

文章编号:1007-2780(2018)03-0228-10

基于 GRT-CLEAN 的高速旋转目标快速 三维成像方法

王 会^{1*}, 巨 欢², 方 阳³, 李荣旭³, 王保平³

(1.西北工业大学 研究生院, 陕西 西安 710072;

2.陕西法士特齿轮有限责任公司, 陕西 西安 710119;

3.西北工业大学 无人机重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:针对传统高速旋转目标三维成像算法存在成像效果差、计算复杂度大、鲁棒性差的缺点,本文提出一种加速的 GRT-CLEAN 高速自旋目标三维成像方法。采用广义 Radan 变换(GRT)与 CLEAN 技术相结合的方法进行目标三维特征提取,实现高分辨精确目标成像;采用“先粗网格,后精确网格”的策略,分两步对散射点目标进行估计,降低计算复杂度,计算复杂度从 $O(N \times P \times Q \times T)$ 降为 $O(10^{-4} \times N \times P \times Q \times T)$, 大幅提高成像速度。仿真实验与数值分析验证了本文所提方法的有效性。实验结果表明,本文所提成像在低信噪比和目标存在遮挡的情况下,依然能对目标进行有效成像;与传统的 GRT-CLEAN 成像方法相比,本文所提成像方法大幅降低计算复杂度。

关键词:高速旋转目标;广义 Radan 变换(GRT)-CLEAN;网格剖分;三维成像

中图分类号:TN957 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183303.0228

Fast 3D imaging algorithm for high-speed spinning targets based on GRT-CLEAN

WANG Hui^{1*}, JU Huan², FANG Yang³, LI Rong-xu³, WANG Bao-ping³

(1. Graduate School of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shaanxi Fast Gear Co., Ltd., Xi'an 710119, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on UAV,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of traditional 3D imaging algorithms for high-speed spinning targets, such as high computational complexity, poor imaging result and robustness, a fast 3D imaging algorithm based on GRT-CLEAN is developed. First, the 3D features of the target are extracted with the combination of generalized Radan transform(GRT) and CLEAN technology which could obtain a high resolution image. Then, the scattering targets are estimated with two separate grid sequentially (from coarse grid to fine grid), which could reduce the computational complexity and speed up the imaging process. The effectiveness of the current 3D imaging algorithm is verified by the

收稿日期:2018-01-03;修订日期:2018-02-10.

基金项目:国家自然科学基金(No.61472324)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61472324)

* 通信联系人, E-mail: wanghui0608@nwpu.edu.cn

simulation experiment and numerical analysis. Results show that the present 3D imaging algorithm based on GRT-CLEAN can obtain an effective image under the circumstances of low signal-to-noise ratio and no target occultation, and greatly reduce the computational complexity compared with the traditional GRE-CLEAN imaging method.

Key words: high-speed spinning target; generalized Radon transform(GRT)-CLEAN; mesh generation; 3D imaging

1 引言

随着人类对太空开发的不断深入,空间活动的范围越来越广、频次越来越高,轨道上聚集了大量的卫星、太空碎片等^[1];随着全球太空资源开发热潮的进一步高涨,以后的战场必将直接扩展到空间。对空间目标的识别可以使我们预先感知到在轨航天器可能遇到的威胁、来自外空间对本土攻击的导弹和对未知飞行物的探测。所以提高对空间目标的探测与识别水平对国家的安全与发展至关重要,而且其重要性会不断增强^[2-4]。

针对太空垃圾的有效识别及导弹攻击的精准防御问题,随着雷达成像技术的不断成熟,为其提供了一种有效的解决手段,实现该类目标的二维、三维像成为一项重要的任务。60年代初,美国科学家 Brown 等人最早开始了对旋转目标成像的研究^[5]。1980年,J.L.Walker^[6]等提出了距离多普勒算法(RDI),用于解决自旋目标在转动过程中造成的距离徙动和成像模糊的问题。1984年,林肯实验室针对大转角目标的成像问题取得了突破性的进展,获得了较好的成像效果^[7]。1996年,美国海军实验室 V.C.Chen 利用时频分析技术对机动飞机目标进行成像,成像结果比较理想^[8]。京都大学的 Sato 等人借鉴了该算法,于1999年提出了单距离多普勒干涉的方法(SRDI)^[9],该算法主要将目标回波压缩到一个距离单元内,分析目标横向回波的时频特性曲线,将回波数据转化到时频域,利用 Radon 变换完成曲线检测,在参数域形成峰值,最终得到目标二维像,达到提高距离分辨率和多普勒分辨率的目的。王琦等^[10]提出了单距离匹配滤波算法(SRMF)。该算法将回波数据压缩到一个距离单元进行处理,建立自旋目标不同半径处的匹配信号,然后将其作为参考信号,与横向回波相位做相干处理就可得到散射点的冲激响应,从而实现该点的成像。

