

基于高精度运动信息的ISAR分辨率评估方法

刘也^{*①} 叶钒^② 马岩^① 赵华^①

^①(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

^②(空军研究院战略预警研究所 北京 100000)

摘要: ISAR分辨率评估是空间目标成像雷达精度鉴定的重要内容。该文针对ISAR分辨率评估中的基准计算与方法设计两个关键问题进行了详细分析,进而提出了基于空间目标高精度轨道与遥测姿态等运动信息的ISAR方位向定标方法。在此基础上,建立了一种新的ISAR分辨率评估方法。利用某雷达精度鉴定试验中对不同空间目标的实测成像数据,验证了该文方法的合理性与有效性。

关键词: 逆合成孔径雷达成像;分辨率评估;方位向定标

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)09-2728-07

DOI: 10.11999/JEIT190745

ISAR Resolution Evaluation Method Based on High Precision Motion Information

LIU Ye^① YE Fan^② MA Yan^① ZHAO Hua^①

^①(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

^②(Institute of Strategic Early Warning, Air Force Academy, Beijing 100000, China)

Abstract: ISAR resolution evaluation is an important part of accuracy evaluation of space target imaging radar. Two difficult problems, i.e. the selection of evaluation criteria and the design of evaluation methods are discussed in detail. Then an ISAR cross-range scaling algorithm based on high precision orbit and telemetry attitude of space target is proposed. A new ISAR resolution evaluation method is established based on the new scaling technique. The method is validated by using the actual imaging test data for different types of space targets.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging; Resolution evaluation; Cross-range scaling

1 引言

在空间逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)中,成像分辨率决定了可分辨单元的最小距离,不但反映了图像的成像质量,也对ISAR图像在目标分类、识别等的应用效果有重要影响,是评估ISAR成像质量的重要指标。文献[1]参考SAR图像中的图像熵、等效视数以及平均梯度等进行了ISAR质量评估方法研究,但该文算例主要针对的是空中目标,没有进行指标的适应性分析,也没有专门讨论分辨率能力的评估。Rihaczek^[2]认为单个点目标功率的分布不能有效地表示系统性能,综合考虑两个点目标提出功能分辨率的概念。之后Mir和Carlson^[3]在不考虑相位影响的情况下,研究了两个点目标的空间分辨率,评价模型相对简单,不适用于ISAR方位向定标。文

献[4]针对分辨概率计算过程中最小值位置点变化的问题,改进了分布目标可分辨判断准则。但这些方法利用了SAR图像目标统计特性,尚无涉及在ISAR中的适用性。文献[5]利用了图像整体信息估计目标旋转角度以提高成像质量,但需要根据设计参数进行雷达成像和图像配准,不能直接用于评估。

不同于SAR的分辨率评估,雷达测量空间目标并进行ISAR成像时,无法通过设置已知定标点进行方位向的准确定标。这导致的评估基准缺失,直接影响了ISAR成像分辨率的客观判断,也不利于ISAR图像质量及特征提取等综合性能的评估。ISAR定标的核心是获得成像积累时间内目标相对于雷达的“真实”转角,现有的定标方法研究也都是针对此展开的。一种直接和易行的方法是利用雷达窄带测量数据进行轨迹拟合实现雷达转角估计,但由于雷达测角精度不高,这种方法的定标精度较低。直接从成像结果出发,可以估计距离空变调频率或直接计算成像转动参数^[6],此时需要构造适当的优化函

数,且依赖于求解方法的匹配性和计算效率^[7]。文献[8]通过分析不同时段的两幅图像之间的拉伸和旋转结果,利用遍历和二分法来估计目标的旋转角速度,进而对方位向定标。这些方法易于理解,但是不适用于复杂3维运动的目标。文献[9]基于高分辨距离像的多脉冲来提高测角精度,但精度能否满足雷达评估要求还依赖于具体应用需求,且目标姿态对成像的影响仍未被考虑。另一类应用较多的是特显点跟踪法^[10],它利用序列像中的散射点进行转角估计,无需窄带运动信息,但特征点的质量对评估结果影响很大。也有文献通过距离单元调频率估计转角^[11,12],因ISAR的转角较小,此类方法受误差影响较大。文献[13]通过数据质量分类降低粗大误差点(“局外点”)的影响,但点分类的阈值又依赖于点概率分布,且仍需考虑划窗的设置。还有一类基于图像整体质量的运动参数估计方法^[14],它们通过图像熵、对比度等判断最有可能的转角。但这些质量评价方法都来源于SAR成像,对ISAR的适应性以及实际阈值设置还不能很好地解决。近年来,也有学者考虑引入人工智能的方法进行雷达成像质量评估,以提高计算效率和可靠性^[15]。文献[11]利用子图像散射中心多普勒调频率计算实现转动估计,但该方法依赖于人工经验的图像分割。此外,从评估标准建立角度,以上方法都是依靠雷达自身的测量信息进行的,并非第三方的客观标准,存在评估标准和待评估对象的“耦合”关系。文献[16]指出空间目标的“合作”特性,通过运动先验信息改进空间目标ISAR成像质量。但该算法推导主要采用圆轨道假设,没有考虑姿态的影响,且未涉及成像结果如何评估的问题。

