

引用格式:Wang Feng,Xu Feng,Jin Yaqiu.3-D Information Reconstruction of a Space Target from 2-D ISAR Image Sequence[J].Remote Sensing Technology and Application,2016,31(5):900-906.[王峰,徐丰,金亚秋.利用序列 ISAR 图像获取空间目标 3-D 信息的方法[J].遥感技术与应用,2016,31(5):900-906.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.0900

利用序列 ISAR 图像获取空间目标 3-D 信息的方法

王 峰,徐 丰,金亚秋

(复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室,上海 200433)

摘要:如何从空间目标序列性二维(2-D,Two-Dimentional)逆合成孔径雷达(ISAR,Inverse Synthetic Aperture Radar)成像获取目标的三维(3-D)信息,是目标特征自动识别(ATR, Automatic Target Recognition)技术的重要研究课题。利用双向射线跟踪(BART,Bidirectional Analytic Ray Tracing)方法,计算连续多角度观测条件下空间目标的电磁散射数据,并由此获取空间目标的 ISAR 序列 2-D 图像。再利用 KLT(Kanade-Lucas-Tomasi)特征跟踪算法,跟踪提取 2-D 序列 ISAR 图像中的特征点(强散射点),获得其 2-D 坐标。然后,基于正交因式分解法(OFM, Orthographic Factorization Method),计算强散射点的 3-D 坐标,获取空间目标的 3-D 信息。通过简单六棱柱模型,验证重构算法的精度;并以 ENVISAT 卫星模型为例,给出强散射点的 3-D 重构结果。结果表明,本文对空间目标 3-D 信息获取方法能有效地从 ISAR 序列 2-D 图像中重构目标的三维信息。

关 键 词:ISAR 成像;3-D 信息;空间目标;BART;正交因式分解法

中图分类号:TN 95;TP 75 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2016)05-0900-07

1 引 言

在轨空间目标监视是国家太空安全技术的一项重大需求,其任务是对在轨空间目标进行精确探测与跟踪,获取目标的尺寸、形状、姿态及轨道参数等信息,进一步实现对目标类型、属性、用途、威胁的判别,准确掌握和实时提供空间目标态势信息。逆合成孔径雷达(ISAR)因其能全天时、全天候工作的优点,成为解决空间目标分辨、识别、属性判别等关键难题的重要技术手段。ISAR 成像的基本原理是通过发射宽带信号,获取高的距离分辨率,通过较大的积累角获取高的方位分辨率。但是,在实际应用中,ISAR 通常只获取目标距离向、方位向的 2-D 图像,很难获取目标的 3-D 图像。对于自动目标识别(ATR)技术来说,如何从 2-D ISAR 图像中获取目标 3-D 信息的实际需求愈来愈显得迫切。文献[1-8]

已经开展了相关课题的研究,由于 ISAR 成像分辨率及特征提取技术的限制,上述文献给出的实验结果多为数目极少(几个或几十个)的散射点的 3-D 分布,这些信息对于目标的 3-D 几何外形重构及状态研判仍是不足的。

ENVISAT 是 2002 年欧空局(ESA)发射的一颗对地遥感卫星,于 2012 年 4 月 8 日与卫星控制中心失去联系。在欧空局最终宣布 ENVISAT 任务结束之前,各方通过诸如光学望远镜、红外成像、雷达成像等技术手段试图获取 ENVISAT 的状态信息,从而为断定卫星是否可修复提供依据。Lemmens 等^[9-10]提出了一种基于卫星三维模型的形状匹配方法,在需要预先获取卫星的三维模型和轨道参数条件下,寻求获取卫星的姿态信息。

本文提出了一种利用序列性 ISAR 图像获取空间目标 3-D 信息的方法。只需获得一个连续的

收稿日期:2015-11-30;修订日期:2016-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61471127),上海市杨浦鼎元人才基金。

