $f_i = 2x_i \omega / \lambda$,与散射点的横向坐标和转动角速度有关.对于不同横向位置的散射点,由于变换之后单频信号的频率不同,因此可以通过 FFT 实现散射点的分离,完成对目标的方位成像.

式(9)变换原理如图 2.图 2(a)表示式(8)中 MLFM 信号在 $(f-t)$ 平面的时频分布,图 2(b)为通过式(9)变换得到的多分量单频信号在 $(f-\tau)$ 平面的时频分布.在图 2(a)中,信号采样点在 $(f-t)$ 平面是以矩形格式排列的,变换后信号采样点变为楔石形(keystone)格式,再通过插值成为矩形格式,使用 FFT 实现方位成像.值得注意的是,式(9)是对方位多普勒-方位慢时间平面进行的变换,而文献[14]中是在距离频域-方位慢时间平面的变换.

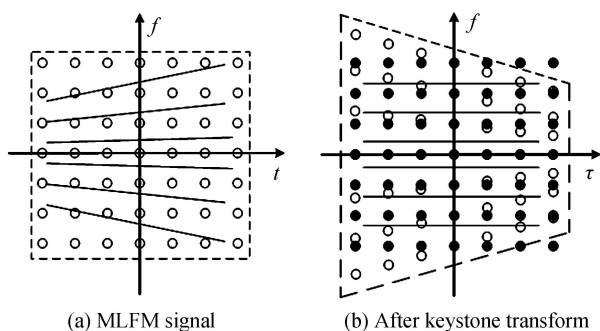


图 2 方位时频平面示意图

Fig. 2 Illustration in the azimuth TF domain

3 基于 FRFT 和最小熵的子回波信号参量估计方法

实现式(9)变换需要已知 K_{Ω_i} ,该值在对非合作目标成像过程中是未知的,需要预先对其进行估计.式(7)表示该比值是 MLFM 信号的调频斜率 k_i 与起始频率 f_i 的比值,因此,通过估计子回波 LFM 信号的调频斜率和起始频率来间接估计比值 K_{Ω_i} ,而无须对目标的转动参量进行估计,在一定程度上降低了参量估计的难度.由于 FRFT 对 LFM 信号具有很好的检测性能,本文采用 FRFT 对 K_{Ω_i} 进行估计.

分数阶 Fourier 变换的定义为^[15-16]

$$X_\alpha(u) = F^\alpha [x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) K_\alpha(u, t) dt \quad (11)$$

$$K_\alpha(u, t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} \exp \left(j \frac{t^2 + u^2}{2} \cot\alpha - jut \csc\alpha \right) & \alpha \neq n\pi \\ \delta(u-t) & \alpha = 2n\pi \\ \delta(u+t) & \alpha = (2n\pm 1)\pi \end{cases} \quad (12)$$

式中, $n=1, 2, \dots$. 当旋转角度为 $\pi/2$ 时, FRFT 就变为传统的 Fourier 变换.

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,当旋转角度满足 $\alpha = -\arccot(k_i)$ 时,就可得到回波信号能量高度聚集的分数阶 Fourier 分布.考虑到离散 FRFT 数值计算中的量纲归一化,此时峰值点的位置满足

$$\begin{cases} \tilde{f}_i = u \csc\alpha / T_{sa} \\ \tilde{k}_i = -(\cot\alpha) \cdot f_p / T_{sa} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\alpha = -\arccot(k_i)$, T_{sa} 为成像时间, f_p 为脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF), u 为峰值点在频率轴上的位置.

将式(13)代入式(7)可得

$$\tilde{K}_{\Omega_i} = \tilde{k}_i / \tilde{f}_i = -f_p \cos\alpha / u \quad (14)$$

为了减小估计值 \tilde{K}_{Ω_i} 与真实值 K_{Ω_i} 的误差,可以对多个距离单元中各自的最强点回波进行参量估计,并对获取的估计值 \tilde{K}_{Ω_i} 取平均以提高估计准确度.

由于 ISAR 成像分辨率很高,同一距离单元内散射点数量众多且强度存在差异,在利用 FRFT 进行参量估计中容易受到相邻散射点旁瓣的干扰,其参量估计准确度有限.为此,利用 FRFT 先对 K_{Ω_i} 进行粗估计,之后再利用最小熵准则进行精细搜索,以获取较为准确的 K_{Ω_i} .