为了降低利用 SRMF 算法所成出像的旁瓣,并提高图像质量。利用 SRMF 结合修正 CLEAN^[11]对太空碎片成像^[12]。Wang^[13]提出了 SRMF-CLEAN 算法,该算法并没能从本质上提高成像分辨率。刘亚波^[14]提出了一种相位相干的单距离多普勒干涉算法(CSRDI)。该算法在 SRDI 算法的基础上又加入了相位的相干处理,最后利用 Radon 变换沿正弦曲线曲线积累实现成像,最终达到提高分辨率的目的。当信号的数据量不满足传统耐奎斯特采样定律时,压缩感知理论^[15-17]可以用较低的数据量对信号进行采样和重构。Bai^[18]将压缩感知理论应用到窄带雷达自旋目标成像中,对方位欠采样条件下的如何实现自旋目标的成像进行了研究,提出了基于正交匹配追踪法的自旋目标成像算法,提高了成像质量。相比于二维成像,三维成像包含目标的信息量更全,更具实用性。贺柏森^[19]提出了一种基于匹配滤波三维 ISAR 成像算法。利用回波信号方位向的二维频谱,构造匹配滤波器,相匹配的散射点被提取出来,将匹配滤波器输出的信号聚焦在一起,提取第三维信息,最终构建三维图像。王琦^[20]提出一种有效的 GRT-CLEAN 方法。该算法将回波信号压缩到距离-慢时间域,采用广义 Radon 变换(GRT)沿包络的正弦曲线积分,形成峰值,初步估计出散射点位置。利用 CLEAN 技术得到每个散射点的精确位置,最终得到目标三维像。吴亮^[21]提出了一种结合匹配滤波和复值反投影技术的三维成像算法。该算法在距离-慢时间域构造匹配滤波器,并在该域完成滤波过程,最终获得目标的三维位置;同时,利用复值反投影方法提高该算法的抗干扰能力,在复杂环境下仍然能重建准确的目标三维像。

由于三维成像能提供更多的目标细节信息,有利于目标识别,目前国内外学者对空天高速自旋目标三维成像已经做了大量的研究,并提出了许多行之有效的算法。但是目前的三维成像方法

主要是针对低速和小转角的目标成像,如果对空天高速自旋目标成像以上方法将不再适用。本文在研究高速自旋目标三维成像的机理的基础上,提出了一种基于 GRT-CLEAN 技术的高速自旋目标快速三维成像方法。该方法具有成像精度高、抗干扰能力强、计算复杂度低、鲁棒性强的优点,并通过仿真实验结果验证了该方法的有效性。

2 高速旋转目标宽带三维成像信号模型

图 1 为目标经过平动补偿后的三维坐标系下高速旋转目标成像几何模型。以 O 点为坐标原点, XYZ 构成一个直角坐标, $\rho\theta Z$ 构成一个圆柱坐标系。目标以 Z 轴为旋转轴,其自旋的角速度为 ω , H 为合成孔径雷达中心到目标坐标系原点基点射线方向的单位向量,其与 Z 轴的夹角为 α 。

直角坐标系与圆柱坐标系的关系为:

$$\begin{cases} Z = Z \\ Y = \rho \sin \theta \\ X = \rho \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

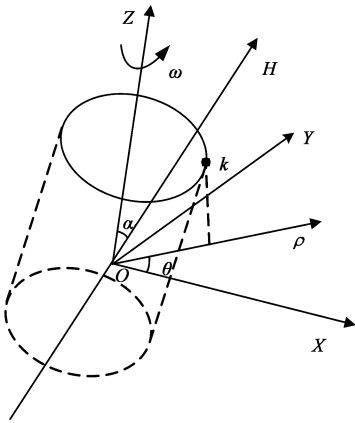


图 1 高速旋转目标成像几何模型

Fig.1 Geometric model of high-speed spinning target

设目标上有 K 个散射点,其中第 k 个散射点的柱坐标为 (ρ_k, θ_k, z_k) ,在远场条件下,散射点与雷达的瞬时斜距 $R_k(t_m)$ 可以表示为:

$$R_k(t_m) = R_0(t_m) + R_{kr}(t_m), \quad (2)$$

其中: $R_0(t_m)$ 为坐标原点 O 在时间 t_m 时刻与雷达的瞬时斜距,其对成像没有作用,需要对其进行补偿。 $R_{kr}(t_m)$ 为散射点在坐标系内相对原点的距离,假设在观测时间内,目标自旋角速度恒定,且雷达视线与 Z 轴的夹角为 α 也不变,散射点 k 到坐标原点 O 的距离 $R_{kr}(t_m)$ 为:

$$R_{kr}(t_m) = z_k \cos \alpha + \rho_k \sin \alpha \sin(\theta_k + \omega t_m), \quad (3)$$

目标散射点 k 的慢时间回波为:

$$s_k(t_m) = A_k \exp[-j 2\pi f_c(t - 2R_k(t_m)/c)], \quad (4)$$

其中: A_k 为散射点的散射强度, f_c 为载频, c 为光速。

回波信号与载波混频后的基带信号为:

$$s_k(t_m) = A_k \exp[-j 4\pi R_k(t_m)/\lambda], \quad (5)$$

上述基带信号经匹配滤波和距离压缩后,转换到距离-慢时间域,不考虑残余相位项,则其表达式为:

$$s_k(r, t_m) = A_k \cdot \text{sinc}\left[\frac{2\pi B_r}{c}(r - R_k(t_m))\right] \cdot \exp[-j \cdot 4\pi f_c R_k(t_m)/c], \quad (6)$$

其中 B_r 为雷达发射信号的带宽。

对目标进行运动补偿,可以把瞬时斜距 $R_k(t_m)$ 中的平动部分 $R_0(t_m)$ 消除掉,剩余转动部分 $R_{kr}(t_m)$,则上式可以化为:

$$s_k(r, t_m) = A_k \cdot \text{sinc}\left[\frac{2\pi B_r}{c}(r - R_{kr}(t_m))\right] \cdot \exp[-j \cdot 4\pi f_c R_{kr}(t_m)/c]. \quad (7)$$