作者简介:王 峰(1984—),男,江苏盐城人,博士研究生,主要从事空间目标 ISAR 成像研究。E-mail:fengwang@fudan.edu.cn。

通讯作者:金亚秋(1946—),男,上海人,教授/中国科学院院士,主要从事散射与辐射传输、空间微波遥感信息等方面研究。

E-mail:yqjin@fudan.edu.cn。

ISAR 成像序列,通过强散射点提取、图像匹配,再由因式分解法三维重构强散射点的 3-D 信息,由于 ISAR 成像分辨率的提高及特征提取方法的改进,较多(数百个)强散射点特征的 3-D 信息可以被获取,从而能够获取卫星的形状信息(尤其是特征明显的太阳能电池帆板的朝向)。

本文通过实现 ENVISAT 卫星的 ISAR 成像模拟,与实测 ISAR 数据的比对,验证了模拟方法的有效性。选取一个简单的六棱台作为验证模型,由序列 ISAR 图像获取六棱台各顶点的 3-D 坐标,与真实坐标相比较,验证重构算法的有效性。最后,利用 ENVISAT 卫星的序列 ISAR 图像,获取强散射点的 3-D 坐标及卫星的形状,判断卫星主体与太阳帆板的相对位置关系,进而可以为判断卫星的状态提供依据。

2 空间目标 ISAR 成像模拟

2.1 ISAR 成像

ISAR 2-D 目标成像由距离向和方位向上获取的数据构成。地基雷达系统获取在轨空间目标 ISAR 成像数据,成像几何如图 1 所示。ISAR 成像距离向分辨率依靠发射宽带信号,对回波进行脉冲压缩来实现;方位向分辨率则来自于方位维的 Doppler 分辨。通过对空间目标的连续观测,可获得目标在较大角度范围的后向散射数据,再划分为重叠的若干个子孔径,每一子孔径即可获得一幅 2-D ISAR 图像,从而构成 3-D 重构所需的 ISAR 图像序列。

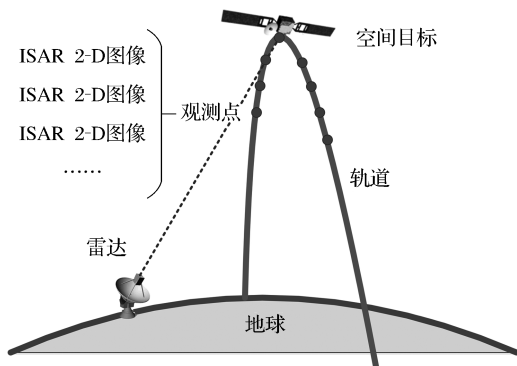


图 1 地基雷达对空间在轨目标 ISAR 成像

Fig.1 2-D ISAR imaging of space target by ground radar

远场条件(雷达到目标的距离远大于目标的尺寸)下,2-D ISAR 成像分辨率的定义为:

距离向分辨率: $\Delta x = c/2B$, 方位向分辨率: $\Delta y = \lambda/2\Omega$ 。

其中: c 为光速, B 为发射雷达信号的带宽, λ 为发

射雷达信号的波长, Ω 为目标相对雷达旋转的角度(方位向)。

本文发射雷达信号采用线性调频连续波(FM-CW, Frequency Modulated Continuous Wave), ISAR 成像采用后向投影(BP, Back Projection)算法。