假设 \tilde{K}_{Ω_i} 为 FRFT 获得的粗估计值,在此基础上设定一搜索区间为 $[\tilde{K}_{\Omega_i} - K, \tilde{K}_{\Omega_i} + K]$,步长为 ΔK ,共 L 个离散点.对第 l 个离散点 $K_{\Omega_i}^l$,假设利用方位时频域 keystone 变换获取的第 i 个距离单元的方位包络为

$|\tilde{s}_i(m)|_i$, 则熵值为

$$H(l) = - \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M p(i, m)_l \ln[p(i, m)_l] \quad (15)$$

$$p(i, m)_l = \frac{|\tilde{s}_i(m)|_i^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M |\tilde{s}_i(m)|_i^2} \quad (16)$$

式中, M 表示方位采样点总数. K'_{Ω_0} 越准确, 则经过式(9)中变换后获得的方位像聚焦越好, 因此, 式(15)计算出的熵值也就越小. 最终的估计值为

$$K'_{\Omega_0} = \arg \min_l [H(l)] \quad (17)$$

4 仿真试验

为验证本文所提出方法的有效性, 进行了仿真实验, 并与 Radon-Wigner 变换的距离-瞬时多普勒 (Range-Instantaneous-Doppler, RID) 成像方法进行了比较. 仿真参数为: 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, 回波信噪比 $\text{SNR} = 5 \text{ dB}$. 假设距离压缩和平动补偿已完成, 而目标的转动参数为: 角速度 0.005 rad/s , 角加速度 0.01 rad/s^2 , 角加加速度 0.006 rad/s^3 , 比值 $K_{\Omega_0} = 2$. 仿真中的飞机模型由 1 392 个散射点组成, 如图 3 所示. 仿真所用计算机为 Intel Core2 Duo CPU 2.2 GHz, 内存为 2 G.

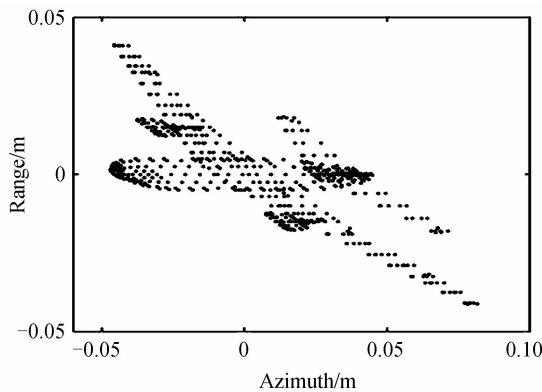


图 3 目标散射点模型
Fig. 3 Target model

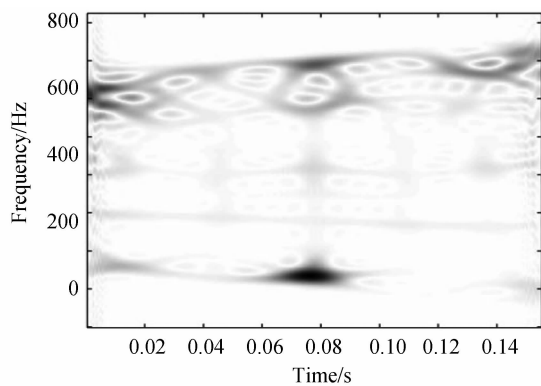


图 4 第 129 个距离单元回波时频分布
Fig. 4 The TF distribution of the 129th range cell

图 4 为对第 129 个距离单元回波的时频分布

图, 采用平滑伪维格纳-威利分布 (Smoothed Pseudo Wigner-ville Distribution, SPWVD). 可见, 由于 ISAL 成像时间很短, 即使目标存在角加加速度, 点目标子回波仍可近似为 LFM 信号.

仿真中在利用 FRFT 估计 K_{Ω_0} 时, 对最优旋转角度 α 的搜索步长设为 0.005π , 其中选择了四个距离单元的最强点分别进行估计, 并对其结果取平均值. 估计结果如表 1, 其平均值为 2.237 7. 图 5 为第 110 个距离单元在平面 $(u-\alpha)$ 的分布情况, 其中 $\alpha \in [0, \pi]$. 从图中可见, 由于受到相邻子回波旁瓣的影响, 利用 FRFT 估计 K_{Ω_0} 存在一定的误差.

