

非均匀转动空间目标天基逆合成孔径激光雷达成像

阮航¹, 张强¹, 杨雨昂¹, 徐灿²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
2. 航天工程大学 航天指挥学院, 北京 101416)

摘要: 由于没有大气的影晌, 天基逆合成孔径激光雷达 (ISAL) 可在远距离上获取空间目标的高分辨率图像, 因此具有重要的应用前景。建立了空间目标天基 ISAL 成像的方位向回波信号模型, 在目标非均匀转动二阶近似下, 即匀加速转动时, ISAL 方位向回波信号可近似为调频斜率和起始频率各异的多分量线性调频 (MLFM) 信号, 采用传统的 FFT 方法难以实现方位图像聚焦。提出了一种基于 Radon-Wigner 变换的方位快速成像算法, 利用 Radon-Wigner 变换并结合逐次消去法, 在每个距离单元对回波中的 MLFM 信号由强至弱逐个进行估计, 将估计获取的峰值点直接提取并线性叠加, 即得到该距离单元的方位像。通过对所有距离单元进行上述处理, 即可获得二维 ISAL 图像。由于该方法在估计出 MLFM 信号后无需再进行瞬时多普勒成像处理, 因此减少了处理流程, 算法效率大幅提高。仿真试验表明, 相比传统的距离瞬时多普勒成像算法, 该算法平均处理时间从 222.66 s 降低至 23.51 s, 在低信噪比情况下图像中目标轮廓更显著, 更易于检测识别。

关键词: 天基逆合成孔径激光雷达; 空间目标; 方位回波信号; Radon-Wigner 变换
中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220406

Spaceborne inverse synthetic aperture lidar imaging of nonuniformly rotating orbit object

Ruan Hang¹, Zhang Qiang¹, Yang Yu'ang¹, Xu Can²

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;
2. School of Space Command, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Without the turbulence of atmosphere, spaceborne inverse synthetic aperture lidar (ISAL) can obtain high-resolution images of orbit objects at a long distance. Therefore, ISAL plays an important role in spaceborne imaging. The cross-range echo signal model of spaceborne ISAL is established. Generally, the motion of an orbital object is considered a second-order rotation after translational compensation, i.e. uniformly accelerated rotation. Under this condition, the ISAL cross-range echo signals can be equivalent to multicomponent linear frequency modulation (LFM) signals with various chirp rate and initial frequency. Therefore, it is difficult to obtain a well-focused image when using the traditional FFT method. A fast cross-range imaging algorithm based on Radon-Wigner transform is proposed. The Radon-Wigner transform combined with a successive elimination procedure are performed to estimate and separate the cross-range multicomponent LFM signals one by one from strong to weak, in each range unit. After prominent peak points are estimated and extracted in all range units, rearrangement is performed by linear superposition and a focused 2D ISAL image can be obtained. The proposed

收稿日期: 2022-06-15; 修订日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61906213)

作者简介: 阮航, 男, 副研究员, 博士, 主要从事合成孔径雷达成像、雷达图像解译等方面的研究。

method avoids to obtain signal parameters and conduct instantaneous Doppler imaging, which is simplified and greatly improved in efficiency. Simulation results show that, compared with the traditional range instantaneous Doppler imaging algorithm, the average processing time of the proposed algorithm is reduced from 222.66 s to 23.51 s. In the case of low signal-to-noise ratio, the target contour in the image is more significant and easier to detect and recognize.

Key words: spaceborne inverse synthetic aperture lidar; orbit object; cross-range echo signal; Radon-Wigner transform

0 引言

逆合成孔径激光雷达 (Inverse Synthetic Aperture Lidar, ISAL) 将相干激光技术和逆合成孔径技术相结合,可在远距离上获取目标的高分辨图像。由于 ISAL 为一种相干体制的激光雷达,其受大气影响较为严重,因而大气环境中的应用受到限制^[1]。天基 ISAL 由于摆脱了大气的影 响,可以发挥其全天时、全天候、远距离、高分辨快速成像的特点,而且可以探测微波段隐形的空间目标,因此在空间目标监视中有着强烈的应用需求和广阔的发展前景^[2-5]。

2018 年,美国空军发射了第四代空间态势感知试验技术验证卫星 EAGLE,开展了在地球同步轨道对其他 GEO 轨道目标的 ISAL 成像技术验证,据称相关验证的技术可能会用于下一代地球同步空间态势感知计划卫星^[6]。相比国外的实用化发展水平,当前国内还处于理论研究阶段。李道京^[7]提出了天基合成孔径激光雷达系统方案,并进行了主要性能指标的分析;李丹阳^[8]建立了天基合成孔径激光雷达成像理论数学模型,给出了对空间目标的成像处理流程;王德宾^[9]研究了地球同步轨道目标天基合成孔径激光雷达成像的数据处理方法;尹红飞^[10]基于二体运动卫星轨道模型分析了中高低轨卫星间合成孔径激光雷达成像的相对运动特性。文中将在上述研究的基础上,进一步研究具有非均匀转动空间目标的方位回波信号特性,并提出相关成像算法。

与逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 相同, ISAL 也是通过发射具有大带宽的信号实现径向高分辨率,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率^[11]。在成像过程中,目标相对雷达的运动可分为平动分量和转动分量。在对平动分量进行运动补偿后,目标相对雷达的运动可等效为一旋转模型。通常,在不考虑空间目标自身姿态

