DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.02.006

一种联合TDCM和PFA的空间目标大转角ISAR成像方法

胡国伟，汪　玲，朱岱寅

（南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室，江苏南京 211106）

摘　要： 空间目标态势感知是当前航天技术领域的研究热点，逆合成孔径雷达（Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR）是空间目标感知的一种有效手段。为了得到利于目标鉴别的高分辨二维ISAR图像，需要通过增大积累转角来提高方位向分辨率。但是，随着转角的增大，平动与转动之间的耦合增大，使得传统的先平动补偿、后利用转动成像的两步式成像方法不再适用。本文提出了一种结合时域信号共轭相乘（Time Domain Conjugate Multiplication, TDCM）处理与极坐标格式算法（Polar Format Algorithm, PFA）的成像算法，首先利用雷达回波的二维相干性，通过TDCM处理进行平动粗补偿，然后借助PFA的插值操作校正大转角引起的散射点越分辨单元走动（Motion Through Resolution Cell, MTRC）并估计目标相对转动参数。通过迭代处理，持续对平动和转动参数进行优化，提升运动补偿效果。仿真验证了所提成像算法的有效性，与传统算法相比，成像聚焦性更好。

关键词： 逆合成孔径雷达；空间目标；大转角；运动补偿

中图分类号： TN959.74　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1672-2337(2024)02-0161-09

引用格式： 胡国伟，汪玲，朱岱寅.一种联合TDCM和PFA的空间目标大转角ISAR成像方法[J].雷达科学与技术，2024，22(2)：161-169.
HU Guowei, WANG Ling, ZHU Daiyin. A TDCM-PFA Based Large-Rotation-Angle ISAR Imaging Method for Space Targets [J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(2): 161-169.

A TDCM-PFA Based Large-Rotation-Angle ISAR Imaging Method for Space Targets

HU Guowei, WANG Ling, ZHU Daiyin

(*Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 211106, *China*)

Abstract: Space target situation awareness is a research hotspot in the field of aerospace technology. Inverse synthetic aperture radar (ISAR) is an effective means of space target awareness. In order to obtain a high resolution 2-D ISAR image which is conducive to target discrimination, it is necessary to improve the azimuth resolution by increasing the accumulated rotation angle. However, with the increase of the rotation angle, the coupling between translation and rotation increases, which makes the traditional two-step imaging method of first translation compensation and then rotation imaging no longer applicable. In this paper, an imaging algorithm combining time domain conjugate multiplication (TDCM) processing with polar format algorithm (PFA) is proposed. Firstly, utilizing the two-dimensional coherence of radar echoes, translational coarse compensation is performed through TDCM processing. Then, the motion through resolution cell (MTRC) caused by the large rotation angle is corrected by the interpolation operation of PFA and the relative rotation parameters of the target are estimated. Through iterative processing, the translational and rotational parameters are continuously optimized to improve the motion compensation effect. Simulation results verify the effectiveness of the proposed imaging algorithm. Compared with the traditional algorithm, the proposed algorithm has better imaging focus.

Key words: inverse synthetic aperture radar; space target; large rotation angle; motion compensation

0　引　言

逆合成孔径雷达（Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR）旨在解决非合作运动目标的成像问题，被用于获得飞机、舰船、空间目标等的高分辨率图像[1-2]。随着技术的不断发展，应用中对高分辨ISAR图像的需求也越来越高，如当前航天领域中的热点，空间目标态势感知，其更关注航天器部

收稿日期：2023-09-11；修回日期：2023-11-13
基金项目：上海航天科技创新基金（No.SAST2021-026）

件级的识别，因此高分辨ISAR空间目标成像越来越受关注。

由ISAR成像原理可知，成像积累转角越大，方位向分辨率越高，但是大转角给成像处理带来的影响，必须予以考虑和解决：1）越分辨单元走动现象（Migration Through Resolution Cell, MTRC）；2）平动与转动之间的耦合增强，转动造成的MTRC对平动补偿精度产生影响[3-4]。

针对大转角成像中的散射点越距离单元走动问题，已经有一些解决方法：Keystone变换被广泛用于散射点越距离单元走动的校正[5-6]，但是，当目标转角进一步增大而使散射点的回波包络产生弯曲时，该方法将不再适用。为此，学者们提出了极坐标格式算法[7-8]（PFA），该算法根据中心切片定理，在目标回波的波数域将目标的扇型波数谱支撑区插值为矩形，进而采用二维逆傅里叶变换对目标图像进行重建。由于该算法允许散射点的回波包络以及多普勒产生弯曲，因此该算法适用的转角范围大于Keystone算法。除此之外，子孔径算法（SA）、卷积反投影（BP）算法等[9-10]也被提出用来解决大转角成像中的MTRC问题。