表 1 FRFT 参量估计结果

Table 1 Parameter estimation results via FRFT			
(α, u)	$\tilde{k}_i/\text{Hz/s}$	\tilde{f}_i/Hz	\tilde{K}_{Ω_0}
(1.617 9, 41)	502.503 8	264.810 1	1.897 6
(1.602 2, 20)	334.864 7	129.096 0	2.593 9
(1.523 7, -38)	-502.503 8	-245.433 8	2.047 4
(1.508 0, -43)	-670.391 5	-277.967 9	2.411 8

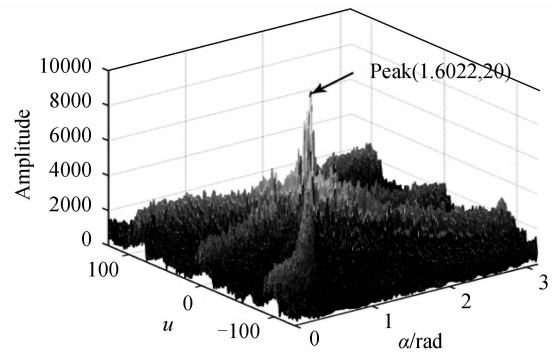


图 5 FRFT 在 $(u-\alpha)$ 平面分布
Fig. 5 FRFT results

为此, 采用最小熵方法对 K_{Ω_0} 做进一步精确估计. 仿真中将搜索区间设置为 $[2.237 7 - 1, 2.237 7 + 1]$, 步长设置为 0.02. 图 6 为获取的熵值变化曲线, 其中最小熵对应的 K_{Ω_0} 为 1.977 7, 这与真实值 $K_{\Omega_0} = 2$ 非常接近, 证明提出的估计方法是有效的.

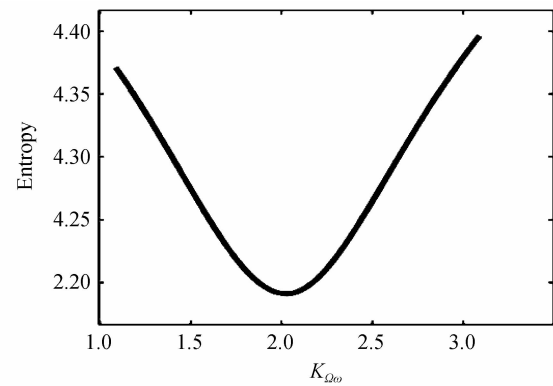


图 6 熵值变化曲线
Fig. 6 Entropy curve

图 7 为利用文中变换处理后第 129 个距离单元子

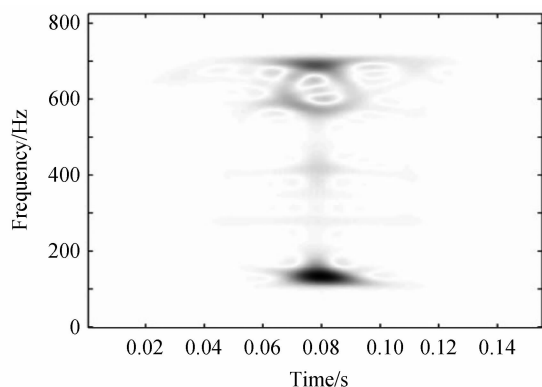


图7 变换后第129个距离单元回波时频分布

Fig. 7 The TF distribution of the 129th range cell after the proposed transform

回波信号的时频分布(采用 SPWVD). 对比图 4 和图 7 可见,本文所提出方法将 MLFM 信号转换为多分量单频信号.

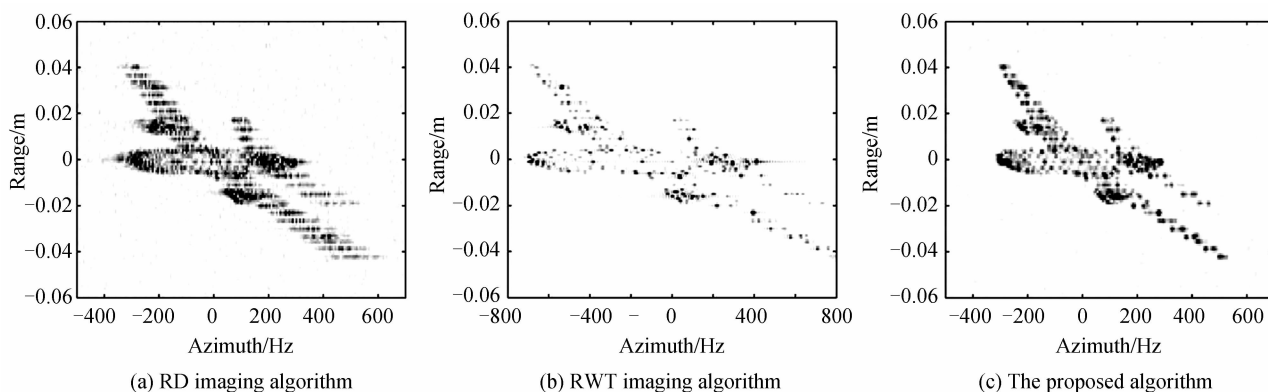


图8 ISAL 成像结果

Fig. 8 ISAL images

5 结论

对机动目标 ISAL 成像时,各距离单元子回波信号在慢时间可近似为 MLFM 信号,其调频斜率和起始频率的比值近似为一常量. 基于此特点,本文提出了一种机动目标 ISAL 方位成像快速算法,通过方位时频域 keystone 变换将方位时间域的 MLFM 信号同时转变为多分量单频信号,采用 FFT 实现方位聚焦. 该方法具有良好的实时性,且很好地保留了目标细节信息. 仿真实验验证了该方法的有效性.