2.2 电大尺寸目标电磁散射计算

采用本实验室自主研发的电磁散射计算软件包 BART^[11], 计算电大尺寸目标的电磁散射。复杂目标模型表面首先被剖分为若干个三角面元, 三角面元尺寸的选取以能比较准确地表述模型结构为准(面元数目尽量少)。从发射源(T_x)发出一射线并沿入射方向进行追踪(前向追踪), 当射线入射到一个三角面元时产生几何光学(GO, Geometric Optics)反射; 同时, 有另一射线由接收点(R_x)处发出, 并沿逆出射方向进行追踪(后向追踪)。假定前向射线和后向射线分别经过了 n 次前向追踪(n 次面元反射)和 m 次后向追踪之后, 这两束相反方向的射线于同一个三角面元上交汇。我们可以将此过程描述为 $m+n$ 次 GO 反射和 1 次物理光学(PO, Physical Optics)散射, 从而构成 $m+n+1$ 次散射。则此三角面元的散射可由其 PO 散射远场近似计算得到, 另外还需计入其 n 次 GO 反射对入射场的影响和 m 次 GO 反射对散射场的影响。这样, 散射场可写为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s = & \exp(-jkr_0) \int \exp[-j(\mathbf{k}^i - \mathbf{k}^s) \cdot \mathbf{r}(x)] dx \cdot \\ & \prod_{b=1}^m \bar{\mathbf{R}}_b \cdot \bar{\mathbf{S}}_{PO}^0(x) \cdot \prod_{f=1}^n \bar{\mathbf{R}}_f \cdot \mathbf{E}^i = \\ & \exp(-jkr_0) \prod_{b=1}^m \bar{\mathbf{R}}_b \cdot \bar{\mathbf{S}}_{PO} \cdot \prod_{f=1}^n \bar{\mathbf{R}}_f \cdot \mathbf{E}^i \quad (1) \end{aligned}$$

其中: $\bar{\mathbf{R}}$ 为 GO 反射率矩阵, 下标 f, b 分别指前向、后向, dx 为微分散射元, $\mathbf{r}(x)$ 为散射元相对于参考点 \mathbf{r}_0 的位置, \mathbf{k}_i 和 \mathbf{k}_s 分别为入射与散射波矢量, r_0 为参考点 \mathbf{r}_0 的散射路径上的波程, $\bar{\mathbf{S}}_{PO}^0(x)$ 为该微分散射元的 PO 散射矩阵, $\bar{\mathbf{S}}_{PO}$ 为所有微分散射单元所组成散射体的 PO 散射矩阵^[11]。

BART 利用多边形射线柱对电大尺寸 3-D 目标进行解析射线追踪。预设有一束射线柱(入射波)照射目标, 当射线柱照射到三角面元或面元边缘时, 会发生反射或绕射, 从而产生高一阶的射线; 对此射线柱重复上述过程并进行持续追踪, 直到设定的追踪阶数 N 或者无任何新射线再产生为止。我们称新产生的高阶射线为子射线, 前一阶射线为父射线。

在追踪过程中,以多边形为单位描述每束射线的形状、位置及方向,并在追踪时利用计算几何学中的多边形相交、相并、相减精确地解析计算得到亮区和暗区。

亮区 I_{fb} 的散射贡献可由式(1) 计算得到,将所有面元和边缘上的散射贡献叠加得到总散射场:

$$\boldsymbol{E}_{\text{total}}^s = \sum_{\text{facets} \& \text{edges}} \sum_{f=1}^F \sum_{b=1}^B \boldsymbol{E}^s(I_{fb}) \quad (2)$$

BART 解析追踪法的优点在于其计算复杂度仅与目标模型剖分后的三角面元数目(即几何构造)

有关,而不会因为目标电尺寸的增大而增加。电大尺寸问题中散射元的尺寸一般都比较大,在顾及计算结果精度的前提下,应尽量对目标使用大三角面元进行剖分(较少的面元数目),大块面元剖分的多边形射线柱解析追踪可以极大地降低问题的计算复杂度。在我们以往的研究^[12-14]中,BART 已被成功地应用于复杂电大尺寸目标的电磁散射计算问题。