综上,对于雷达测量空间目标能力的评估,国外公开资料获取困难,国内的性能评估还集中于弹道/轨道测量领域,分辨率等成像能力的评估方法研究刚刚起步,基于SAR图像评估方法的适用性有待分析,评估基准所需的ISAR定标问题没有实现针对性的解决。本文以空间目标成像雷达装备精度鉴定为背景,开展ISAR分辨率评估方法研究。第1节分析了ISAR分辨率评估的关键问题,结合雷达精度鉴定特点,给出了本文拟采取的解决思路;进而,在第2节重点讨论方位向定标方法,建立ISAR分辨率的评估标准;第3节研究分辨率评估方法;最后在第4节利用雷达实测数据,进行方法的验证。这里的方法与结论有助于ISAR图像质量的科学客观评估,用于准确掌握成像雷达工作状态,对于优化雷达系统设计和提升雷达工作效能有重要的理论意义与应用价值。

2 问题分析

图1给出了理想点目标ISAR仿真结果。雷达2维ISAR图像有距离向和方位向两个维度,这里的距离向指雷达视线方向,方位向指同时垂直于雷达视线及目标相对雷达旋转轴的方向。在测量空间目标时,ISAR通过宽带信号压缩获得目标高分辨距离向成像,通过相关积累的转动多普勒信息获得高分辨方位向成像。根据图像特点,ISAR空间分辨率表示目标脉冲响应主瓣半功率宽度对应的距离,即脉冲响应函数主瓣-3 dB点的宽度。为了给出ISAR图像分辨率的客观评估,需要获取图像中每个像素点代表的实际空间距离,以及计算目标对应的像素跨度,也就是评估基准与评估方法两方面内容。评估分为距离和方位两个维度,距离向的计算方法与SAR图像类似。因此,为满足装备精度鉴定中雷达成像分辨率的科学合理评估,核心问题是解决方位向评估基准(即定标问题),建立可操作的评估计算方法。

2.1 评估基准问题

不同于SAR成像评估,ISAR对空间目标成像测量时无法通过设置已知定标点进行方位向的准确定标。根据ISAR成像原理,ISAR方位向定标的关键是获得成像积累时间内目标相对于雷达的总转角。现有定标方法也都针对转角计算展开,可以分为窄带辅助、宽带特征提取与图像匹配3种方法。

窄带辅助方法利用雷达窄带测量的目标距离与方位等数据拟合目标运动轨迹,进而通过轨迹与雷达位置关系获得成像转角。这种方法实现简单、计算速度快,但由于成像测量时雷达处于非合作测量方式,轨迹拟合或单雷达测量数据定轨的精度不高,且无法计算目标姿态变化引起的成像转角。因此,该类方法的定标精度较低,不满足装备精度鉴定需求。

宽带特征提取方法主要利用雷达宽带回波或图像的某些谱域特征,计算成像测量时刻目标相对雷达的转动角速度。该方法不需要目标轨迹和姿态数据,精度取决于信号处理算法以及雷达成像性能。

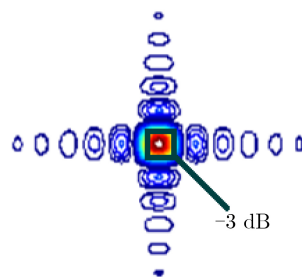


图1 点目标ISAR成像及其分辨率示意图

但较低的分辨率可能对应了较差的定标结果, 据此进行分辨率评估, 存在评估基准与被评估对象相互耦合的问题。此外, 该类方法需要一些运动先验特征, 如目标匀速转动、目标轨迹为圆轨道或满足2次曲线等, 目标复杂的姿态运动也影响定标结果的精度。