上述算法中，PFA操作简单、运算效率高，已被证实为一种可靠的大转角成像算法。但其算法效果受估计的转动参数准确性影响，这就需要先对目标的运动参数进行准确的估计。针对参数估计问题，注意到文献[11-12]在进行目标测速时运用相关处理操作，对不同时刻的距离像进行共轭相乘处理，充分利用了距离像中各个散射点的信息，具有目标回波相关系数大，噪声和杂波相关系数小的特性，并且具有强抗干扰能力。我们简称该处理为TDCM处理，考虑到雷达回波信号具有二维相干性，在本文中对ISAR相邻回波信号进行TDCM处理，结合最小二乘拟合，对平动参数进行估计。并且为解决大转角场景下平动与转动MTRC的耦合，在TDCM处理的基础上进行改进，将其与PFA结合以消除大转角带来的耦合问题。

1 大转角ISAR信号模型

目标运动示意图如图1所示，目标的运动可分为平动与转动两个部分，平动过程中各散射点产生的多普勒变化相同，对成像没有贡献且会导致最终图像的散焦，需要对此分量进行补偿；转动过程则会导致散射点产生不同的多普勒变化，这也是ISAR获取方位向分辨的基础[13]。

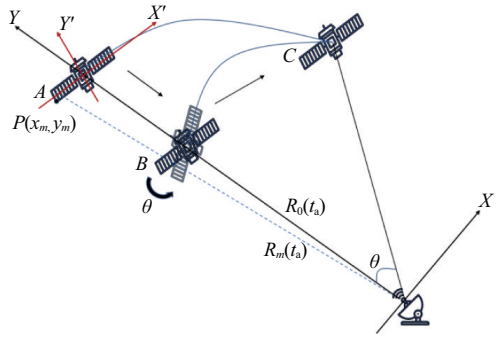


图1 ISAR目标运动示意图

以卫星运动轨迹与雷达相位中心所在的平面为坐标平面，雷达天线相位中心为坐标原点，坐标原点至合成孔径中心点的连线为Y轴，垂直于Y轴方向为X轴。用$(x_0(t_a), y_0(t_a))$表示t_a时刻目标中心相对于雷达的坐标，而目标上的散射点相对于其中心点的坐标表示为(x_m, y_m)，$R_0(t_a)$和$R_m(t_a)$（下文简写为R_t和R_m）分别为卫星中心和卫星上任一点到雷达天线相位中心的瞬时距离值，可由下式计算得到：

$$R_0(t_a) = \sqrt{x_0^2(t_a) + y_0^2(t_a)} \tag{1}$$

$$R_m(t_a) = \sqrt{(x_0(t_a) + x_m)^2 + (y_0(t_a) + y_m)^2} \tag{2}$$

雷达发射宽带LFM信号；假设散射点个数为M，解调后得到的二维回波信号为

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, t_a) = \sum_{m=1}^{M} \sigma_m \mathrm{rect}\left(\frac{t_a}{T_a}\right) \mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_m/c}{T_p}\right) \cdot \\ \exp[\mathrm{j}\pi K(\hat{t} - 2R_m/c)^2] \cdot \\ \exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi f_c}{c} R_m\right) \end{aligned} \tag{3}$$

式中，σ_m为散射点m的后向散射系数，t_a为慢时间，T_a为合成孔径时间，$\hat{t}$为快时间，T_p为脉冲持续时间，R_m为散射点m至雷达距离，c为光速，K为信号调频率，f_c为信号载频。利用驻留相位定理，对式（3）作距离向脉冲压缩后得到

$$S(f_r, t_a) = \sum_{m=1}^{M} \sigma_m \exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c}(R_T + R_r)\right] \tag{4}$$

式中f_r为距离频率，$R_r = x_m \sin\theta(t_a) + y_m \cos\theta(t_a)$表示转动分量（为便于公式推导，下文中$\theta(t_a)$写作$\theta$，其表示转角与时间的对应关系）。理论上，在计

算出平动分量R_{T}后，即可构造平动补偿函数：

$$H_{\mathrm{T}} = \exp\left[\mathrm{j}\frac{4\pi(f_{\mathrm{c}}+f_{\mathrm{r}})}{c}R_{\mathrm{T}}\right] \tag{5}$$

与式(4)相乘以补偿平动的影响；在小转角情况下，转动造成的MTRC(由式(4)中的分量$\exp(-\mathrm{j}\frac{4\pi f_{\mathrm{r}}R_{\mathrm{r}}}{c})$引起)小于距离分辨单元，$R_{\mathrm{r}}$造成的影响可以忽略，此时直接对平动补偿后的信号进行二维傅里叶变换即可得到聚焦的图像。而在大转角运动场景下，即转角θ较大时，$\exp(-\mathrm{j}\frac{4\pi f_{\mathrm{r}}R_{\mathrm{r}}}{c})$中的转动分量$R_{\mathrm{r}}$就需要予以考虑了，因此，为了降低转动的影响，引入PFA算法对转动参数进行估计。