目标信号模型表示为目标表面上 K 个散射点之和,则目标所有散射点的回波信号在距离-慢时间域为:

$$s(r, t_m) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \text{sinc}\left[\frac{2\pi B_r}{c}(r - z_k \cos \alpha - \rho_k \sin \alpha \sin(\theta_k + \omega t_m))\right] \cdot \exp[-j \cdot 4\pi f_c (z_k \cos \alpha + \rho_k \sin \alpha \sin(\theta_k + \omega t_m))/c], \quad (8)$$

式(8)中有效转动速度 ω 包含目标自旋角速度和目标平动引起的相对转动速度。由于自旋速度远大于目标平动引起的相对转动速度,所以本文

只考虑目标自旋角速度。

设第 k 个散射点在直角坐标系的坐标为 (x'_k, y'_k, z'_k) ,则式(8)在直角坐标系下表示为:

$$s(r, t_m) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \text{sinc} \left[\frac{2\pi B_r}{c} (r - z_k' \cos \alpha - x_k' \sin \alpha \sin \omega t_m - y_k' \sin \alpha \cos \omega t_m) \right] \cdot \exp[-j \cdot 4\pi f_c (z_k' \cos \alpha + x_k' \sin \alpha \sin \omega t_m + y_k' \sin \alpha \cos \omega t_m) / c]. \quad (9)$$

在成像积累时间内, α 可以认为是常量, 将 $x_k' \sin \alpha$ 、 $y_k' \sin \alpha$ 、 $z_k' \cos \alpha$ 分别写成成像平面内

散射点的三维坐标 (x_k, y_k, z_k) , 则式(9)可以写成:

$$s(r, t_m) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \text{sinc} \left[\frac{2\pi B_r}{c} (r - z_k - x_k \sin \omega t_m - y_k \cos \omega t_m) \right] \cdot \exp[-j \cdot 4\pi f_c (z_k + x_k \sin \omega t_m + y_k \cos \omega t_m) / c]. \quad (10)$$

3 基于 GRT-CLEAN 技术的快速高分辨三维成像算法

3.1 广义 Radon 变换(GRT)成像

GRT 可以检测任意形状的曲线, 可以实现多维图像空间中的曲线与其对应的多维参数空间之间的转换, 使图像空间中一条曲线与相应的参数空间中的峰值位置相对应, 最终形成目标像。

从式(10)可以看出, 回波信号在距离-时间域中包络是正弦曲线的形式, 该曲线的形状和位置由散射点的位置参数 (x_k, y_k, z_k) 决定, 对该曲线进行 GRT 就能相应得到该曲线对应的散射点位置。散射点的位置坐标可以由式(11)确定:

$$r = z_k + x_k \sin \omega t_m + y_k \cos \omega t_m. \quad (11)$$

多个散射点的回波共同构成目标的整体回波, 它们之间线性叠加在一起, 所以在距离-慢时间域会出现多条正弦曲线交织在一起的现象, 这些曲线之间可能会相会干扰, 但通过 GRT 仍然能够正确区分它们, 从而实现估计散射点位置的目的。

在数字图像中, GRT 变换可以定义为:

$$D(j) = \sum_{m=0}^{M-1} d(m, \varphi_d(m; j)) = \sum_{m=0}^{M-1} d(m, h), \quad (12)$$

其中: D 表示图像 $d(m, h)$ 的广义 Radon 变换, j 为图像 $d(m, h)$ 中的曲线, $h = \varphi_d(m; j)$ 定义为被检测曲线。由式(12)可以看到, GRT 的实质是在图像 $d(m, h)$ 中沿着特定曲线轨迹累加, 最后在相应的位置形成峰值, 从而获得目标图像。

回波信号与载波混频后经过匹配滤波和距离压缩后, 会获得距离-慢时间域的数据图像。图像中包含许多曲线, 这些曲线参数向量 j 包含 3 个参数 x_k, y_k, z_k 分别对应该曲线的幅值、初相和中线位置, 对其进行 GRT 变换, 就会获得这些参数。式(12)中 m 与回波信号中的慢时间相对应, $h = \varphi_d(m; j)$ 则与曲线 $r = z_k + x_k \sin \omega t_m + y_k \cos \omega t_m$ 相对, 故对式(12)进行 GRT 可以表示为:

$$G(x_k, y_k, z_k) = \sum_{t_m} g(t_m, z_k + x_k \sin \omega t_m + y_k \cos \omega t_m). \quad (13)$$

3.2 GRT-CLEAN 算法

通过 GRT 可以实现正弦曲线与峰值的转化, 对目标有效成像。公式(13)将距离-时间域的二维图像转化到参数域中, 使得散射点回波信号包络轨迹随时间正弦变化的曲线与参数域中的峰值一一对应, 但是由于 GRT 成像的实质是沿特定曲线轨迹的累加和求和, 最终在散射点对应位置处形成最大值, 这样导致得到的距离像的主瓣很宽, 旁瓣较高, 成像分辨率较低。为了提高成像分辨率, 可以结合 CLEAN 技术实现高速自旋目标精确的三维图像。