图像匹配方法是在所有可能的成像转角范围内, 计算理论图像与实际图像的特征差异, 通过搜索方式计算出成像转角。该类方法无需过多目标运动先验信息约束, 且综合了目标轨道和姿态运动引起的转角变换。但由于需要计算不同转角的图像与相应特征, 该方法若应用于精度鉴定, 则需要十分精细的搜索粒度, 将带来巨大的计算负担。而且, 目前文献中所采用的图像熵、对比度等特征, 都是来源于SAR图像, 该类方法对ISAR图像的适用性还有待验证。

以上方法都是基于目标运动特效的完全未知, 仅依靠雷达自身的测量信息进行成像和评估处理。实际上, 成像能力评估的一个重要需求是在雷达设备的精度鉴定中。此时常规外测精度鉴定试验可以提供高精度轨道信息, 同时也可以合理设计测量试验, 选择具备姿态测量的目标进行跟踪成像, 从而获得更可靠和高精度的运动信息。由此, 在合作空间目标监测信息的支持下, 可以实现目标相对雷达的成像转角计算。这种方法不但精度很高, 而且评估标准(定标结果)与被评估对象(成像结果)的数据来源不同, 是一种外符合性能评估方式, 其评估结果更加合理可信, 本文方法正是基于这一思想展开。

2.2 评估方法问题

雷达图像分辨率主要是针对点目标而言, 体现在点目标之间、及点目标与背景之间的区分度。点目标是指尺寸远小于雷达分辨单元的目标, 对于空间目标ISAR成像雷达, 对其分辨性能的合理评价需要针对孤立散射点进行。因此, 这里评估方法设计的关键是孤立点目标选取与点目标区分度计算两个方面。

孤立点目标选取方面。点目标的选取依赖于对

ISAR成像处理原理及算法的准确理解。由于相干斑等会影响机器的自动判读结果, 这里拟采用自动选择与人工选择相结合的方式, 以确保选择的点目标是有效的。同时, 考虑点目标选择数量尽量多, 并且涵盖不同目标不同成像时刻, 以消除成像条件以及相干噪声等的影响, 给出雷达成像分辨率的客观评价。

点目标区分度计算方面。直观理解, 点目标能否被区分, 取决于目标区域内各像素点对应幅值与像素点距离峰值点的远近关系。如图1所示, 点目标确定后, 区分度计算就依赖于对点目标位置的准确计算, 以及-3 dB幅值对应像素跨度信息的准确提取。

3 ISAR方位向定标方法

本文充分利用雷达精度鉴定试验中的合作测量与空间信息监测能力支持, 采用外部高精度轨道和遥测姿态信息计算ISAR成像测量过程的“真实”转角, 从而推导ISAR方位向定标公式。其基本策略是, 利用轨道信息获得目标位置运动造成的成像转角, 利用姿态信息获取目标姿态运动造成的成像转角。下面给出两类具体的转角计算方法。

3.1 基于视线累积的等效转角计算

根据目标高精度轨道信息, 可以获取目标成像时刻的空间位置速度与姿态信息。如图2所示, 计算各个时刻目标相对雷达的位置和姿态关系, 也即获得了成像历程内目标位置引起的雷达视线变化, 将其累积即可获得目标成像的等效转角, 具体计算方法如下。

3.1.1 位置变化对应的成像转角

在ISAR成像起止时间内, 利用高精度轨道数据插值, 计算空间位置和速度序列 $\{\mathbf{X}_i\}$ 和 $\{\mathbf{V}_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$), 序列采样率为雷达宽带脉冲重复频率。进而, 如图3所示, 根据雷达天线相位中心的地心地固直角坐标 \mathbf{X}_R , 计算各采样时刻目标的雷达视线角序列 $\{\alpha_i\}$ 满足

$$\cos(\alpha_i) = \frac{(\mathbf{X}_R - \mathbf{X}_i) \cdot \mathbf{V}_i}{\|\mathbf{X}_R - \mathbf{X}_i\| \cdot \|\mathbf{V}_i\|} \quad (1)$$