转动的情况下,利用轨道相对运动产生的相对转动分量可视为匀速转动,此时可利用传统的距离多普勒 (Range Doppler, RD) 算法,通过对方位向回波数据做 FFT 变换实现聚焦成像^[12]。实际当中,除由于沿轨道运动产生的目标相对雷达视线转动外,还可能存 在目标自身姿态的变化,在这二者的共同作用下产生方位成像所需的相对转动积累角。例如,姿态控制功能失效的故障卫星和空间碎片、根据任务需要正处于姿态调整过程中的航天器等空间目标,除轨道运动以外,还存在三维姿态运动。对于这些类型的空间目标,成像中目标旋转轴及成像投影平面都是变化的,使得其回波信号方位多普勒具有时变性。传统的 RD 算法采用 FFT (Fast Fourier Transform, FFT) 对方位向进行成像,由于方位多普勒是时变的,对方位时域信号进行 FFT 变换获取的图像将变得散焦^[13]。通常,对于这类目标的 ISAR 成像可采用基于时频分析的距离瞬时多普勒算法 (Range Instantaneous Doppler, RID)。其中,基于 WVD (Wigner Ville Distribution, WVD)^[14-15]的算法需要在抑制交叉项后进行精确参数估计,再对估计出的信号逐个进行瞬时多普勒成像。这类算法比较成熟,但存在运算量大、流程复杂的问题,当应用于空间目标天基 ISAL 成像时,需要进一步提升算法效率,以符合空间平台计算能力的约束,同时又满足对空间目标成像实时性要求。

针对上述问题,文中建立了空间目标天基 ISAL 成像方位向回波模型,研究了二阶转动近似条件下的回波特性,针对传统 RWT 方法运算量大、流程复杂的问题,提出了一种改进的天基 ISAL 成像算法,并进行了仿真成像。

1 方位回波信号特性分析

由于激光波长很短,其对空间目标的高速运动将

十分敏感,在对空间目标距离向成像过程中存在距离色散和越距离单元徙动(Migration Through Resolution Cells, MTRC)的问题。目前,对距离向回波信号特性和运动补偿的研究较多,例如,可以利用参考文献 [13] 中基于运动参数估计补偿的方法,或基于分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FrFT)的方法^[3]进行距离向成像,并在对回波信号预相干化处理后采用 keystone 变换补偿 MTRC。在完成距离压缩和平动补偿后,对空间目标的成像模型可转换为以目标质心为参考点的平面转台模型,如图 1 所示。

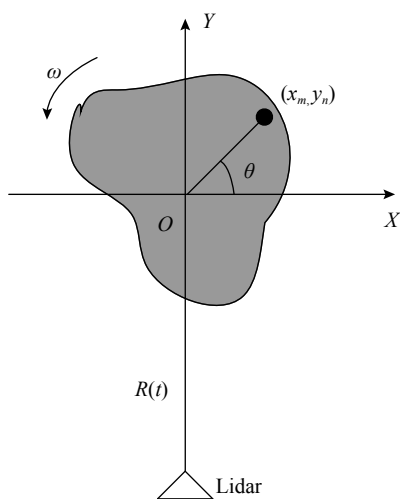


图 1 ISAL 成像转台模型

Fig.1 Rotating model of ISAL imaging

为简化分析,假设距离色散和越距离单元徙动都已补偿,此时,在距离单元 y 内的回波信号可表示为^[2]:

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

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, $y_i = y, i = 1, 2, \dots, N$; σ_i 为第 i 个散射点的回波幅值; λ 为信号波长; $\theta(t)$ 为 t 时刻的旋转角度。

对于空间目标,公式(1)中 $\theta(t)$ 可以表示为:

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

式中: ω 为角速度; Ω 为角加速度; ω'' 为角加加速度。

当天基 ISAL 相对空间目标运动存在较大加速度(如二者逆向交汇运动时),或空间目标自身存在不规则三维姿态转动时,二者等效旋转运动为非匀速转动,即存在角加速度甚至角加加速度。实际中,由于

ISAL 成像时间很短,通常可将目标的非均匀转动只考虑到二阶转动分量,也即可近似为匀加速转动:

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

ISAL 成像中,转动积累角通常在 mrad 量级,满足以下小角度近似条件:

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

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

因而,对公式(1)相位项求导可得多普勒频率:

$$\begin{aligned} f_{da}(t) &= -\frac{2}{\lambda} \left(x \cos \theta(t) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} - y \sin \theta(t) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \right) \approx \\ &= -\frac{2}{\lambda} (\omega + \Omega t) x + \frac{2}{\lambda} \left(\omega^2 t + \frac{3}{2} \omega \Omega t^2 + \frac{1}{2} \Omega^2 t^3 \right) y = \\ &= f_{da}(x, t) + f_{da}(y, t) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

$$f_{da}(x, t) = -\frac{2}{\lambda} (\omega + \Omega t) x \quad (7)$$

$$f_{da}(y, t) = \frac{2}{\lambda} \left(\omega^2 t + \frac{3}{2} \omega \Omega t^2 + \frac{1}{2} \Omega^2 t^3 \right) y \quad (8)$$