GRT-CLEAN 算法具体步骤如下:

(1) 采用式(13)对式(10)进行 GRT, 提取参数域最大峰值对应的参数 x_m, y_m, z_m , 作为其中一个散射点的位置估计。

(2) 由上一步估计的散射点位置坐标构造其点散布函数:

(3) 在图像重建过程中需要用到散射点对应的反射系数, 在前一步的基础上, 我们可以根据最

$$X(r, t_m) = f_{br} \cdot \text{sinc}\left[\frac{2\pi f_{br}}{c}(r - z_m - x_m \sin \omega t_m - y_m \cos \omega t_m)\right] \cdot \exp\left[\frac{4\pi f_c}{c}(r - z_m - x_m \sin \omega t_m - y_m \cos \omega t_m)\right]. \quad (14)$$

小范数准则估计该位置处的反射系数:

$$\min_{\hat{\sigma}} I(\hat{\sigma}) = \min_{\hat{\sigma}} \|s(r, t_m) - \hat{\sigma} X\|. \quad (15)$$

为求解式(15),我们可以对其进行求导得到极值点。具体求解表达式如下:

$$\frac{\partial I}{\partial \hat{\sigma}} = -2 \sum [s(r, t_m) - \hat{\sigma} X(r, t_m)] X^*(r, t_m) = 0, \quad (16)$$

其中: $X^*(r, t_m)$ 为 $X(r, t_m)$ 的复共轭,通过求解式(16),可以得到该位置处对应散射点的后向散射系数的估计值:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum s X^*}{\sum |X|^2}. \quad (17)$$

(4)对前面得到的散射点位置参数加以校正。通过 GRT 得到散射点的位置可能存在偏差,往往会出现真实目标点位置的附近,在这种情况下估计出的反射系数也会出现偏差,所以为了提高我们所估计参数的精确程度,可以将上面估计得到的参数作为初始值,然后在该值附近区域进行小范围的三维搜索,从而得到该散射点最佳的位置参数和相对应的散射系数。

(5)信号横向回波数据中减去该散射点对应的点散布函数 X ,也就是 CLEAN 过程:

$$s_{\text{new}} = s - \hat{\sigma} X. \quad (18)$$

(6)将上一步得到的 s_{new} 作为输入信号返回步骤(1),然后重复上面的步骤。当目标中散射点全部找到,迭代过程终止。

分析目标的运动模型可以得出,由于目标的旋转轴与雷达的视线方向存在夹角,所以成像结果与目标真实的三维结构、尺寸大小有区别。旋转轴方向的成像尺寸是真实图像高度的 $\cos \alpha$ 倍,半径方向的成像大小是真实目标的 $\sin \alpha$ 倍。夹角 α 越小,旋转轴反方向越接近真实值,反之, α 越大半径方向越接近真实值,但是当 $\alpha = 0$ 时,半径方向即 $x-y$ 平面的分辨率为 0,当 $\alpha = \pi/2$ 时,旋转轴方向即 z 轴的分辨率为 0,也就是在高度 z

上没有分辨能力。

由式(13)可知,广义 Radon 变换实质是对一幅数字图像中每一个离散点上能量沿某个曲线轨迹的累加,如果与曲线轨迹相匹配的累加则会出现峰值,如果与曲线轨迹不匹配则没有峰值出现,所以 GRT-CLEAN 算法估计出散射点的位置是非常精确,不能出现丝毫误差。这就要求我们在参数域离散场景时,离散网格必须非常精细,例如,散射点的位置坐标精确到 0.01,则参数域离散网格至少要精确到 0.01,因为是三维的离散场景,这将导致计算量非常大,如果散射点的位置刚好位于离散的网格上,则能精确地找到它,如果散射点没在场景离散的网格上,就会导致 GRT-CLEAN 算法的步骤(1)中从参数域寻找的最大峰值的位置坐标出现误差,虽然在步骤(4)有散射点位置坐标校正的过程,但由于最初的精确度不够,还是无法找到准确的位置,从而导致步骤(5)中减去该散射点回波贡献时不够彻底,不断重复以上的步骤,误差不断的积累,导致散射点位置偏差越来越大,最终致使成像失败。故, GRT-CLEAN 算法的优点是精确度高、抗干扰能力强,但它的不足是鲁棒性不好,计算量大,实用性差。

3.3 基于 GRT-CLEAN 的快速成像方法

针对 GRT-CLEAN 算法鲁棒性不好,实用性差的缺点,本文提出了一种改进的 GRT-CLEAN

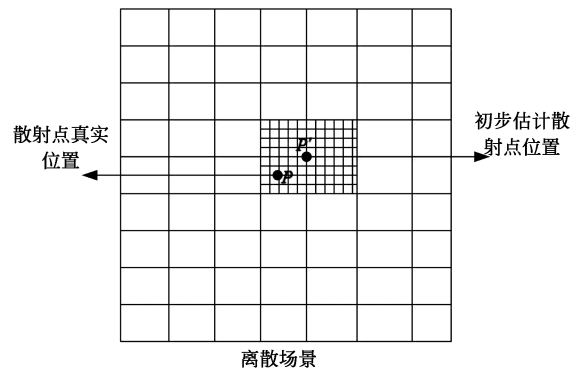


图 2 快速算法思路示意图

Fig.2 Schematic of fast algorithm

快速算法。具体思路如图2所示,主要做法是先利用精确度低的离散网格初步确定散射点的位置 P' ,在该散射点的附近利用精度更高的离散化网格精确定位散射点的真实位置 P 。这样做可以大大减少算法的计算量,同时又能够达到精确度高的要求。