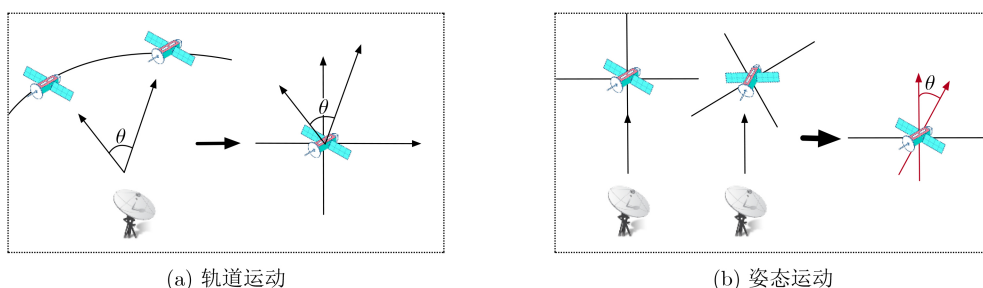


图2 轨道运动和姿态运动造成的成像测量等效视线转动示意图

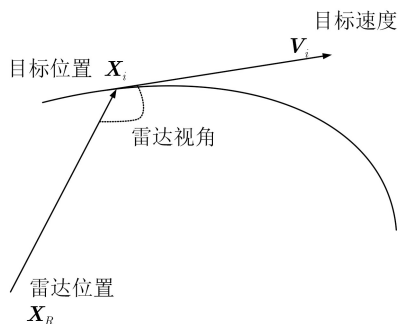


图3 雷达和目标所成视角示意图

由此，可按照式(2)计算目标轨道运动造成的雷达成像转角

$$\Delta\theta_1 = \sum_{i=1}^{N-1} |\alpha_{i+1} - \alpha_i| \quad (2)$$

3.1.2 姿态变化对应的成像转角

在ISAR成像起止时间内，通过高精度遥测姿态数据插值获得目标姿态序列 $\{\theta_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$)，序列采样率为雷达宽带脉冲重复频率。根据目标的空间位置 $\{X_i\}$ 和雷达天线相位中心的地固坐标 X_R ，通过坐标变换及角度投影，计算雷达成像平面内的转角序列 $\{\beta_i\}$ ，则可计算目标相对雷达的转角

$$\Delta\theta_2 = \sum_{i=1}^{N-1} |\beta_{i+1} - \beta_i| \quad (3)$$

这里的成像平面是指位置 $\{X_i\}$ 和速度 $\{V_i\}$ 矢量合成的平面。最终，合成目标相对雷达的成像转角为

$$\Delta\theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 \quad (4)$$

3.2 基于坐标变换的等效转角计算

通常，空间目标轨道与惯性系下给出、姿态在轨道系下给出，而雷达成像平面内的转角才对应了目标成像的真实历程。因此，如图4所示，等效转角计算的前提是完成一系列目标空间位置的坐标变换，从而在成像平面内完成目标旋转角度的计算。

3.2.1 位置变化对应的成像转角

根据目标高精度轨道信息，可以获取目标成像起止时刻的空间位置A和B，又假设雷达在地固系下的位置为P。将3个位置坐标从惯性系转换到地固系，图4中红色虚线组成的三角形PAB就代表了地固系下的雷达成像平面。为了计算成像转角，定义成像坐标系为：原点P，X轴从P指向AB的中点C，Y轴为从PB到PA的旋转轴(与成像平面垂直)，Z构成右手系。

若不考虑卫星姿态的影响，根据坐标系定义，可以依次计算地固系到成像系的旋转矩阵 M_1 、惯性系到地固系的旋转矩阵 M_2 、轨道系到惯性系的

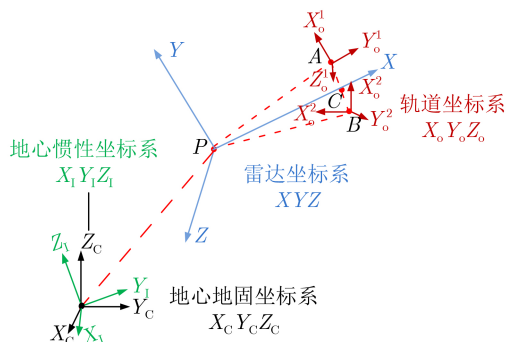


图4 雷达成像的坐标变换示意图

旋转矩阵 M_3 ，则从卫星本体到成像系的旋转矩阵为

$$M = M_1 \times M_2 \times M_3 \quad (5)$$

由此旋转矩阵计算旋转欧拉角，相应就获得了目标相对于雷达的视线转角。

3.2.2 姿态变化对应的成像转角

引入卫星遥测姿态信息，此时，将成像过程中各采样时刻的轨道系姿态角变换到地固系，计算本体到地固系旋转矩阵。与式(4)叠加，即可引入姿态变化对成像转角的影响。这里的坐标变换、姿态矩阵计算等，可以参阅卫星弹道/轨道动力学相关书籍。