2.3 ENVISAT 卫星 ISAR 成像模拟

对 ENVISAT 卫星按实际尺寸进行三维建模,模型如图 2(b)所示。ISAR 模拟成像参数如表 1 所列,

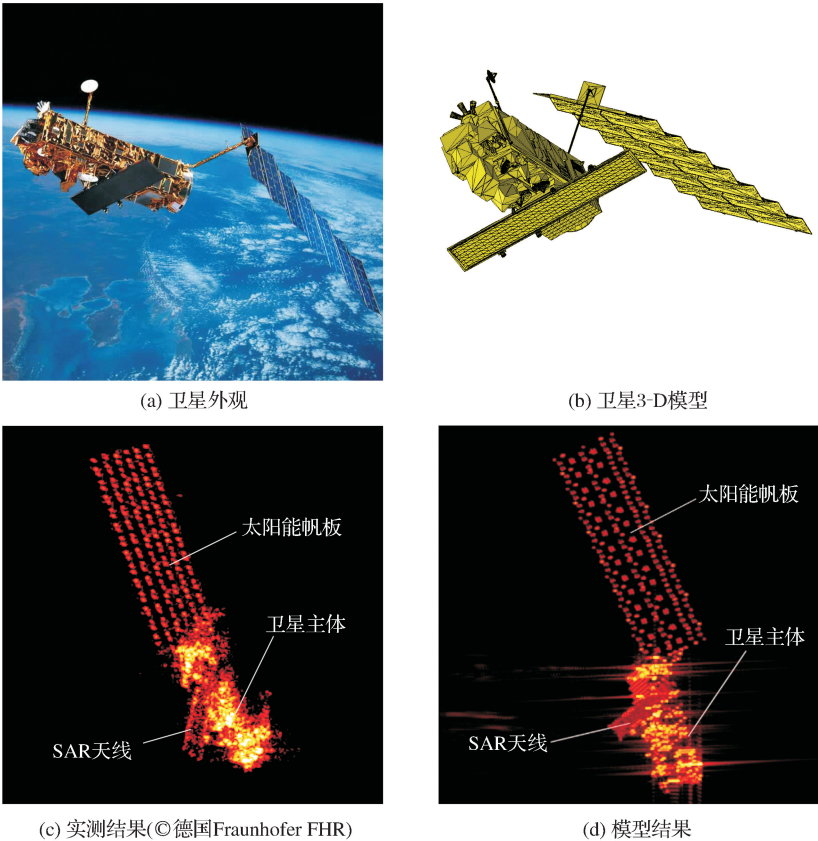


图 2 ENVISAT 卫星 2-D ISAR 成像结果

Fig.2 2-D ISAR imaging results of ENVISAT satellite

表 1 ENVISAT 卫星 2-D ISAR 成像模拟参数

Table 1 The parameters for 2-D ISAR imaging simulation of ENVISAT satellite

参数	取值
面元数目	18 338
中心频率/GHz	16.7
带宽/GHz	2
频点数	501
距离像分辨率/cm	7.5
积累角/°	−3.5 ~ 3.5
扫角数目	501
方位向分辨率/cm	7.4

由 BART 计算获得电磁散射数据,从而实现对 ENVISAT 卫星的 ISAR 成像模拟,2D 成像结果如图 2(d)所示。与 ENVISAT 卫星的实测 ISAR 图像(图 2(c))相比,模拟结果准确地反映了强散射点的分布,表明本文 ISAR 成像模拟方法是有效的。

3 正交因式分解法 3-D 重构

Tomasi 等^[15]提出正交因式分解法,用于解决正交投影情况下从 2-D 序列光学图像中恢复目标的形状及运动等 3-D 信息。这里将其用于从 2-D ISAR 图像序列重建目标的 3-D 信息,其原理如图 3

所示。序列图像中有 F 帧 ISAR 图像,提取的特征点数目为 P ,特征点的 2-D 坐标轨迹为 $\{(u_{fp}, v_{fp}) | f=1, \dots, F, p=1, \dots, P\}$ 。