当相干积累时间 T_{sa} 内的角加速度产生的角速度变化量 ΩT_{sa} 小于起始角速度 ω 时,公式(8)可近似为^[12]:

$$f_{da}(y, t) \approx \frac{2}{\lambda} (K_d t - \psi_0) y \quad (9)$$

$$K_d = \omega^2 + \frac{3}{2} \Omega \omega T_{sa} + \frac{3}{8} \Omega^2 T_{sa}^2 \quad (10)$$

$$\psi_0 = \frac{\Omega \omega T_{sa}^2}{16} \left(3 + \frac{\Omega}{\omega} T_{sa} \right) \quad (11)$$

此时,公式(6)可简化为:

$$f_{da}(t) = k_a t + f_a \quad (12)$$

式中:

$$k_a = \frac{2}{\lambda} (K_d y - \Omega x) \quad (13)$$

$$f_a = -\frac{2}{\lambda} (\omega x + \psi_0 y) \quad (14)$$

因此,二阶转动近似的空间目标 ISAL 方位向回波信号可近似为调频斜率和起始频率都不相同的 MLFM 信号:

$$s(t) = \sum_{i=1}^I \sigma_i \exp\left(j 2\pi \left(\phi_{0i} + f_{ai} t + \frac{1}{2} k_{ai} t^2 \right)\right) \quad (15)$$

式中: ϕ_{0i} 为常数; k_{ai} 与 f_{ai} 分别满足公式 (13) 和 (14)。

2 基于 Radon-Wigner 变换的方位快速成像算法

二阶转动近似时, 空间目标 ISAL 回波可视为多分量线性调频信号, 如公式 (15) 所示。文献 [14] 中提出了基于 Radon-Wigner 变换的方法。由于多分量 LFM 信号在 Wigner 平面呈现为斜率不同的直线, 其在 Radon 变换后为变换域上的多个峰值点, 而它们的交叉项则散布开, 因而容易在 Radon 平面里将二者区分开, 在抑制交叉项后再变换回 Wigner 平面, 便得到表征各散射点分量瞬时多普勒的变化图。RWT 变换可采用解线频调 (Dechirping) 快速实现。此外, 考虑到多分量信号中存在强信号压制弱信号的问题, 通常 RWT 成像过程中采用逐次消去法由强至弱依次将信号检测出来, 之后再转至 WVD 平面获取瞬时多普勒图像。

实际上, 在对多分量 LFM 信号进行参数估计和分离的过程中, 当解线频调中参考信号的调频斜率与回波 LFM 信号调频斜率相匹配时, 解线频调后的信号即变为单频信号, 对其做 Fourier 变换便可对该回波信号实现方位压缩, 从而在变换域上形成峰值点, 起始频率又对应峰值点在坐标轴上的位置。因此, 该峰值点可视为目标在方位方向的成像, 而无需再将信号进行时频变换获取瞬时多普勒图像。相比于传统的时频分析方法, 该方法无需在检测出 LFM 信号后进行时频处理获取瞬时切片, 简化了处理步骤, 降低了运算量。

为推导上述处理过程, 将公式 (15) 重写如下:

$$s(t) = \sum_{i=1}^I s(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t) \quad (16)$$

式中: $s(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t)$ 表示第 i 个回波分量, 且 i 以信号强度大小排序。

假设信号 $s(t)$ 的 WVD 为 $W_s(t, \omega)$, 则 $s(t)$ 的 RWT 可从平面沿直线 L 积分求得:

$$D_s(\omega_0, m) = \int_L W_s(t, \omega) ds = \sqrt{1+m^2} \int_{-\infty}^{\infty} W_s(t, \omega_0 + mt) dt \quad (17)$$

信号 $s(t)$ 的 RWT 可直接通过对 $s(t)$ 解线频调的方式获得, 也即:

$$D_s(\omega_0, m) = \sqrt{1+m^2} \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp\left(-j\left(\omega_0 t + \frac{1}{2} m t^2\right)\right) dt \right|^2 \quad (18)$$

当 $\omega_0 = 2\pi f_{ai}$ 、 $m = 2\pi k_{ai}$ 时, 在平面 $\omega_0 - m$ 上该坐标处存在峰值点。

考虑到在实际成像中, 同一距离单元内将存在强度各异的多个散射点, 而强散射点的回波信号会影响对弱散射点回波信号的检测, 从而造成部分信息的丢失。为避免上述问题, 可采用逐次消去法由强至弱实现对各回波信号分量的分离。

对公式 (16) 作解线频调处理, 即:

$$\hat{s}_k(t) = s(\phi_{01}, f_{a1}, k_{a1}, t) \exp(-j\pi k t^2) + \sum_{i=2}^I s(\phi_{0i}, f_{ai}, k_{ai}, t) \exp(-j\pi k t^2) \quad (19)$$

当 $k = k_{a1}$ 时, 公式 (19) 中的第一项就变为 $s(\phi_{01}, f_{a1}, t) = \sigma_1 \exp(j2\pi(\phi_{01} + f_{a1}t))$, 即为单频信号, 在频域上的位置为 f_{a1} , 即由起始频率决定。而对于其他分量, 由于是对线性相加的信号乘以 $\exp(-j\pi k_{a1} t^2)$, 因而仍然保持线性相加的特性, 只是各分量的调频斜率改变了同一数值。