2　基于TDCM的平动补偿

2.1　TDCM原理

在平动补偿部分，我们利用TDCM对回波信号中的平动参数进行估计。对式(4)中不同方位脉冲时间的信号进行共轭相乘得到

$$\begin{aligned}S_{KL}(f_{\mathrm{r}},t_{\mathrm{a}})&=S(f_{\mathrm{r}},t_K)\times S^*(f_{\mathrm{r}},t_L)=\\&\exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi(f_{\mathrm{c}}+f_{\mathrm{r}})}{c}(R_{\mathrm{T}}(t_K)-R_{\mathrm{T}}(t_L))\right]\times\\&\left(\sum_{m=1}^{M}\sigma_m^2\exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi(f_{\mathrm{c}}+f_{\mathrm{r}})}{c}(R_{rm}(t_K)-R_{rm}(t_L))\right]+\right.\\&\left.\sum_{p=1,q=1}^{M}|\mathrm{sgn}(p-q)|\sigma_p\sigma_q\exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi(f_{\mathrm{c}}+f_{\mathrm{r}})}{c}(R_{rp}(t_K)-R_{rq}(t_L))\right]\right)\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$t_K = t_{\mathrm{a}} + K\tau$, $t_L = t_{\mathrm{a}} + L\tau$分别表示其与初始方位时间相差$K$、$L$个脉冲($\tau$=1/PRF,PRF表示脉冲重复频率)，$R_{rm}(t_K)$表示散射点$m$在$t_K$时刻的转动分量。为了方便推导，假设$L = 1$，$K = 0$。式(6)中第一项代表方位时间$K$、$L$之间的平动分量差分，故称其为平动差分项，若将目标的运动设为三次多项式形式，则其表达式如式(7)所示，其中的v、a、a_1分别表示目标径向速度、加速度、加加速度；第二项代表同一散射点在方位时间K与L处的转动差分，称其为自身项；第三项代表不同散射点之间的转动差分，称其为交叉项。上述两者的表达式如式(8)、式(9)所示。

$$\begin{aligned}R_{\mathrm{T}}(t_K)-R_{\mathrm{T}}(t_L)=&\left(vt_L+\frac{1}{2}at_L^2+\frac{1}{6}a_1t_L^3\right)-\\&\left(vt_K+\frac{1}{2}at_K^2+\frac{1}{6}a_1t_K^3\right)=\\&\left(v\tau+\frac{1}{2}a\tau^2+\frac{1}{6}a_1\tau^3\right)+\\&\left(a\tau+\frac{1}{2}a_1\tau^2\right)t_{\mathrm{a}}+\frac{1}{2}a_1\tau t_{\mathrm{a}}^2\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}R_{rm}(t_K)-R_{rm}(t_L)=&[x_m\sin(\omega(t_{\mathrm{a}}+\tau))+\\&y_m\cos(\omega(t_{\mathrm{a}}+\tau))]-\\&[x_m\sin(\omega t_{\mathrm{a}})+y_m\cos(\omega t_{\mathrm{a}})]\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}R_{rp}(t_K)-R_{rq}(t_L)=&[x_p\sin(\omega(t_{\mathrm{a}}+\tau))+\\&y_p\cos(\omega(t_{\mathrm{a}}+\tau))]-\\&[x_q\sin(\omega t_{\mathrm{a}})+y_q\cos(\omega t_{\mathrm{a}})]\end{aligned} \tag{9}$$

观察上式可以发现，由于一般ISAR的脉冲间隔很小，导致式(8)的计算结果接近于0，将其代入式(6)的结果就是自身项的指数项值接近1，在信号中可将其理解为幅度为$\sum_{m=1}^{M}\sigma_m^2$的直流信号。而交叉项的分布则没有固定规律。此时交叉项的存在对最终平动差分项的提取会造成干扰，应当进行抑制。

对式(6)作二维傅里叶变换，将信号转换至距离-多普勒域，可看出自身项分布在频域零点位置，而交叉项则分布在整个平面上，此时只需将信号通过低通滤波器即可消除交叉项。需要注意的是，从式(8)、式(9)可以看到，对于强散射点密集的区域，位置接近的散射点数量较多，此时式(6)中交叉项的指数接近0的项增多，导致此位置的交叉项值增大，变换至频域后会使得零频附近的信号幅度增大，从整体来看就是零频位置处的信号既包含自身项又包含交叉项，通过滤波操作难以准确地将自身项与交叉项进行分离，此时可以考虑使用通带更窄的低通滤波器进行滤波以去除一部分零频附近的交叉项。