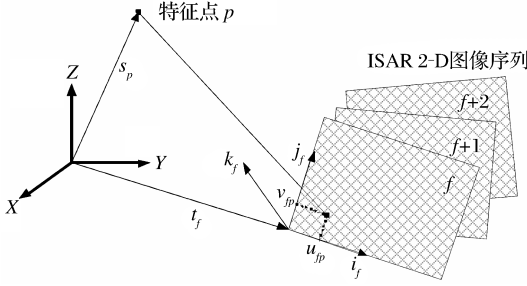


图3 因式分解法几何关系

Fig.3 The geometry of orthographic factorization

将特征点的横坐标 u_{fp} 记为 $F \times P$ 维矩阵 \mathbf{U} ; 同样,纵坐标 v_{fp} 也可记为 $F \times P$ 维矩阵 \mathbf{V} 。测量矩阵定义为:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}_{2F \times P} \quad (3)$$

通过式(4)对 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 进行配准:

$$\tilde{u}_{fp} = u_{fp} - a_f, \quad \tilde{v}_{fp} = v_{fp} - b_f \quad (4)$$

其中: $a_f = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P u_{fp}, b_f = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P v_{fp}$ 。

配准后的测量矩阵为:

$$\tilde{\mathbf{W}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{U}} \\ \tilde{\mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

如图3所示, $\mathbf{k}_f = \mathbf{i}_f \times \mathbf{j}_f$, 特征点 $\mathbf{s}_p = (x_p, y_p, z_p)^T$ 在第 f 帧 2-D ISAR 图像上的坐标可表示为:

$$u_{fp} = \mathbf{i}_f^T (\mathbf{s}_p - \mathbf{t}_f), \quad v_{fp} = \mathbf{j}_f^T (\mathbf{s}_p - \mathbf{t}_f) \quad (6)$$

其中: \mathbf{t}_f 为目标 3-D 空间坐标中心到第 f 帧 2-D ISAR 图像坐标中心的向量,且 $\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{s}_p = \mathbf{0}$ 。则有:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{fp} &= u_{fp} - a_f = \mathbf{i}_f^T (\mathbf{s}_p - \mathbf{t}_f) - \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{i}_f^T (\mathbf{s}_p - \mathbf{t}_f) \\ &= \mathbf{i}_f^T \left(\mathbf{s}_p - \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{s}_p \right) = \mathbf{i}_f^T \mathbf{s}_p \end{aligned} \quad (7)$$

$$\tilde{v}_{fp} = \mathbf{j}_f^T \mathbf{s}_p \quad (8)$$

$\tilde{\mathbf{W}}$ 可写成:

$$\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S} \quad (9)$$

其中: $\mathbf{R} = \text{column}[\mathbf{i}_1^T, \dots, \mathbf{i}_F^T, \mathbf{j}_1^T, \dots, \mathbf{j}_F^T]_{2F \times 3}$, $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1 \ \dots \ \mathbf{s}_P]_{3 \times P}$ 。

矩阵 \mathbf{R} 的行代表成像平面的方向,矩阵 \mathbf{S} 的列为 P 个特征点(这里即为 ISAR 图像中的强散射点)的 3-D 空间坐标。因式分解法的目的就是计算矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{S} 。

首先,对测量矩阵进行奇异值分解:

$$\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{O}_1 \cdot \Sigma \cdot \mathbf{O}_2 \quad (10)$$

将 \mathbf{O}_1 的前 3 列定义为 \mathbf{O}'_1 , Σ 的前 3×3 维子矩阵定义为 Σ' , \mathbf{O}_2 的前 3 列定义为 \mathbf{O}'_2 ; 定义 $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{O}'_1 \cdot (\Sigma')^{1/2}$, $\hat{\mathbf{S}} = (\Sigma')^{1/2} \cdot \mathbf{O}'_2$ 。设定约束条件:

$$\hat{\mathbf{i}}_f^T \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \hat{\mathbf{i}}_f = 1, \hat{\mathbf{j}}_f^T \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \hat{\mathbf{j}}_f = 1, \hat{\mathbf{i}}_f^T \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T \hat{\mathbf{j}}_f = 0 \quad (11)$$

这里, \mathbf{Q} 是一个 3×3 维的矩阵, $\hat{\mathbf{i}}_f^T$ 和 $\hat{\mathbf{j}}_f^T$ 为 $\hat{\mathbf{R}}$ 的元素。