经过公式 (19) 的解线频调处理后, 对信号作 Fourier 变换便可实现对第一个回波信号分量在频域的聚焦, 而其他分量由于未能被正确解线频调因而为散开的宽谱。此时, 用窄带滤波器滤出第一个分量及其附近的窄谱, 便得到第一个回波分量的聚焦像, 剩余的分量经过 Fourier 反变换并乘以 $\exp(j\pi k_{a1} t^2)$ 可得到第一个分量基本消除的残留信号。重复上述过程, 逐一将各回波分量聚焦后的像滤出并进行线性相加, 便可实现方位成像。需要说明的是, 在滤波过程中虽然会影响到其他分量, 但由于滤波器带宽很窄, 对其他分量的影响很小。

为此, 文中提出的基于 Radon-Wigner 变换算法进行空间目标 ISAL 方位快速成像具体步骤如下:

第一步: 对于第 i 个分量, 设置步长 Δk , 根据公式 (19) 对回波序列作解线频调处理和 Fourier 变换, 形成在平面 $k - f$ 上的二维分布 $\hat{S}_i(k, f)$:

$$\hat{S}_i(k, f) = [\hat{S}_{k_0}(f), \hat{S}_{k_0+\Delta k}(f), \dots, \hat{S}_{k_0+n\Delta k}(f), \dots, \hat{S}_{k_0+N\Delta k}(f)]^T \quad (20)$$

式中: $\hat{S}_k(f)$ 为公式 (19) 中求得的信号 $\hat{s}_k(t)$ 的 Fourier

变换, 即 $\hat{S}_k(f) = F[\hat{s}_k(t)]$; k_0 为起始调频斜率; N 为搜索步长个数; T 为转置运算。

第二步: 在平面 $k-f$ 上搜索峰值点, 假设最大峰值点在平面上的坐标为 (k_i, f_i) , 用窄带滤波器分离峰值点, 则该峰值即为第 i 个分量的方位像 $S_{k_i}^i(f)$:

$$\{k_i, f_i\}_i = \arg \max_{k,f} [|\hat{S}_i(k, f)|] \quad (21)$$

$$S_{k_i}^i(u) = \hat{S}_i(k, f) W_i(f) \quad (22)$$

式中: $W_i(f)$ 是以 f_i 为中心的窄带滤波器。

第三步: 将第二步中滤波器带外部分作 Fourier 反变换并乘以 $\exp(j\pi k_i t^2)$, 作为下一个回波分离的源信号:

$$s_{i+1}(t) = F^{-1}[(1 - W_i(f)) \hat{S}_i(k, f)] \cdot \exp(j\pi k_i t^2) \quad (23)$$

第四步: 重复上述步骤, 当该距离单元内高于设定门限的所有峰值点都被分离即停止搜索;

第五步: 将所有分离出的峰值点进行线性叠加, 即获得该距离单元的方位像。

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, 便可获取二维 ISAL 图像。需要指出的是, 上述方法对回波信号的方位成像是与逐次消去处理过程同步完成的, 无需再对提取的 LFM 回波信号进行时频分析并获取瞬时多普勒图像, 这简化了处理流程, 一定程度上降低了运算复杂度。

3 仿真实验及分析

为简化分析又不失一般性, 考虑圆轨道时的情况。假设空间目标轨道高度 700 km, 天基 ISAL 对空间目标在同轨道面同向运动成像, 以二者与地心处于同一直线时为起始时刻, 如图 2 所示, 当轨道高度差分别为 100、50、20 km 时, 由于轨道运动带来的相对转动角速度变化如图 3 所示。可见, 相对转动角速度都约为 0.0015 rad/s。此外, 典型失效空间目标低速转动可达 0.0349 rad/s (2 (°)/s), 高速转动时可达每分钟 2 圈。上述空间目标自身三维姿态变化会造成目标旋转轴及成像投影平面变化, 从而引起相对转动角加速度。

综合考虑上述情况, 在成像时间内, 可将目标相对 ISAL 雷达的转动参数设置为: 相对转动角速度 0.0015 rad/s, 角加速度 0.015 rad/s²。在此基础上, 天

基 ISAL 成像参数设置如下: ISAL 发射波长 1.55 μm , 信号带宽 4 GHz, 信号脉宽 10 μs , 距离向采样点数 128, 脉冲积累时间 0.0138 s, 实验中共积累 1024 个脉冲, 回波信噪比 SNR=5 dB。目标模型由 610 个散射点组成, 如图 4 所示。