GRT-CLEAN快速成像算法的主要步骤如下:

(1)利用精确度低的离散网格对公式(10)进行GRT,提取参数域最大峰值 P' 点对应的参数 x'_m 、 y'_m 、 z'_m 作为其中一个散射点的位置初步估计。

(2)在上一步估计的三维位置坐标附近利用精度更高的离散化网格进行GRT,再次提取参数域最大峰值 P 点对应的参数 x_m 、 y_m 、 z_m ,作为该散射点的最终位置坐标。

(3)由上一步估计的三维位置坐标利用式(14)构造其点散布函数。

(4)由公式(15)、(16)和(17)估计该位置处对应散射点的后向散射系数。

(5)信号横向回波数据中减去该散射点对应的点散布函数 X ,利用式(18)完成对回波数据的CLEAN过程。

(6)将上一步得到的数据作为输入信号返回步骤(1),然后重复上面的步骤。当目标中散射点全部找到,迭代过程终止。

改进的算法相比原算法可以大大降低计算量,增强了实用性,它采取先初步定位,再精确定位的思路可以增强算法的鲁棒性,同时还保留原算法的精确度高、抗干扰能力强的优点。

4 实验验证与分析

下面通过仿真实验对本文所提成像方法的有效性进行验证。仿真数据:宽带雷达载波10 Hz,波长为 $\lambda = 0.03$ m,带宽4 GHz,脉冲重复频率为1 000 Hz,目标由7个散射点构成,分为两层分布,底层分布4个散射点,三维坐标分别为(1.131 4, 0, 0.282 8)、(0, 1.131 4, 0.282 8)、(-1.271 8, 0, 0.282 8)、(0, -1.272 8, 0.282 8),散射系数分别为(0.7, 0.9, 0.7, 0.9),顶层分布3个散射点,三维坐标分别为(0.686 5, 0.498 8, 1.131 4)、(-0.572 0, 0.415 6, 1.131 4)、(-0.262 2, -0.807 0, 1.131 4),散射系数分别为(0.6, 0.8, 0.7),目标绕 z 轴旋转,角速度为 2π

rad/s,与雷达视线方向的夹角为 $\pi/4$ 。目标坐标分布如图3所示。

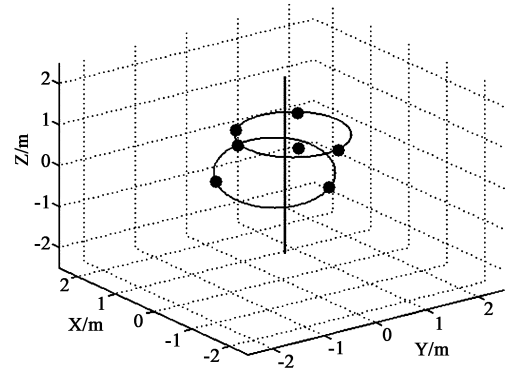


图3 目标散射点分布示意图

Fig.3 Distribution of target's scatter point

4.1 本文所提算法的成像有效性验证

雷达回波信号在距离-慢时间域的图像如图4所示,图5为GRT-CLEAN算法成像效果图,因为目标转轴与雷达视线方向的夹角为 $\pi/4$,所以目标真实的三维大小与实际成像大小相差 $\cos(\pi/4)$ 倍。表1为各散射点位置坐标的计算结果。

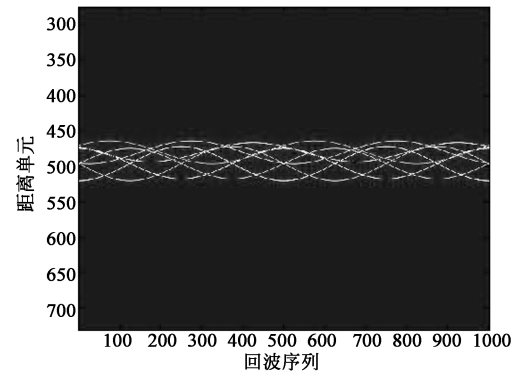


图4 回波信号的距离-慢时间图像

Fig.4 Range-slow time image of echo

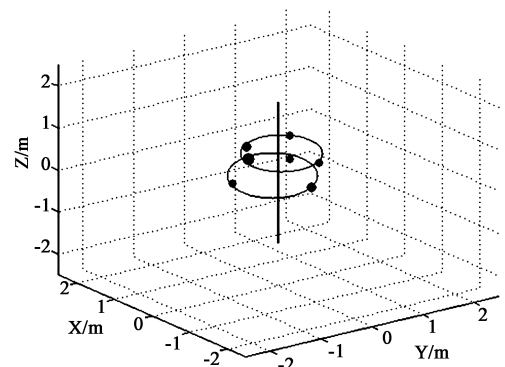


图5 本文所提算法成像结果

Fig.5 Imaging result with present algorithm

果。从实验结果来看,GRT-CLEAN 算法能够精确的找到散射点的位置坐标。

表 1 成像目标点坐标(单位:m)
Tab.1 Coordinates of imaging targets (Unit: m)

x	y	z	散射点强度
0.8	0	0.2	0.699 8
0	0.8	0.2	0.906 1
-0.9	0	0.2	0.700 2
0	-0.9	0.2	0.899 4
0.485 4	0.352 7	0.8	0.600 0
-0.404 5	0.293 9	0.8	0.800 5