2.2　基于TDCM的平动估计

基于TDCM的平动参数估计流程如图2所示。

步骤1　TDCM处理和交叉项抑制

对TDCM处理后的信号作二维傅里叶变换得到其在距离-多普勒域的信号S_{RD}，对信号S_{RD}采用二维矩形窗进行滤波，以去除交叉项的影响。

步骤2　提取包含运动参数的相位

将加窗后的信号作二维逆傅里叶变换，信号

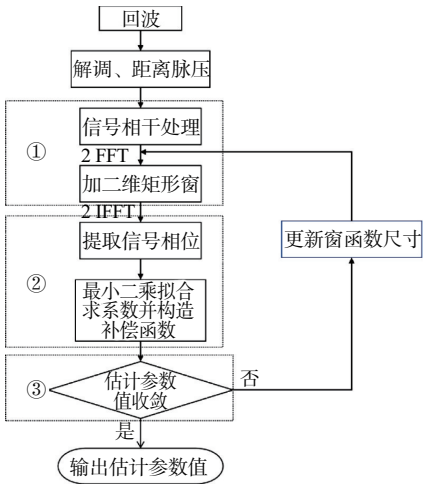


图2 算法流程图

可表示为

$$S_{KLC}(f_r,t_a)=\exp\{-j\frac{4\pi(f_c+f_r)}{c}[(v\tau+\frac{1}{2}a\tau^2+\frac{1}{6}a_1\tau^3)+(a\tau+\frac{1}{2}a_1\tau^2)t_a+(\frac{1}{2}a_1\tau)t_a^2]\} \quad (10)$$

可以看出，在方位时间维，信号为t_a的二次函数，为了降低误差，可先将信号在同一距离点处进行叠加再进行系数估计。对于式(10)，其相位中与时间t_a相关的一次和二次项系数可以通过函数拟合得到，据此可计算出速度a与加速度a_1；但其常数项$(v\tau+\frac{1}{2}a\tau^2+\frac{1}{6}a_1\tau^3)$因存在相位缠绕问题无法直接得到[14-15]，为此需要先对式(10)做方位向FFT，得到其表达式为

$$S_{KLC}(f_r,f_D)=A(f_r,f_D)\exp[-j\frac{4\pi(f_c+f_r)}{c}\cdot(v\tau+\frac{1}{2}a\tau^2+\frac{1}{6}a_1\tau^3)] \quad (11)$$

式中$A(f_r,f_D)=FFT_r\{\exp[-j\frac{4\pi(f_c+f_r)}{c}((a\tau+\frac{1}{2}a_1\tau^2)t_a+(\frac{1}{2}a_1\tau)t_a^2)]\}$为实信号，此时信号相位中的$(v\tau+\frac{1}{2}a\tau^2+\frac{1}{6}a_1\tau^3)$与距离频率成线性关系，同样使用函数拟合的方法即可求得其斜率值，结合以上计算得到的加速度和加加速度值，已可估计出目标的平动参数，因为此时并未考虑大转角情况下转动引起MTRC的影响，此时估计得到的参数值并不精确。

步骤3 估计参数值收敛

通过以上两步操作，可得到估计的目标平动参数(v,a,a_1)的初步估计，然后通过迭代，逐步优化窗函数，相应优化对平动参数的估计，直至收敛。

3 联合TDCM与PFA的ISAR成像算法

第2节对本文所用的平动补偿方法进行了阐述，由于在整体算法中涉及到的平动、转动解耦操作先于转动参数估计部分，即首次使用PFA插值时目标的转动参数是未知的，为此，下面首先对转速失配时PFA算法的有效性进行讨论；之后结合实际的大转角成像场景对算法整体流程进行说明。

3.1 转速失配时的PFA算法有效性分析

当前关于大转角下校正MTRC与进行转动估计的方法有很多，如PFA、BP、SA算法，本文选择其中运算效率高、操作简单的PFA算法。但需要注意的是，使用PFA算法时，要消除方位二次以上相位对成像的影响，必须准确知道目标的转动参数。

下面首先介绍在转动参数未知时，仍然使用PFA算法对结果造成的影响。假设信号进行PFA插值前已进行平动粗补偿，即此时式(4)可写为

$$S(f_r,t_a)=\sum_{m=1}^{M}\sigma_m\exp[-j\frac{4\pi(f_c+f_r)}{c}R_{Tre}]\cdot\exp[-j\frac{4\pi(f_c+f_r)}{c}(x_m\sin\theta+y_m\cos\theta)] \quad (12)$$

式中R_{Tre}表示补偿后的剩余平动分量。

假设转角真实值$\theta=a\theta_e+b\theta_e^2$，$\theta_e$为均匀变化的估计转角，即估计值与真实值之间为二次函数关系，令$K_x=K_r\sin\theta_e$，$K_y=K_r\cos\theta_e$，$K_r=\frac{4\pi(f_c+f_r)}{c}$，则式(12)的第二个指数项进行泰勒展开可写为

$$\exp\left[-j\frac{4\pi(f_c+f_r)}{c}(x_m\sin\theta+y_m\cos\theta)\right]=$$
$$\exp\left[-jK_r\left(x_m\sin\left(a\theta_e+b\theta_e^2\right)+y_m\cos\left(a\theta_e+b\theta_e^2\right)\right)\right]=$$
$$\exp\left[-j\left(ak_xx_m+k_yy_m\right)\right]\times\exp\left(j(bx_m+\frac{(1-a^2)}{2}y_m)\frac{k_x^2}{k_{ye}^2}\left(k_y-k_{ye}\right)\right)\times$$
$$\exp\left(-j\frac{bk_x^2}{k_{ye}^3}x_m\left(k_y-k_{ye}\right)^2\right)\times\exp\left(-j\left(bx_m-\frac{(1-a^2)}{2}y_m\right)\frac{k_x^2}{k_{ye}^2}\right) \quad (13)$$