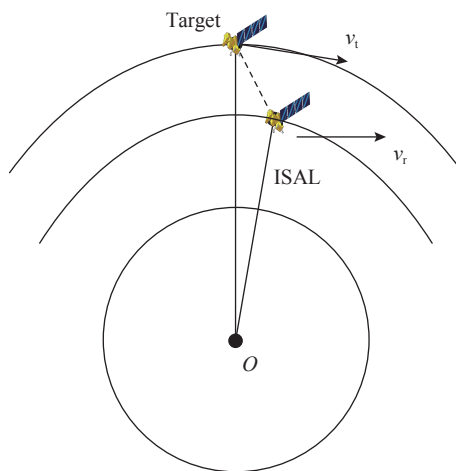


图 2 成像几何

Fig.2 Imaging geometry

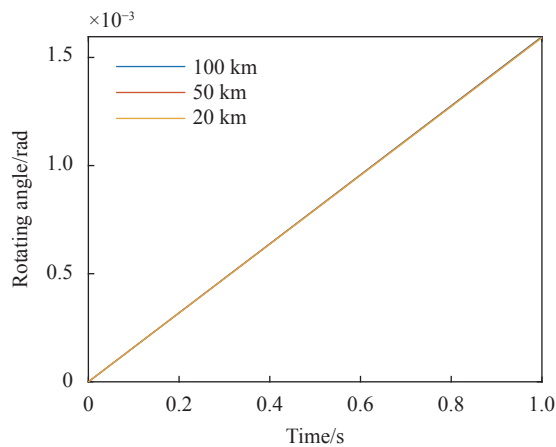


图 3 相对转动角度变化曲线

Fig.3 Curves of relative rotation angle

图 5 所示为第 30 个距离单元的方位回波数据的平滑伪 Wigner-Ville 分布 (Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution, SPWVD)。可见, 当目标存在非均匀转动分量时, 目标方位子回波信号可近似为多个不同调频斜率的 LFM 信号, 在时频图上即为斜率不同的斜线, 且其 WVD 分布存在明显的交叉项影响, 需要在成像中克服, 这之前的理论分析结果相同。

图 6 所示为二维 ISAL 成像结果。图 6(a) 为 RD 算法的成像结果, 由于回波方位多普勒存在时变性,

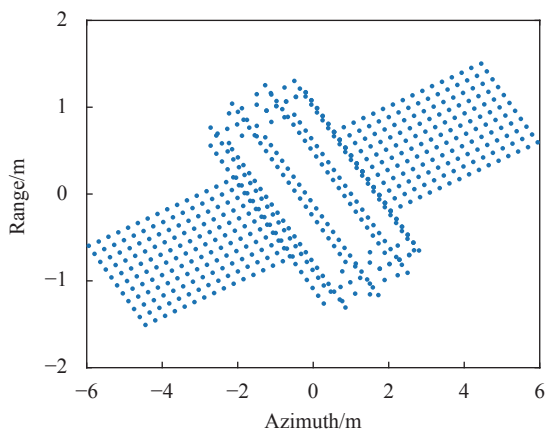


图 4 目标散射点模型

Fig.4 Target model of scattering point

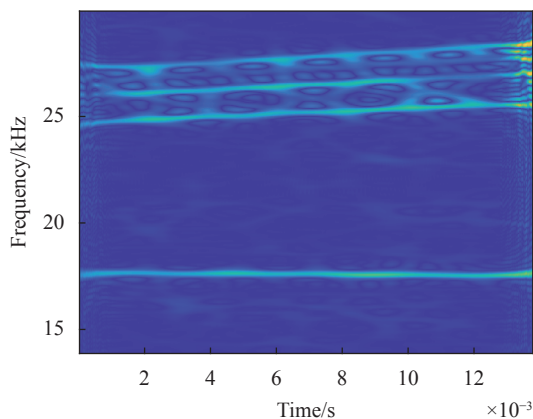


图 5 第 30 个距离单元回波的时频分布 (SPWVD)

Fig.5 The time-frequency distribution of the 30th range cell (SPWVD)

目标方位向出现了严重的散焦,且散射点横向离中心越远,散焦越严重。图 6(b)为采用基于 RWT 的 RID 方法获取的距离瞬时多普勒图像,从图中可见,所有中心、边缘的点目标都聚焦良好。图 6(c)为采用文中所提出算法得到的结果,图中所有中心、边缘的目标点同样聚焦良好,而且相比图 6(b),图像中目标各散射点更清晰,更利于判读和识别。

图 7 给出了信噪比分别为 0、-5、-10 dB 时,基于 RD、RWT 的 RID 方法和文中提出的 RWT 快速算法的成像结果。从图中可见,随着信噪比的降低,三种方法获取图像中的目标轮廓逐渐模糊,当 SNR=-5 dB 时,基于 RWT 的 RID 方法获取图像中目标的大部分边缘与背景噪声变得难以区分,但文中所提出方法获取图像的目标边缘仍较为清晰;当 SNR=-10 dB 时,RWT RID 方法图像中只可见若干强点,目标难以识别,而 RWT 快速方法图像仍可见目标轮廓,表明所

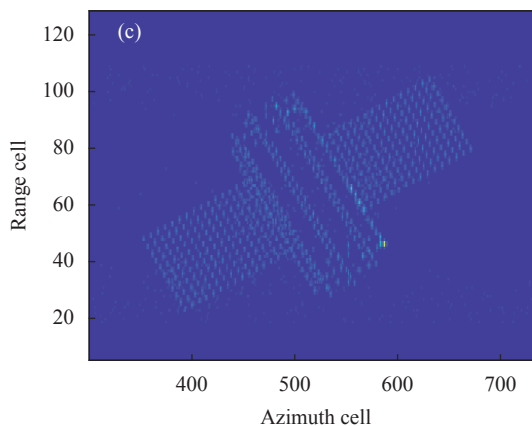
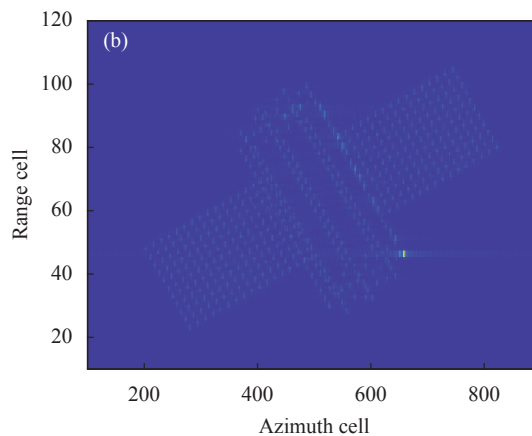
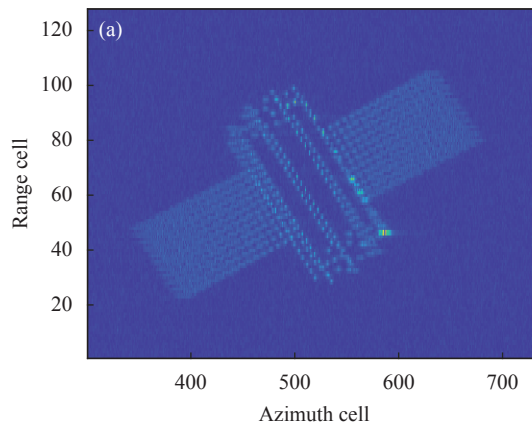