4.2 考虑遮挡条件下本文算法的鲁棒性

由于目标在绕旋转轴转动一个周期的过程中不可避免地存在着遮挡,当散射点位于雷达照射区时,该点会有回波产生,当散射点位于遮挡区时,该点没有回波贡献。因此,本实验假设目标上散射点转动到 $[\pi/4\ 3\pi/4]$ 区域时,后向散射系数

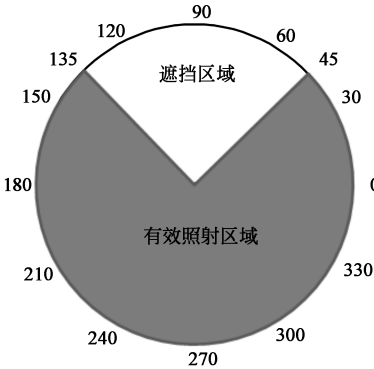


图 6 目标受遮挡示意图
Fig.6 Schematic of target occultation

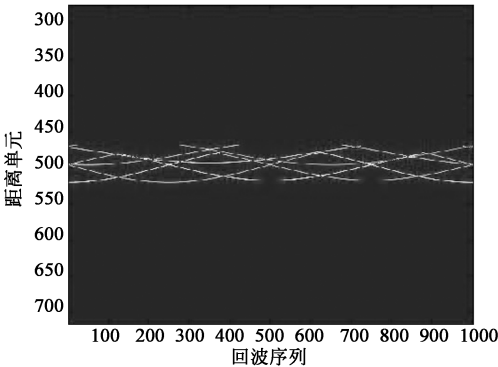


图 7 回波信号的距离-慢时间图像
Fig.7 Range-slow time image of echo

为零,遮挡模型参照图 6 所示,目标的其余实验数据同上。图 7 为回波信号在距离-慢时间域的图像,从图中可以发现,回波信号的包络出现不同程度的断裂,但是从图 8 中可以看到本文算法仍然可以准确找到散射点的位置,表 2 为各散射点位置坐标的计算结果。

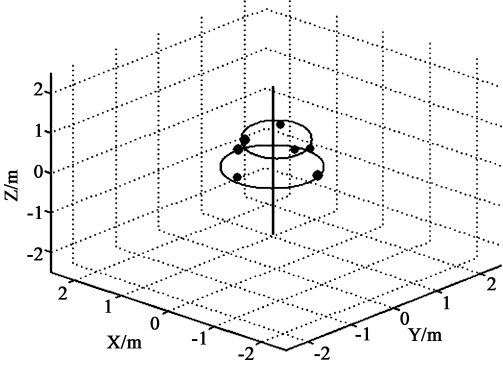


图 8 遮挡条件下成像结果
Fig.8 Imaging result of target occultation

表 2 散射点成像坐标(单位:m)
Tab.2 Coordinates of scatter point (Unit: m)

x	y	z	散射点强度
0.8	0	0.2	0.699 6
0	0.8	0.2	0.895 1
-0.9	0	0.2	0.700 1
0	-0.9	0.2	0.896 4
0.485 4	0.352 7	0.8	0.600 2
-0.404 5	0.293 9	0.8	0.799 4
-0.185 4	-0.570 6	0.8	0.698 9

4.3 遮挡和低信噪比条件下的本文算法的鲁棒性验证

目标在有遮挡的条件下,在雷达回波数据中加入高斯白噪声,信噪比为 -10 dB ,其余仿真参数同上。图 9 为回波信号在距离-慢时间域的图像,从图中可以发现,回波信号的包络轨迹在噪声的影响下,很难看清。但是从图 10 中可以看到本文算法仍然可以准确找到散射点的位置,表 3 为各散射点位置坐标的计算结果。

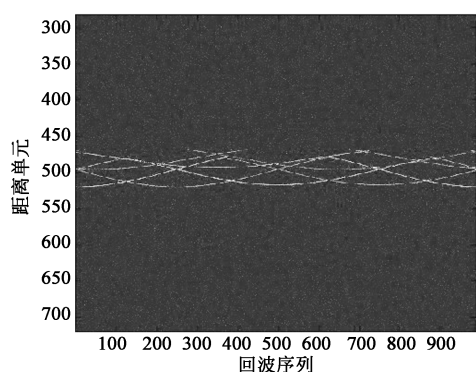


图9 回波信号的距离-慢时间图像

Fig.9 Range-slow time image of echo

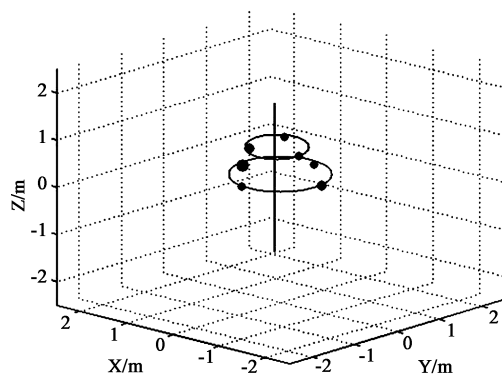


图10 遮挡和低信噪比条件下算法成像结果

Fig.10 Imaging result with target occultation and low signal-to-noise ratio

表3 散射点坐标(单位:m)