式中，k_{yc}为距离向波束中心。式(13)中第一个指数项表示散射点的聚焦位置项，第二个指数项表示用估计转角进行插值后的二次距离弯曲项，第三个指数项表示转动校正不完全引起的距离向散焦项，第四个指数项表示方位二次相位项。由式(13)可见，在转动参数未知时，转动引起的线性徙动仍可以被校正，一定程度上降低了平动与转动之间的耦合，但由于高次项的存在，剩余的转动分量仍会对成像结果造成影响。

大转角成像场景中，对目标进行平动补偿时，转动分量$R_r = x_m \sin\theta(t_a) + y_m \cos\theta(t_a)$随着转角$\theta$的增加，其造成的MTRC不可忽略，使用TDCM进行平动补偿时估计的平动分量包含转动造成的MTRC，平动补偿精度降低，式(12)中的剩余平动项不再等效为1。但即使存在剩余平动的影响，PFA仍然可以校正大部分的转动，因此本文提出先通过PFA降低二者的耦合，在后续的迭代中逐步提高运动补偿精度，并进一步提高MTRC校正精度。

3.2　TDCM-PFA联合成像算法

算法整体流程如图3所示，下面对其中几个关键步骤进行说明。

1）平动估计：对应迭代开始阶段的TDCM平动补偿，随着迭代的进行，估计的平动参数会逐渐接近准确值。

2）转动估计：观察式(13)，结合实际情况，对空间目标而言，其运动状态相对平稳，故可假设目标匀速转动，即插值使用的估计转角θ_e与真实值θ之间的关系变为线性关系，此时式(13)可表示为

$$S_{\mathrm{PFAt}} = \exp[-\mathrm{j}(ak_x x_m + k_y y_m)]\cdot \exp[\mathrm{j}(\frac{(1-a^2)}{2}y_m)\frac{k_x^2}{k_{yc}^2}(k_y - k_{yc})] \quad (14)$$

对距离向做FFT得到

$$S_{\mathrm{PFAr}} = \varepsilon_r \exp(-\mathrm{j}ak_x x_m)\cdot \exp[-\mathrm{j}(\frac{(1-a^2)}{2k_{yc}}y_m)k_x^2] \quad (15)$$

$$\varepsilon_r = FFT_r[\exp(-\mathrm{j}k_y y_m)\cdot \exp(\mathrm{j}(\frac{(1-a^2)}{2}y_m)\frac{k_x^2}{k_{yc}^2}k_y)] \quad (16)$$

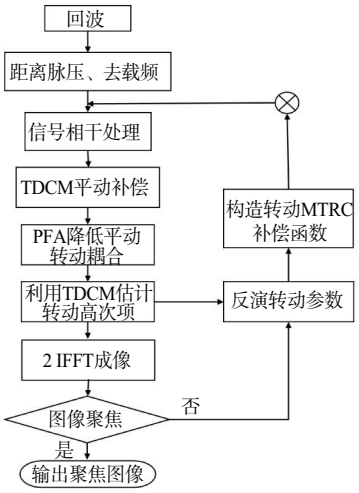


图3　TDCM-PFA大转角ISAR成像算法流程图

对式(15)作TDCM处理可求得方位调频率值$\frac{(1-a^2)}{2k_{yc}}y_m$，进而可利用$\theta_e$与$\theta$的对应关系估计转动参数：假设式(12)中第$k$个距离单元对应的方位调频率为$\gamma_k$，为使结果更加准确，对每个距离单元对应的参数求均值得

$$a = \sum_{k=1}^{K}\frac{1}{K}\sqrt{1 - \frac{2k_{yc}\gamma_k}{y_m}} \quad (17)$$

由此可得到转角θ的粗估计值。

3）迭代成像直至聚焦：上述两步分别对平动和转动分量进行了粗估计，随着迭代的进行，目标的转动参数估计值逐步收敛，此时可认为图像随着参数估计值的收敛达到聚焦条件，转动引起的MTRC已得到良好校正，同时平动补偿的精度也随着迭代得到提高。