4 ISAR成像分辨率评估方法

ISAR成像分辨率评估是从图像中提取点目标主瓣占据的分辨单元数，通过计算对应的空间距离获得实际分辨率，进而与理论分辨率进行对比。理论分辨率又称设计分辨率，主要根据ISAR成像原理，利用成像测量的带宽和转角计算得到。由于理想点目标并不存在，实际处理时，从ISAR图像中提取相对孤立的散射点，分别进行两个维度(ISAR距离向和方位向)的评估。

4.1 理论分辨率计算

4.1.1 距离分辨率

ISAR通过脉冲压缩技术或者去斜技术实现距离高分辨成像，距离分辨率由发射信号带宽决定，发射信号带宽越大，距离分辨率越高。理论距离分辨率计算公式为

$$\rho_r^0 = \kappa \frac{c}{2B} \quad (6)$$

其中，B为发射信号带宽， κ 为脉冲压缩主瓣展宽系数，c为光速。实际工程中，雷达系统还需要考虑成像算法(如窗函数)和噪声等因素的影响， κ 一般在系统设计过程中通过误差因素的理论分析给出。

4.1.2 方位分辨率

目标各散射点相对转轴的转动引起子回波相位

变化(多普勒的变化), 横向位移越大的散射点, 其多普勒频率越高。ISAR雷达依靠多普勒效应实现方位(横向)高分辨成像, 方位分辨率由雷达信号波长和目标相对雷达转过的角度决定。理论方位分辨率计算公式为

$$\rho_a^0 = \kappa \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (7)$$

其中, λ 为信号波长, $\Delta\theta$ 为目标在成像时间内相对雷达的转角, κ 为展宽系数。对方位分辨率而言, 转角越大, 分辨率越高; 当转角一定时, 频段越高, 波长越小, 分辨率就越高。本文的评估过程, $\Delta\theta$ 采用3.1.2节的计算方法获得。实际工程中, κ 一般在系统设计过程中通过误差因素的理论分析给出。

4.2 实际分辨率计算

4.2.1 距离分辨率

ISAR的实际距离分辨率由图像中点目标主瓣占据的距离向分辨单元数来计算。将脉冲响应函数主瓣峰值点在距离向剖面图中的3 dB宽度(半功率点)作为分辨率, 评估所用的分辨率计算公式为

$$\rho_r = n_r \rho_1^r \quad (8)$$

其中, n_r 为点目标距离像3 dB宽度所占的单元个数, 通过图像差值等处理手段, 从ISAR图像中获取; ρ_1^r 为雷达测量时一个距离单元对应的实际距离, 近似计算时可以认为 $\rho_1^r \approx c/(2B)$ 。实际计算也可考虑设备数据采集的影响, 若通过直接脉冲压缩技术得到高分辨距离像则 $\rho_1^r = c/(2 \cdot F_s)$, 若通过去斜技术得到高分辨距离像则 $\rho_1^r = [c/(2B)] \times (T_P/T_S)$, 其中 F_s 为信号采样率、 T_S 为采样的时间宽度、 T_P 为发射信号的脉冲宽度。

4.2.2 方位分辨率

ISAR的实际方位分辨率由图像中点目标主瓣占据的方位向分辨单元数来计算。将脉冲响应函数主瓣峰值点在方位向剖面图中的3 dB宽度(半功率点)作为分辨率, 评估所用的分辨率计算公式为

$$\rho_a = n_a \rho_1^a \quad (9)$$

其中, n_a 为点目标方位像3 dB宽度所占的单元个数, ρ_1^a 代表方位向定标结果, 即测量时一个像素的空间距离, 可以认为 $\rho_1^a = \lambda/(2 \cdot \Delta\theta)$, 或由雷达成像软件提供。

4.3 分辨率评估

4.3.1 点目标提取

点目标提取采用人工与自动相结合的方式, 通过人工在图像上选取具有代表性位置的强散射点区域, 再自动确定强散射点。其原则是选取ISAR图像中相对孤立的散射点(例如空间目标的太阳能帆

板区域等), 并将亮度最大像素点作为散射点位置。选取方法如下:

步骤1 在图像上人工用矩形窗选择若干孤立散射点;

步骤2 在每个矩形窗中心点截取 $M_0 \times M_0$ 像素区域, 并搜索亮度最大像素点所对应散射点, 作为待评估点目标。其中 M_0 的选择是尽量使窗内散射点较少, 可以根据实际情况设定。