Tab.3 Coordinates of scatter point (Unit: m)

x	y	z	散射点强度
0.8	0	0.2	0.698 9
0	0.8	0.2	0.900 1
-0.9	0	0.2	0.699 8
0	-0.9	0.2	0.895 1
0.485 4	0.352 7	0.8	0.600 5
-0.404 5	0.293 9	0.8	0.800 3
-0.185 4	-0.570 6	0.8	0.696 3

4.4 本文算法与传统 GRT-CLEAN 算法的性能比较

4.4.1 成像精度分析

实验仿真数据同上,如果目标模型中散射点位置坐标精度为 0.01 m,则参数域离散场景中离

散网格的精度为 0.01 m 时,GRT-CLEAN 算法能够准确的找到散射点的位置,如果离散网格的精度为 0.1 m,那么 GRT-CLEAN 算法失效,而本文中改进的算法,则能快速、准确的找到散射点的位置。图 11 为离散网格的精度为 0.1 m 时,GRT-CLEAN 算法的成像效果图。图中只有最初找到的第一个散射点的位置接近散射点的真实位置,其他散射点的位置都是错的,并且目标有 7 个散射点组成,分布在两个平面,而成像结果只有 6 个散射点,分布在 3 个平面,其中还有一个散射点因为计算出的散射系数接近于零,如果不仔细看还发现不了,图 12 为同样为离散网格的精度为 0.1 m 时,改进算法的成像效果。表 4 为改进算法和 GRT-CLEAN 算法对各散射点位置坐标的计算结果,目标真实的三维大小与实际成像大小相差 $\cos(\pi/4)$ 倍。

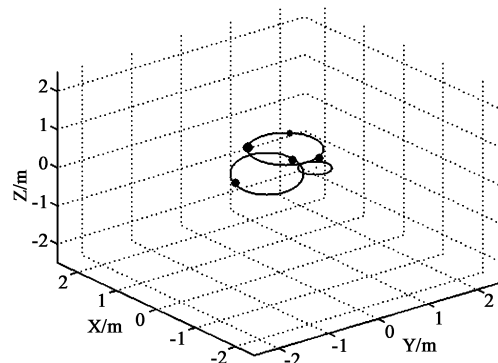


图11 离散网格为 0.1 m 时 GRT-CLEAN 算法成像结果

Fig.11 Imaging result of GRT-CLEAN with grid size of 0.1 m

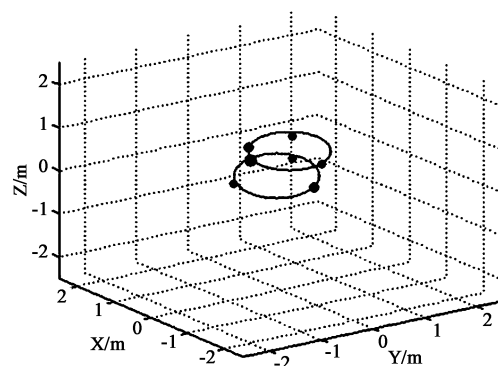


图12 离散网格为 0.1 m 时改进算法成像结果

Fig.12 Improved imaging result of GRT-CLEAN with grid size of 0.1 m

表 4 散射点位置坐标及反射系数 (x, y, z, σ) 对比结果Tab.4 Comparison between scatter point coordinates and reflection coefficients (x, y, z, σ)

GRT-CLEAN	本文算法	散射点真实坐标
(0.8,0,0.2,0.701 6)	(0.8,0,0.2,0.700 1)	(1.1314,0,0.282 8,0.7)
(-0.9,0,0.2,0.700 0)	(0,0.8,0.2,0.899 8)	(0,1.131 4,0.282 8,0.9)
(0.216 3,-0.665 7,0.5,0.02)	(-0.9,0,0.2,0.696 5)	(-1.272 8,0,0.282 8,0.7)
(-0.404 5,0.293 9,0.8,0.793 6)	(0,-0.9,0.2,0.900 1)	(0,-1.272 8,0.282 8,0.9)
(-0.185 4,-0.570 6,0.8,0.700 6)	(0.484 5,0.357 2,0.8,0.600 2)	(0.686 5,0.498 8,1.131 4,0.6)
(0.485 4,0.352 7,0.8,0.597 2)	(-0.404 5,0.293 9,0.8,0.799 6)	(-0.572 0,0.415 6,1.131 4,0.8)
(0,0,0,0)	(-0.185 4,-0.570 6,0.8,0.700 0)	(-0.262 2,-0.807 0,1.131 4,0.7)

4.4.2 成像复杂度分析

假如场景中有 N 个散射中心,传统的 GRT-CLEAN 成像算法中,成像场景三维离散化大小为 $P \times Q \times T$,经过 GRT 能量积累的计算量为 $N \times (P \times Q \times T)$ 。在一固定成像场景中,场景离散越精密,即 P, Q, T 值越大,成像精度越高,但是计算复杂度急剧增大。本文方法中,首先采用粗网格进行搜索,网格大小为 L ,且 $L \ll P, L \ll Q, L \ll T$,根据粗匹配之后寻找到 N 个散射中心的粗略位置,在以该位置为中心,对局部区域进行离散化,离散化大小为 p, q, t ,且 $p \ll P, q \ll Q, t \ll T$,选取 $L = P/50, p = P/10, q = Q/10, t = T/10$,则精确成像的计算复杂度为 $N \times L \times p \times q \times t = \frac{N \times (P \times Q \times T)}{50 \times 10 \times 10 \times 10}$,即成像复杂度为传统 GRT-CLEAN 成像计算量的 0.002%。