4　实验验证

本节对前文提到的算法进行实验验证，包括转速失配时PFA有效性、TDCM在平动补偿中的有效性及TDCM-PFA成像算法验证，具体实验安排如下。

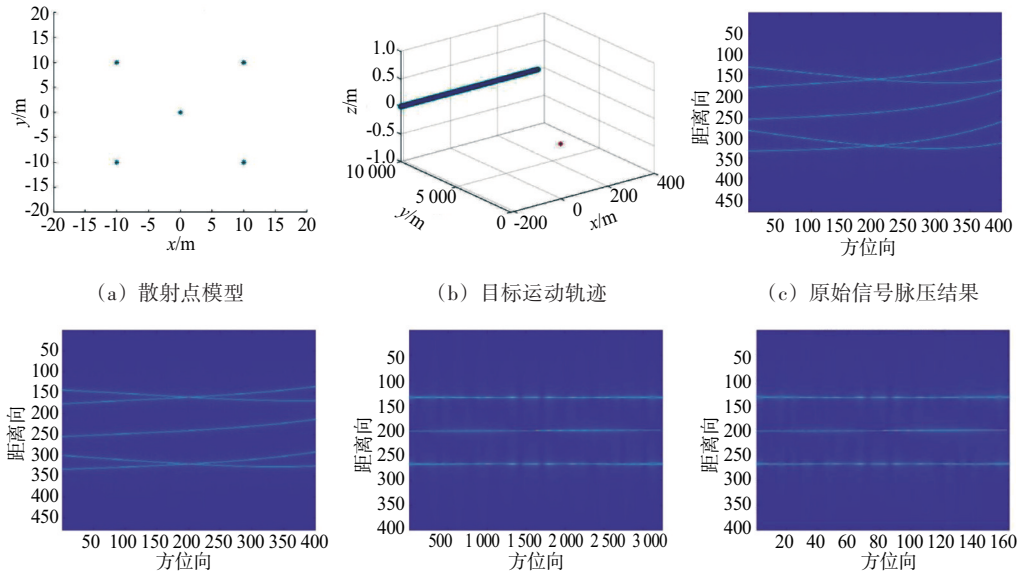
4.1　转速失配时PFA成像性能分析

为验证3.1节中关于转速失配时使用PFA进行插值仍然具有有效性的结论，本节在转速失配的条件下设置了以下仿真实验：其中雷达仿真参数如表1所示，图4(a)为散射点模型，图4(b)为仿

真过程中目标的运动轨迹，图4(c)为原始信号脉冲压缩处理后的结果，图4(d)为在PFA插值操作前进行运动补偿后的信号脉压线，图4(e)和图4(f)分别为真实值插值与转角未知时使用估计值进行插值得到的结果，可以看到后者中由转动引起的MTRC也在一定程度上被校正，由此可以验证3.1节中结论的正确性。

表1 雷达仿真参数

仿真参数	参数值
带宽	1 GHz
载频	10 GHz
脉冲重复频率	100 Hz
脉宽	1 μs
采样频率	1.2 GHz
脉冲积累个数	400



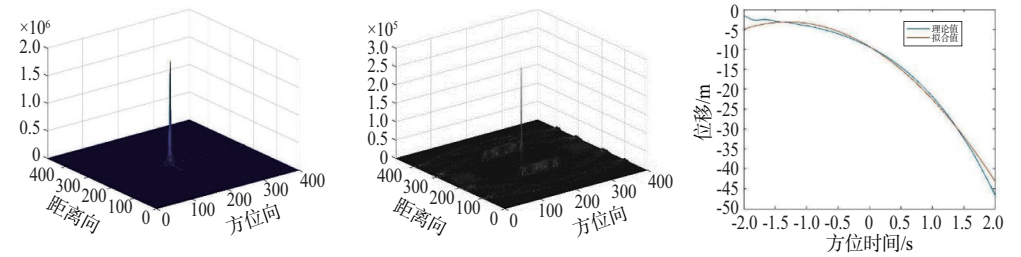
(a) 散射点模型 (b) 目标运动轨迹 (c) 原始信号脉压结果

(d) 插值前运动补偿 (e) 真实转角插值后结果 (f) 0.5倍真实转角插值结果

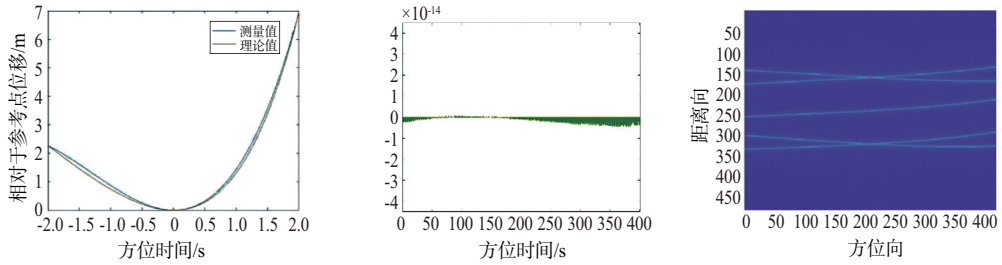
图4 转速失配时极坐标格式插值算法效果

4.2 TDCM平动补偿处理结果与分析

本节为对TDCM方法有效性与正确性的验证，仿真仍使用表1的雷达仿真参数，图5(a)和图5(b)为TDCM操作后信号的平动差分项、自身项与交叉项在RD平面上的分布情况，可以看出，由于交叉项的影响，平动差分项无法被直接提取；图5(c)为通过TDCM处理后对该项进行拟合得到的平动差分值与理论值对比，可以看出，二者之间的差距较小并且其函数曲线与上文中推导的其为二次函数的结论相符；据此可估计出目标的平动参数并拟合出其径向运动曲线如图5(d)所示；图5(e)中显示了理论值与拟合值之间的残差；图5(f)为平动补偿后的脉压线，可以看出在转动不大的情况下，此时的平动分量已基本被校正，剩余误差主要是由转动引起的线性距离徙动及高次项。