图 6 ISAL 二维成像结果 (信噪比 5 dB)。(a) RD 算法; (b) RID 算法; (c) 文中提出的 RWT 算法

Fig.6 ISAL 2D imaging results (SNR=5 dB) (a) RD algorithm; (b) RID algorithm; (c) The proposed RWT algorithm

提出的方法在低信噪比条件下仍具有较好的性能。此外,在相同条件下,通过蒙特卡洛仿真试验,基于 RWT 的 RID 算法平均成像时间为 222.66 s,而文中提出的 RWT 快速算法平均时间为 23.51 s,二者相差十倍,这是因为文中所提出算法避免了对每个估计出信号的 RID 成像,因此算法所消耗的时间大大降低,效

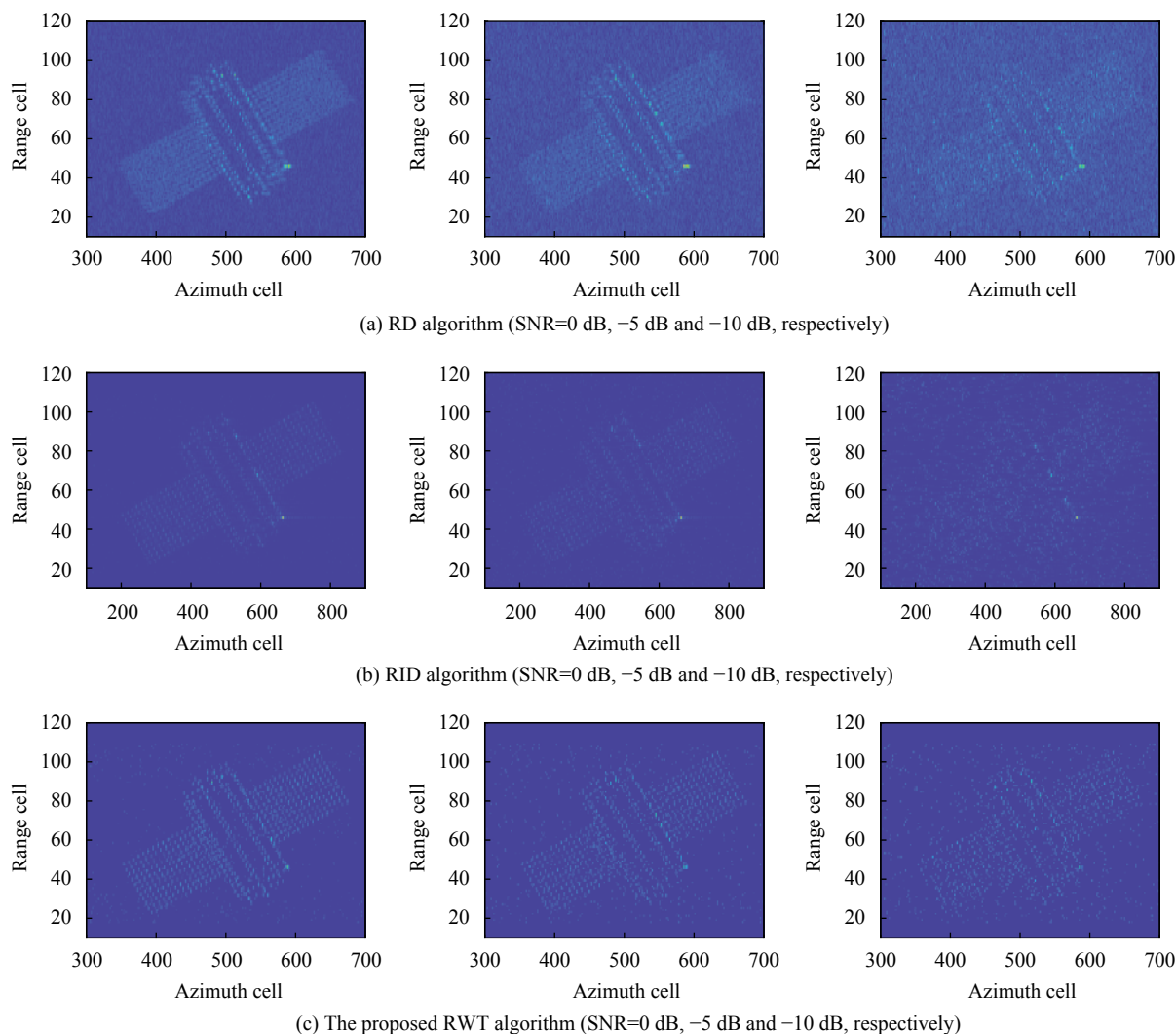


图 7 不同信噪比下的 ISAL 二维成像结果

Fig.7 2D ISAL imaging results in different SNR

率明显提高。

表 1 给出了不同信噪比条件下,采用 RD、基于 RWT 的 RID 以及文中所提出算法获取图像的对比度结果。可以发现,当信噪比较高时, RD 算法所获得图像的对比度最低,表明质量最差;文中所提出算法图像对比度与 RID 算法性能相当,甚至更优。随着信噪比的降低,三种算法获取图像的对比度相应降低,当