4.3.2 分辨率计算与评估

选取散射点后, 利用4.2节公式, 进行实际分辨率计算。进而, 与理论分辨率进行比较, 计算得到的误差代表了图像中所选像素点的分辨率精度, 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta\rho_a &= \rho_a - \rho_a^0 \\ \Delta\rho_r &= \rho_r - \rho_r^0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由于方位向绝对分辨率与成像积累时间(转角)直接相关, 也可采用比值的形式进行精度评价, 即

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\rho}_a &= \rho_a / \rho_a^0 \\ \tilde{\rho}_r &= \rho_r / \rho_r^0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

理想点目标并不存在, 本文的目的是评估雷达成像能力, 而不是单幅图像或图像中某个目标的成像质量。因此, 为了给出雷达的最终分辨率精度, 对雷达测量的多幅图像中待评估点的分辨率误差进行统计, 取最优分辨率(最小值)作为分辨率计算值。

5 数值试验

本节利用某雷达精度鉴定试验的实测数据, 开展ISAR成像的定标, 进行实际分辨率的计算与评估。计算过程中, 为了给出目标分辨率性能的综合评价, 将成像测量的目标分为4大类, 即大型目标(面目标、结构复杂)、旋转目标(运动特性复杂)、标校球(近似点目标)、空间碎片(特性未知目标), 各类目标的特点如表1所示。

在各目标典型测量弧度内, 人工选取质量较好的图片进行分辨率计算与评估。某球形目标与某面目标的评估过程见图5和图6, 从左至右依次为原始图像、提取的点目标图像、点目标方位向剖面图、点目标距离向剖面图。可见球形目标的剖面图左右对称特征明显, 主瓣和旁瓣区分明显, 与图1的理论分析结果一致; 但大型面目标中的散射点相互影

表1 成像分辨率计算中的目标分类情况

序号	类型	特征
1	大型目标	面目标、结构复杂
2	旋转目标	运动特性复杂
3	标校球	近似点目标
4	空间碎片	特性未知目标

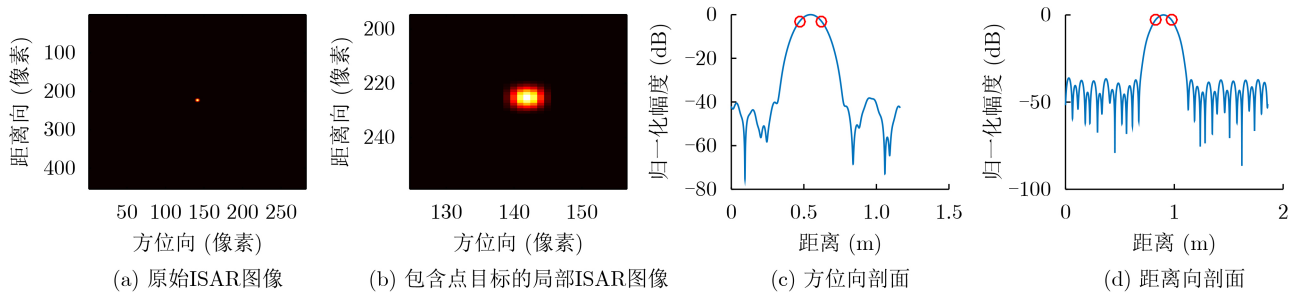


图5 球形目标2维ISAR像评估结果

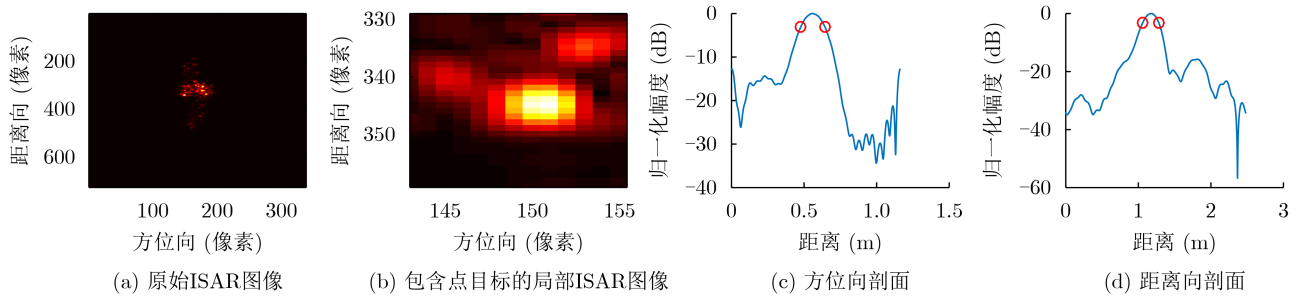


图6 大型面目标2维ISAR像评估结果

响较大，剖面图呈明显的非对称特征，主瓣和旁瓣差异较小。因此，大型面目标中的孤立散射点选取对分辨率评估结果影响很大，实际应用中，点目标更能代表雷达工作的极限分辨能力。