(a) 平动差分项在RD平面分布 (b) 自身项与交叉项分布情况 (c) 拟合得到的平动差分值



（d）目标径向运动拟合　　（e）（d）中拟合值与真实值残差　　（f）平动补偿后信号脉压结果

图5　时域信号共轭相乘方法仿真实验

4.3　TDCM-PFA成像算法验证

下面通过实验验证TDCM-PFA成像算法的有效性。设置卫星的散射点模型如图6(a)所示，帆板宽度设置为1.16 m（X轴方向上散射点间隔0.29 m），长度设置为10 m（Y轴方向帆板部位散射点间隔为1 m，卫星主体部位散射点间隔为0.5 m）；雷达参数设置如表2所示，设置目标转动速度为0.1 rad/s，使用STK软件在J2000坐标系下设置目标与雷达的轨道参数如表3所示。

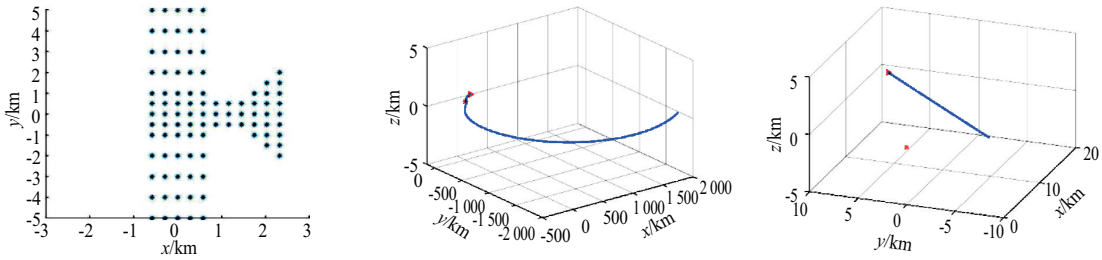
表2　雷达仿真参数

仿真参数	参数值
带宽	3 GHz
载频	10 GHz
脉冲重复频率	100 Hz
采样频率	3.6 GHz
脉冲积累个数	8 192

表3　轨道参数设置

轨道参数	初始位置/km	飞行速度/(km·s^{-1})
目标星	(3 718.7, 41 832.2, 0)	(−3.042 09, 0.275 137, 0)
雷达	(3 434.72, 41 659.2, 0)	(−3.044 66, 0.282 143, 0)

在目标可见时间段内相对运动轨迹如图6(b)所示，为适应成像需求，图6(c)选取20 km内二者间的相对位置变化；图6(d)为使用传统PFA大转角成像算法得到的成像结果；图6(e)~(g)分别表示迭代1、3、5次后得到的图像并定标的结果，在三次迭代中，估计的目标转速分别为0.086，0.094和0.105 rad/s，第5次迭代之后，估计的转动参数值收敛，故可以认为第5次估计到的转动参数值即为最终估计结果，其误差为0.005；在成像所需时间上，直接使用PFA成像方法所用时间为2.151 s，三次迭代成像所用时间分别为2.512，3.164和4.223 s，可以看出，即使需要另外进行转动估计，算法所用时间也和传统PFA方法在一个数量级。为比较迭代过程中散焦的校正情况，图6(h)为本文算法第一、第三、第五次迭代以及传统PFA算法成像结果中相同帆板位置（即图6(e)红色边框位置）的成像效果对比，可以看出，即使在第一次迭代中，本文提出算法的效果也要优于传统算法，并且随着迭代的进行，目标转动引起的MTRC逐步被校正，对其进行量化：使用图像熵作为衡量图像聚焦性的标准，一般而言，图像熵值越小，图像聚焦效果越好，相对于传统方法成像6.556的图像熵值，三次迭代中得到的图像熵值分别为6.541，6.210和6.121，也可以验证方法的有效性。



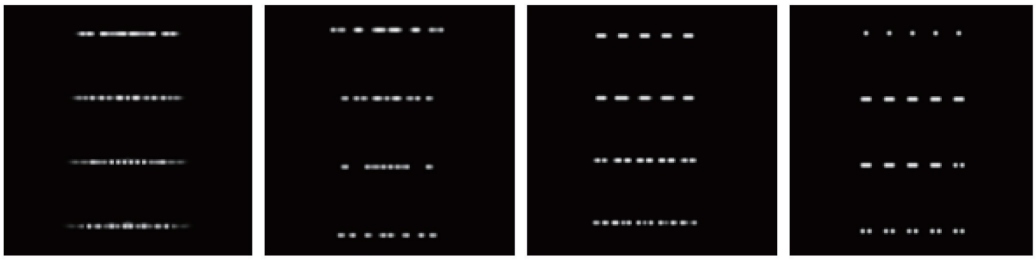
(a) 卫星模型　　(b) 目标与雷达飞行轨迹　　(c) 20 km内目标相对位置变化