信噪比为-10 dB 时,文中所提出算法的对比度明显比基于 RWT 的 RID 算法更大,表明文中提出算法在低信噪比时的性能更好,更适合于对空间目标的远距离、低信噪比时的成像,也更有利于后期开展对目标的检测识别。

当目标不存在角加速度时的仿真结果如图 8 所示,对比度结果如表 2 所示。由于此时目标为匀速转

表 1 不同信噪比下的 ISAL 图像对比度

Tab.1 Contrasts of ISAL images in different SNR

Imaging algorithm	Contrasts					
	SNR=-10 dB	SNR=-5 dB	SNR=0 dB	SNR=5 dB	SNR=10 dB	SNR=15 dB
RD	0.546 4	0.631 5	0.859	1.253 1	1.744 8	2.266 8
RID	2.652	4.117 1	4.882 4	5.198 1	5.498 7	5.528 1
The proposed RWT	4.136 6	4.299 5	4.729 8	5.247 7	5.674 7	5.958

动, 图 8(a) 中 RD 成像算法可以获得很好的聚焦效果, 在低信噪比情况下也可保留较多的细节特征, 且算法平均成像时间为 0.011 s, 满足实时成像的要求, 但由于背景噪声的影响, 图片对比度相对最低。图 8(b) 和 8(c) 表明 RID 算法和文中提出的算法在均匀转动时也能够有很好的成像效果。其中, 在低信噪比情况

下, 相比 RD 算法, 由于采用了逐次消去法, RID 算法和文中所提出的算法存在细节特征的缺失, 但图像背景噪声大大降低, 因此对比度相比 RD 算法要高, 同时文中所提出算法相比 RID 算法的对比度明显更大, 再次表明文中提出算法相比 RID 算法在低信噪比时的性能更好。