进一步，采用式(11)的计算方法，对10个典型目标的分辨率指标进行对比，计算分辨率与雷达设计分辨率比值如表2所示。表中A-n示目标A的第n次测量，如5-1代表对目标5第1次测量图像的分辨率评估结果。由表2可见，本文方法实现了目标分辨率的计算与评估，各类目标的分辨率计算结果比较一致。其中，同类目标的结果差异主要是选取孤立散射点的不同导致。对比各类目标可以发现，球形目标(类型3)散射点较易选取，评估结果中的计算值小于其他几类目标，表明其实际成像测量的聚焦性能较好，计算结果更接近理论分辨率。各类目标的分辨率评估结果在距离向上存在差异且无明显规律性，进一步说明了散射点选取的重要性。此外，空间碎片(类型4)与旋转目标(类型2)的计算结果自身差异较大，这是由于两者属于非合作目标，除孤立散射点选取困难外，目标测量时的成像时间及其他参数设置等也没有参考信息，因此影响了分辨率的精度。特别是旋转目标的姿态运动特征在不同观测角度的影响差异较大，导致了不同程度的成像散焦。根据以上结果，为了给出雷达分辨率性能的更合理评价，建议根据不同测量任务场景涉及的目标进行细致合理的分类，建立对应不同目标的多个分辨率指标。

表2 某雷达精度鉴定试验中ISAR分辨率评估结果

目标	分类	距离向	方位向	目标	分类	距离向	方位向
1	3	1.46	1.51	6	1	1.67	1.60
2	3	1.47	1.50	7	1	1.65	1.52
3	3	1.46	1.51	8-1	2	1.64	1.41
4	3	1.48	1.50	8-2	2	1.31	1.7
5-1	1	1.70	1.53	9	4	1.553	1.43
5-2	1	1.70	1.64	10	4	1.78	1.53

6 结束语

ISAR分辨率评估是空间目标成像雷达特性测量性能评估的重要环节，是雷达成像质量与特征提取精度综合评估的基础。本文分析了ISAR分辨率评估需要解决的评估基准与评估方法两个关键问题，进而根据雷达装备精度鉴定试验的数据特点，提出了基于空间目标高精度轨道与遥测姿态信息的ISAR方位向定标方法，建立了ISAR分辨率计算与统计评估方法，利用实际雷达成像测量数据进行了验证，得出了一些有益的结论。后续研究工作将集中于方法的流程优化与工程化改造，同时基于定标与分辨率计算，开展ISAR成像质量与特征提取精度的综合评估方法研究。