为计算 \mathbf{Q} , 定义 $\mathbf{L} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^T$, 通过求解线性方程组得到 \mathbf{L} , 再通过 Cholesky 分解获得 \mathbf{Q} 矩阵。

最终,计算得到旋转矩阵 \mathbf{R} 和 3-D 坐标矩阵 \mathbf{S} :

$$\mathbf{R} = \hat{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{Q}, \quad \mathbf{S} = \mathbf{Q}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{S}} \quad (12)$$

\mathbf{S} 即为所要重构的特征点(强散射点)的 3-D 坐标矩阵。

4 实验与分析

ISAR 图像的处理流程如图4所示。首先,通过仿真获取序列 ISAR 图像;然后,通过 KLT 法^[16]进行特征点提取、匹配和跟踪,获取特征点在序列 ISAR 图像中的 2-D 坐标;最后,采用因式分解法重构上述特征点的 3-D 坐标。这里首先利用简单的六棱台模型验证重构算法的精度,然后将重构算法应用于 ENVISAT 卫星模型,实现复杂 ISAR 目标的 3-D 重构,从而获取其 3-D 形状信息。

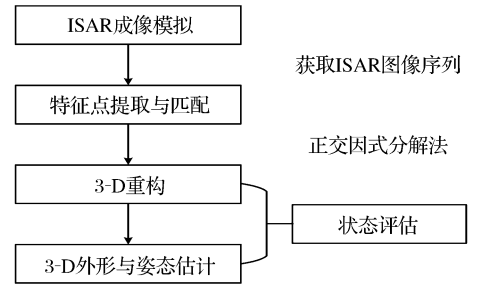


图4 本文方法的处理流程

Fig.4 The flowchart of our method

4.1 简单棱台模型

为验证重构算法的精度,以一简单六棱台为例。先通过计算模拟,获得 3 幅六棱台的 2-D ISAR 图像,组成图像序列,每幅图像之间的成像子孔径间隔为 3° 。六棱台模型及 ISAR 成像几何如图5(b)所示,ISAR 2-D 序列图像如图5(a)所示,强散射点特征提取结果如图5(c)所示,3-D 重构结果如图5(d)所示。表2给出了重构获取的六棱台顶点坐标与真值相比较的误差,可以看出,重构的顶点坐标有较好的精度,说明本文算法是有效的。