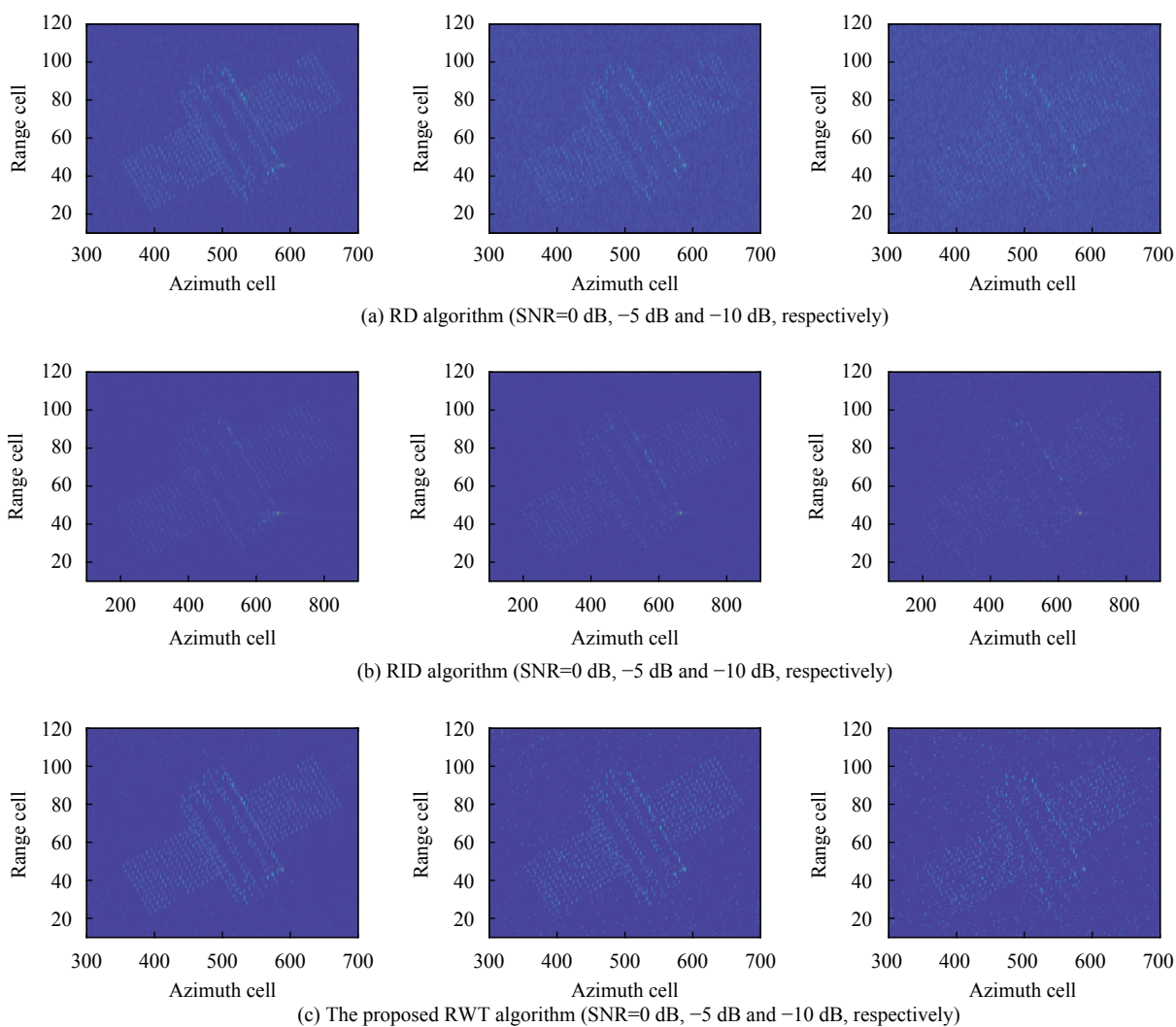


图 8 不同信噪比下的 ISAL 二维成像结果 (均匀转动时)

Fig.8 2D ISAL imaging results in different SNR (uniformly rotating)

表 2 不同信噪比下的 ISAL 图像对比度 (均匀转动时)

Tab.2 Contrasts of ISAL images in different SNR (uniformly rotating)

Imaging algorithm	Contrasts					
	SNR=-10 dB	SNR=-5 dB	SNR=0 dB	SNR=5 dB	SNR=10 dB	SNR=15 dB
RD	0.564 9	0.683 9	0.975 3	1.457 3	2.122 4	2.837 7
RID	2.602	3.760 4	5.298 9	5.457 9	5.781 6	5.769 8
The proposed RWT	4.127 9	4.360 7	4.929 8	5.477 9	6.021 8	6.294

4 结 论

文中建立了空间目标天基 ISAL 成像方位回波信号模型,研究了存在匀加速转动时的方位回波信号特性,针对回波信号可近似为多分量线性调频信号的特点,提出了一种基于 Radon-Wigner 变换的快速成像算法,在估计出信号参数后,无需进行瞬时多普勒成像,从而大幅降低了运算量,具有较高的成像效率。

仿真实验表明,在有相对转动角加速度情况下,文中所提出算法具有更优异的性能,更适合于对空间目标的远距离、低信噪比成像;在没有角加速度时,文中算法同样可获得较好的图像对比度,但传统的 RD 算法具有最高的成像效率。因此,在实际运用中,可根据目标相对转动情况和应用需求来选择对应的成像算法,以获得最好的图像对比度或者成像效率。

相对于天基成像平台对空间目标感知的实时成像要求,文中方法还有一定差距,后续将结合空间平台的实际计算能力,进一步优化算法流程,提升成像效率。

参考文献:

- [1] Song Z, Mo D, Li B, et al. Phase gradient matrix autofocus for ISAL space-time-varied phase error correction [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(6): 353-356.
- [2] Wang Hongyan, Ruan Hang, WU Yanhong. Fast azimuth imaging algorithm of inverse synthetic aperture lidar for maneuvering targets [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0228002. (in Chinese)
- [3] Ruan Hang, Wu Yanhong, Ye Wei. Inverse synthetic aperture lidar imaging algorithm for maneuvering target based on FRFT-CLEAN [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(7): 1540-1546. (in Chinese)
- [4] Lü Yakun, Wu Yanhong, Xue Junshi, et al. Inverse synthetic aperture lidar imaging algorithm for maneuvering target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11): 1128003. (in Chinese)
- [5] Ruan Hang, Wu Yanhong, Zhang Shuxian. Geostationary orbit object imaging based on spaceborne inverse synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1611-1616. (in Chinese)
- [6] Fan Zhihan, Cai Yaxing, Li Fengzan. Study on development of American space-based situational awareness technology for GEO objects [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28(6): 87-95. (in Chinese)
- [7] Li Daojing, Du Jianbo, Ma Meng, et al. System analysis of spaceborne synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1130002. (in Chinese)
- [8] Li Danyang, Wu Jin, Wang Lei, et al. Elementary imaging theory in space-borne synthetic aperture lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728002. (in Chinese)
- [9] Wang Debin, Wu Jin, Wu Tong, et al. Theoretical model on geosynchronous orbit object imaging with space-borne synthetic aperture lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1828002. (in Chinese)
- [10] Yin Hongfei, Guo Liang, Jing Dan, et al. Parameters analysis of spaceborne synthetic aperture lidar imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200144. (in Chinese)
- [11] Hu Xuan, Li Daojing, Fu Hanchu, et al. System analysis of ground-based inverse synthetic aperture lidar for geosynchronous orbit object imaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6): 0601003. (in Chinese)
- [12] Ruan Hang, Wu Yanhong, Ye Wei. Inverse synthetic aperture lidar imaging algorithm for uniform motion targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1124-1129. (in Chinese)
- [13] Liu Shengjie, Fu Hanchu, Wei Kai, et al. Jointly compensated imaging algorithm of inverse synthetic aperture lidar based on Nelder-Mead simplex method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0711002. (in Chinese)
- [14] Bao Zheng, Wang Genyuan, Luo Lin. Range-instantaneous doppler imaging in ISAR [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(12): 79-83. (in Chinese)
- [15] 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.