本实验中,目标有 7 个散射点,如果 GRT-CLEAN 算法能够精确找到散射点的位置坐标则在 GRT 能量积累部分的计算量为 $7 \times 100 \times 100 \times$

100,而本章中改进算法在 GRT 能量积累部分的计算量为 $7 \times 2 \times 10 \times 10 \times 10$,同样可以精确找到散射点的位置坐标。从数据对比中可以得出,改进的算法大大减小了计算量,同时满足精确度的要求。

5 结 论

本文首先建立了高速自旋目标宽带雷达三维成像模型,然后在分析 GRT-CLEAN 成像方法的基础上,提出一种改进的快速成像方法。通过仿真实验验证本文所提方法的有效性。通过实验和数值分析表明,本文所提方法算法精确度高、抗干扰能力强、存在遮挡和低信噪比的条件下依然能准确成像,与传统 GRT-CLEAN 成像方法相比,大大减少了计算量、提高成像速度。由于试验条件的限制,本文中算法有效性的验证都是通过仿真数据完成的,下一步需要获取实测数据对相关算法进行实验验证。

参 考 文 献:

- [1] PATE-CORNELL E, SACHON M. Risks of particle hits during space walks in low Earth orbit [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(1): 134-146.
- [2] 王琦.空间目标 ISAR 成像的研究[D].西安:西安电子科技大学,2007.
WANG Q. Study of ISAR imaging for space targets [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
- [3] 白雪茹.空天目标逆合成孔径雷达成像新方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.
BAI X R. Study on new techniques for ISAR imaging of aerospace targets [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [4] 刘宗明,张宇,庐山,等.非合作旋转目标闭环检测与位姿优化[J].*光学精密工程*,2017,25(4):1036-1043.
LIU Z M, ZHANG Y, LU S, *et al.* Closed-loop detection and pose optimization of non-cooperation rotating targets

- [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 1036-1043. (in Chinese)
- [5] BROWN W M. Synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1967, AES-3(2): 217-229.
- [6] WALKER J L. Range-Doppler imaging of rotating objects [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, AES-16(1): 23-52.
- [7] AUSHERMAN D A, KOZMA A, WALKER J L, *et al.* Developments in radar imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, AES-20(4): 363-400.
- [8] PRICKETT M J, CHEN C C. Principles of inverse synthetic aperture radar/ISAR/imaging [C]//*Proceedings of EASCON'80; Electronics and Aerospace Systems Conference*. Arlington, VA: IEEE, 1980: 340-345.
- [9] SATO T. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 1000-1005.
- [10] 王琦, 邢孟道, 保铮. 基于单距离匹配滤波的太空碎片雷达成像[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1037-1040.
WANG Q, XING M D, BAO Z. Single range matching filtering based space debris radar image [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1037-1040. (in Chinese)
- [11] 保铮, 王根原. 具有三维转动目标的逆合成孔径雷达成像算法[J]. 西安电子科技大学学报, 1997, 24(S): 1-9.
BAO Z, WANG G Y. The imaging method for the radar targets with three dimensional rotating [J]. *Journal of Xidian University*, 1997, 24(S): 1-9. (in Chinese)
- [12] TSAO J, STEINBERG B D. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(4): 543-556.
- [13] WANG Q, XING M D, LU G Y, *et al.* SRMF-CLEAN imaging algorithm for space debris [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(12): 3524-3533.
- [14] 刘亚波, 张磊, 邢孟道, 等. 采用相干单距离多普勒干涉的太空碎片成像[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(4): 660-664, 670.
LIU Y B, ZHANG L, XING M D, *et al.* Coherent single range doppler interferometry based space debris radar image [J]. *Journal of Xidian University*, 2010, 37(4): 660-664, 670. (in Chinese)
- [15] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [16] CANDÈS E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [17] CANDÈS E J, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [18] BAI X R, SUN G C, WU Q S, *et al.* Narrow-band radar imaging of spinning targets [J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(4): 873-883.
- [19] 贺柏森, 张磊, 张龙, 等. 一种高速自旋目标三维成像新算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2009, 36(5): 825-830, 915.
HE B S, ZHANG L, ZHANG L, *et al.* New algorithm for high-speed spinning target 3D ISAR imaging [J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(5): 825-830, 915. (in Chinese)
- [20] WANG Q, XING M D, LU G Y, *et al.* High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 22-30.
- [21] 吴亮, 魏奎章, 黎湘, 等. 基于距离-慢时间匹配滤波和复值反投影的快速旋转目标三维成像算法[J]. 信号处理, 2010, 26(12): 1761-1767.
WU L, WEI X Z, LI X, *et al.* Range-slow-time matched-filter and complex-valued back projection-based 3-D imaging algorithm for rapidly spinning targets [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(12): 1761-1767. (in Chinese)

作者简介: 王会(1990—), 男, 陕西延安人, 助教, 2016年毕业于西北工业大学获得硕士学位, 主要从事信号处理、图像处理方面研究。E-mail: wanghui0608@nwpu.edu.cn