致谢：感谢国防科技大学高勋章教授、金光虎副教授、何志华教授与中山大学黄海峰教授在ISAR原理，以及孤立散射点选取策略方面给予的技术支持。

参考文献

- [1] 句彦伟, 张燕. ISAR图像质量评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(2): 297–303. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2015.02.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2015.02.11).
JU Yanwei and ZHANG Yan. Research on ISAR image quality evaluation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(2): 297–303. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2015.02.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2015.02.11).
- [2] RIHACZEK A W. Radar resolution of ideal point scatterers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 842–845. doi: [10.1109/7.489527](https://doi.org/10.1109/7.489527).
- [3] MIR H S and CARLSON B D. On the definition of radar range resolution for targets of greatly differing RCS[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(3): 655–663. doi: [10.1109/TIM.2011.2170371](https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2170371).
- [4] 王岩飞, 陈新星. 一种SAR分布目标可分辨概率精确计算方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 2848–2853.
WANG Yanfei and CHEN Xinxing. A precise method for calculating the resolution of SAR distribution targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 2848–2853.
- [5] 史林, 郭宝锋, 马俊涛, 等. 基于图像旋转相关的空间目标ISAR等效旋转中心估计算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1280–1286. doi: [10.11999/JEIT181086](https://doi.org/10.11999/JEIT181086).
SHI Lin, GUO Baofeng, MA Juntao, *et al.* Rotation center estimation algorithm for ISAR image of the space target based on image rotation and correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1280–1286. doi: [10.11999/JEIT181086](https://doi.org/10.11999/JEIT181086).
- [6] 邵帅, 张磊, 刘宏伟. 一种基于图像最大对比度的联合ISAR方位定标和相位自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 779–786. doi: [10.11999/JEIT180521](https://doi.org/10.11999/JEIT180521).
SHAO Shuai, ZHANG Lei, and LIU Hongwei. A novel joint ISAR cross-range scaling and phase autofocus algorithm based on image contrast maximization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 779–786. doi: [10.11999/JEIT180521](https://doi.org/10.11999/JEIT180521).
- [7] ZHANG Shuanghui, LIU Yongxiang, LI Xiang, *et al.* Fast ISAR cross-range scaling using modified Newton method[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1355–1367. doi: [10.1109/TAES.2017.2785560](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2785560).
- [8] 李东, 张成祥, 赵迪, 等. 基于伪逆极坐标傅里叶变换的快速ISAR方位定标[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2): 262–269. doi: [10.11999/JEIT180299](https://doi.org/10.11999/JEIT180299).
LI Dong, ZHANG Chengxiang, ZHAO Di, *et al.* Fast cross-range scaling for ISAR imaging based on pseudo polar Fourier transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(2): 262–269. doi: [10.11999/JEIT180299](https://doi.org/10.11999/JEIT180299).
- [9] 马健, 钱涛, 周剑雄. 基于高分辨距离像测角的ISAR图像横向定标[J]. 空军预警学院学报, 2016, 30(3): 178–182. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2016.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2016.03.006).
MA Jian, QIAN Tao, and ZHOU Jianxiang. Cross-range scaling of ISAR image based on angle measurement with high resolution range profiles[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2016, 30(3): 178–182. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2016.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2016.03.006).
- [10] 盛佳恋, 张磊, 邢孟道, 等. 联合运动补偿的逆合成孔径雷达成像方位定标方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 859–865. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08).
SHENG Jialian, ZHANG Lei, XING Mengdao, *et al.* Joint method of motion compensation and cross-range scaling for inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(5): 859–865. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08).
- [11] MARTORELLA M. Novel approach for ISAR image Cross-Range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(1): 281–294. doi: [10.1109/TAES.2008.4517004](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4517004).
- [12] MUÑOZ-FERRERAS J M and PÉREZ-MARTÍNEZ F. Uniform rotational motion compensation for inverse synthetic aperture radar with non-cooperative targets[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2008, 2(1): 25–34.
- [13] 刘鑫阁, 邢孟道, 孙光才. 一种高精度的ISAR转动补偿和方位定标方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(9): 2250–2257. doi: [10.11999/JEIT171209](https://doi.org/10.11999/JEIT171209).
LIU Xinge, XING Mengdao, and SUN Guangcai. A high-precision method of the rotation compensation and cross-range scaling for ISAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(9): 2250–2257. doi: [10.11999/JEIT171209](https://doi.org/10.11999/JEIT171209).
- [14] 叶春茂, 鲁耀兵, 宋建社, 等. 一种ISAR目标转动补偿及图像尺寸标定方法[J]. 电子学报, 2014, 42(3): 611–615. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.030).
YE Chunmao, LU Yaobing, SONG Jianshe, *et al.* A rotation compensation and image scaling method for ISAR targets[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(3): 611–615. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.030).
- [15] 杨磊, 毛欣瑶, 杨晓炜, 等. 基于非监督贝叶斯学习雷达性能指标动态评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 74–82. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.10).
YANG Lei, MAO Xinyao, YANG Xiaowei, *et al.* Dynamic evaluation of radar performance index based on unsupervised Bayesian learning[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(1): 74–82. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.10).
- [16] 周叶剑, 张磊, 王虹现, 等. 空间轨道目标的逆合成孔径雷达成像质量分析[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 17–24.
ZHOU Yejian, ZHANG Lei, WANG Hongxian, *et al.* Performance analysis on ISAR imaging of space targets[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 17–24.
- 刘也: 男, 1982年生, 助理研究员, 主要研究方向是雷达信号与数据处理、数据工程及人工智能等领域。
- 叶钊: 男, 1981年生, 助理研究员, 主要研究方向是ISAR图像处理与目标识别等领域。
- 马岩: 男, 1977年生, 研究员, 主要研究方向是光学与雷达信号处理、特性分析与系统设计等领域。
- 赵华: 男, 1980年生, 副研究员, 主要研究方向是雷达数据处理、数据工程与人工智能等领域。