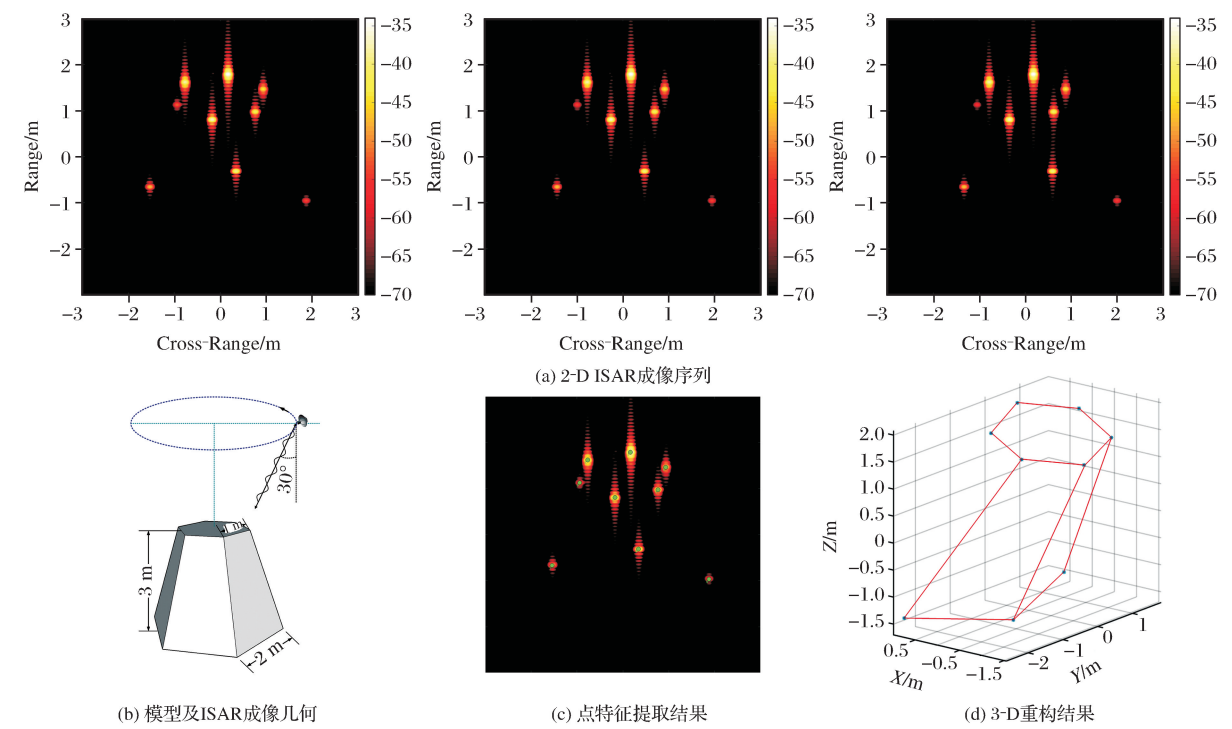


图 5 六棱台模型 ISAR 2-D 序列图像及 3-D 重构结果

Fig.5 A hexagonal frustum model:2-D ISAR image sequence and 3-D reconstruction

表 2 六棱台模型 3-D 重构结果精度

Table 2 Reconstruction accuracy for a simple hexagonal frustum model

边(点一点)	重构长度/m	真值/m	误差/m
1-2	1.28	1	0.28
2-3	0.98	1	0.02
3-4	1.18	1	0.18
4-5	1.29	1	0.29
5-6	0.94	1	0.06
6-1	1.19	1	0.19
7-8	2.24	2	0.24
7-9	2.32	2	0.32
1-7	3.41	3.16	0.25

4.2 ENVISAT 卫星模型

利用本文 2.3 节获得的 ENVISAT 卫星的 2-D ISAR 图像组成序列,每幅 ISAR 图像之间有 3°的旋转角,结果如图 6(a)所示,其中绿色的点表示通过特征提取及匹配所获得的强散射点 2-D 位置。3-D 重构的结果如图 6(b)所示,与模型的比对结果如图 6(c)所示,从结果来看,这些强散射点的 3-D 信息能够较为准确地表达目标的形状与结果,尤其是 SAR 天线和太阳能帆板之间的相对位置关系得到了较好的表达(这对判断卫星状态尤为重要)。