(d) 传统PFA成像算法成像结果

(e) 第一次迭代成像结果

(f) 第三次迭代成像结果

(g) 第五次迭代成像结果



(h) PFA成像算法(左1)与本文算法相同帆板位置成像效果对比

图6 TDCM-PFA联合成像算法仿真结果

5 结束语

针对大转角ISAR成像过程中的平动转动耦合问题，本文提出了一种基于TDCM与PFA结合的迭代补偿成像算法。文章对两种基本算法的原理进行了解释与散射点仿真实验，结果验证了二者在补偿平动和校正转动时的有效性，得出PFA在转速失配的情况下仍可一定程度上校正转动的结论，且通过推导发现PFA插值后的剩余转动分量可以通过TDCM处理估计并由此计算出转动角度。基于此，文章在之后部分提出了利用TDCM和PFA通过迭代的方式逐步估计出目标的准确平动与转动参数，并且通过仿真实验说明了该方法的可行性。

参考文献：

[1] ANGER S, JIROUSEK M, DILL S, et al. ISAR Imaging of Space Objects Using Large Observation Angles[C]//2021 21st International Radar Symposium, Berlin, Germany: IEEE, 2021:1-7.

[2] DING Zegang, LIU Siyuan, LI Yinchuan, et al. Parametric Translational Compensation for ISAR Imaging Based on Cascaded Subaperture Integration with Application to Asteroid Imaging[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 60:1-17.

[3] LIU Lei, ZHOU Feng, TAO Mingliang, et al. Adaptive Translational Motion Compensation Method for ISAR Imaging Under Low SNR Based on Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(11): 5146-5157.

[4] 侯颖妮，谢洁.稀疏采样数据大转角高分辨ISAR成像技术研究[J].雷达科学与技术，2021，19(5)：604-609.

[5] PERRY R P, DIPIETRO R C, FANTE R L. SAR Imaging of Moving Targets[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1):188-200.

[6] SAKIN A O, SONGUR A C, ONAT E. Combining Genetic Algorithm Based Joint Time-Frequency Analysis and Keystone Transform for ISAR Image Enhancement[C]// 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany:VDE, 2022:1-6.

[7] GONG Rui, WANG Ling, ZHU Daiyin. High Resolution 3D InISAR Imaging of Space Targets Based on PFA Algorithm with Single Baseline[C]//2023 24th International Radar Symposium, Berlin, Germany:IEEE, 2023:1-10.

[8] SONG Yue, HAI Yu, WU Junjie, et al. An Efficient PFA Subaperture Algorithm for Video SAR Imaging[C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium ,Brussels, Belgium:IEEE, 2021:5179-5182.

[9] CHEN Jiajia, WANG Duo, WANG Kaizhi. Sensor-Based Motion Compensation Methods of Back Projection Algorithm in SAR[C]// 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA:IEEE, 2023:4395-4398.

[10] HE Chi, DENG Yuhui, SUN Guangcai, et al. Multi-Subaperture Interference for SAR Autofocusing[C]// 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA: IEEE, 2023:4536-4539.

[11] 包云霞,毛二可,何佩琨.基于一维高分辨距离像的相关测速补偿算法[J].北京理工大学学报,2008,28(2):160-163.

[12] 李民.基于压缩感知的雷达高分辨成像技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[13] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.

[14] XIAO Mingxi, WANG H, WU Sili, et al. Interferometric SAR Phase Unwrapping Method Based on Improved Markov Energy Model[C]//2022 3rd China International SAR Symposium, Shanghai, China:IEEE, 2022:1-5.

[15] LI Yuhe, CHEN Yanxiang, TONG Xiaolei, et al. Phase Unwrapping by K-Means Clustering in Three-Dimensional Measurement[C]//2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Shenyang,China:IEEE, 2013:65-69.

作者简介:

胡国伟　男,硕士研究生,主要研究方向为雷达成像。

汪　玲　女,教授,博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理。

朱岱寅　男,教授,博士生导师,主要研究方向为SAR/ISAR成像、自聚焦算法、干涉SAR成像、SAR地面动目标指示,以及机载雷达动目标指示技术。

(上接第160页)

14-25.

[19] STINCO P,GRECO M, GINI F, et al.Cognitive Radars in Spectrally Dense Environments[J].IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(10):20-27.

[20] DING Zihang, XIE Junwei, QI Cheng.Transmit Power Allocation Method of Frequency Diverse Array-Multi Input and Multi Output Radar Based on Reinforcement Learning[J].Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 550-557.

作者简介:

周长霖　男,博士研究生,主要研究方向为频率分集阵列和雷达智能抗干扰方法。

王春阳　男,博士,教授、博士生导师,主要研究方向为阵列信号处理和电子对抗理论。

宫　健　男,博士,副教授、博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理和电子对抗理论。

谭　铭　男,博士,讲师,主要研究方向为频率分集阵列和雷达抗干扰方法。

包　磊　男,硕士,助理研究员,主要研究方向为频率分级阵列。

刘明杰　男,博士研究生,主要研究方向为频率分集阵列和雷达波形设计。