参考文献

[1] RUAN Hang, WU Yan-hong, JIA Xin, *et al.* Inverse synthetic aperture radar imaging algorithm for spinning targets [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10):1238-1243.
阮航, 吴彦鸿, 贾鑫, 等. 自旋目标逆合成孔径激光雷达成像算法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(10):1238-1243.
[2] WU Jin. On the development of synthetic aperture radar imaging [J]. *Journal of Radars*, 2012, **1**(4):353-360.
吴瑾. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. *雷达学报*, 2012, **1**(4):353-360.
[3] KRAUSE B W, BUCK J, RYAN C, *et al.* Synthetic aperture

图 8 为对目标的 ISAL 成像结果,其中图 8(a)为距离-多普勒 (Range-Doppler, RD) 成像的结果,图 8 (b)为 RWT 的成像结果,图 8(c)为本文方法成像结果,且图 8(b)中 RWT 对 LFM 信号归一化调频斜率的搜索步长取为 0.005. 可见,对于机动目标, RD 成像的图像方位向存在严重散焦,且离参考中心横向距离越远的散射点,其散焦越严重. RWT 法和本文方法都能获取方位聚焦良好的 ISAL 图像,但 RWT 法的成像时间为 147.378s,而本文方法总共只需 5.079 s,其中 FRFT 粗估计的时间为 1.905 s,最小熵法精确估计的时间为 2.328 s,方位时频域 keystone 变换的时间为 0.846 s. 此外,对比图 8(a)和图 8(b)可见,本文方法保留了目标更多的细节信息. RWT 法由于需在所有距离单元都采用逐次消去法逐个分离回波分量,不仅效率低,而且存在弱分量丢失的问题,因而在 ISAL 中的应用效果并不理想.

ladar flight demonstration [C]. Conference on Laser and Electro-Optics, Baltimore, 2011: 1-2.

[4] LI G, ZHANG H, WANG X Q, *et al.* ISAR 2-D imaging of uniformly rotating targets via matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2012, **48** (2): 1838-1846.
[5] RUAN Hang, WU Yan-hong, YE Wei. Inverse synthetic aperture Ladar imaging algorithm for maneuvering target based on FRFT-CLEAN[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, **35**(7):1540-1546.
阮航, 吴彦鸿, 叶伟. 基于 FRFT-CLEAN 的机动目标逆合成孔径激光雷达成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, **35**(7): 1540-1546.
[6] WU L, WEI X Z, YANG D G, *et al.* ISAR imaging of targets with complex motion based on discrete chirp fourier transform for cubic chirps[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(10): 4201-4212.
[7] WANG Y, LING H, CHEN V C. ISAR motion compensation via adaptive joint time-frequency technique [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1998, **34** (2): 670- 677.
[8] LV X L, XING M D, WAN C R, *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] WANG Y, JIANG Y C. ISAR imaging of maneuvering target based on the L-Class of fourth-order complex-lag PWVD[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(3): 1518-1527.
- [10] BAO Zheng, WANG Gen-yuan, LUO Lin. Range-instantaneous doppler imaging in ISAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, **26**(12): 79-82.
保铮, 王根原, 罗琳. 逆合成孔径雷达的距离-瞬时多普勒成像方法[J]. *电子学报*, 1998, **26**(12): 79-82.
- [11] WANG Gen-yuan, BAO Zheng. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets based on chirplet decomposition[J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(9): 1534-1541.
- [12] WANG Y, JIANG Y C. ISAR imaging of a ship target using product high order matched-phase transform [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, **6**(4): 658-661.
- [13] WANG Y, JIANG Y C. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering target based on the product generalized cubic phase function [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(5): 958-962.
- [14] XING M D, WU R B, LAN J Q, *et al.* Migration through resolution cell compensation in isar imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, **1**(2): 141-144.
- [15] 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.
- [16] CLEMENTE C, SORAGHAN J J. Range Doppler and chirp scaling processing of synthetic aperture radar data using the fractional Fourier transform [J]. *IET Signal Processing*, 2012, **6**(5): 503-510.