从2-D ISAR成像模拟、特征提取及匹配、特征

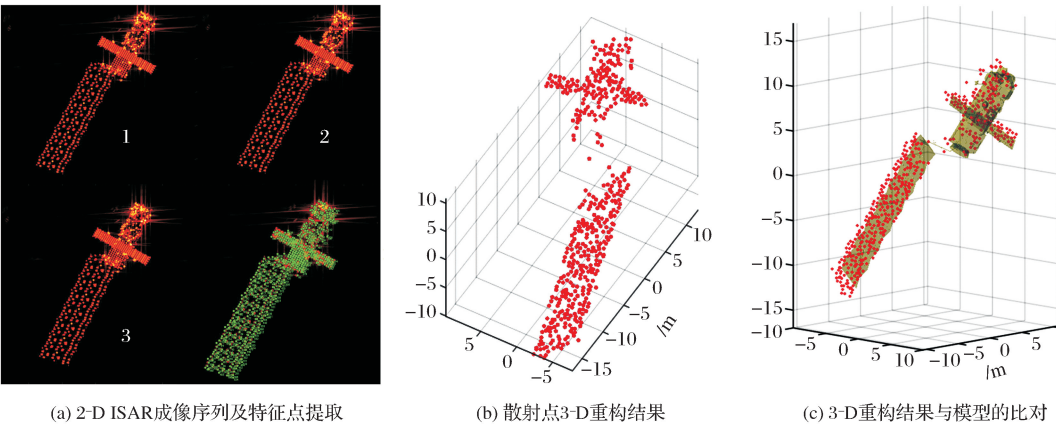


图 6 ENVISAT 卫星 ISAR 2-D 序列图像、特征点及 3-D 重构结果

Fig.6 ENVISAT:2-D ISAR image sequence,feature points and 3-D reconstruction result

点 3-D 重构的过程来看,特征点提取的数目和精度对于结果至关重要。如引言部分所述,之前的研究中,由于 ISAR 成像的分辨率不够高,且成像质量较低(较高的旁瓣、伪影等),往往能被提取出来利用的特征点(主要是强散射点)少之又少,所以尽管这些特征点的 3-D 信息能够被准确地获得,但仅仅凭借几个特征点的 3-D 信息很难重构出目标的外形、姿态等。随着 ISAR 成像分辨率和质量的不断提升,2-D ISAR 图像越来越能够反映出目标的细部特征(如本文第二部分列出的 ISAR 成像实例),一些原本适用于光学图像的 3-D 重构方法也能应用于 ISAR 图像。本文正是通过模拟获取复杂卫星目标的高分辨率 2-D ISAR 图像序列,重构出足够多的特征点(强散射点)的 3-D 信息,从而获取目标主要部件的形状、相对姿态等信息。

5 结 语

本文用 BART 算法计算电大尺寸空间目标的电磁散射,进行多角度空间目标的 ISAR 成像模拟。以 ENVISAT 卫星为例,给出了 2-D ISAR 成像模拟结果,通过与德国 Fraunhofer FHR 实测 ISAR 数据的比对,验证了 ISAR 成像模拟方法。选取一个简单的六棱台作为验证模型,由序列 ISAR 图像获取六棱台各顶点的 3-D 坐标,与真实坐标相比较,验证了 3-D 重构算法的有效性。最后,利用 ENVISAT 卫星的序列 ISAR 图像,重构出强散射点的 3-D 坐标及卫星的形状,获取卫星主体与太阳帆板的相对位置关系,进而可以为判断卫星的状态提供依据。

参考文献 (References):

- [1] Cooke T. Ship 3D Model Estimation from An ISAR Image Sequence[C]//Proceedings of the International Radar Conference, 2003:36-41.
- [2] Stuff M A, Sanchez P, Biancalana M. Extraction of Three-dimensional Motion and Geometric Invariants from Range Dependent Signals[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2003, 14(1):161-181.
- [3] Rosebrock J. 3-D Point Scatterer Estimation for 3-D ISAR Imaging and Attitude Determination[C]//The 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006.
- [4] Tang Libo, Li Daojing, Wu Yirong. Moving Ship Target 3D Reconstruction with the Single Antenna[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(4):468-472. [汤立波, 李道京, 吴一戎. 单天线 SAR 运动舰船目标三维形状重构[J]. 遥感学报, 2007, 11(4):468-472.]
- [5] Wang Xin, Guo Baofeng, Shang Chaoxuan. 3D Reconstruction of Target Geometry based on 2D Data of Inverse Synthetic Aperture Radar Images[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013, 35(10):2475-2480. [王昕, 郭宝峰, 尚朝轩. 基于二维 ISAR 图像序列的雷达目标三维重建方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10):2475-2480.]
- [6] Wang Jun, Wen Yaya, Yu Juan, *et al.* Three Dimensional Reconstruction Method for Moving Target from ISAR Sequences[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4):809-816. [王俊, 文亚亚, 禹娟, 等. 一种基于运动目标 ISAR 图像序列的三维重构方法[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4):809-816.]
- [7] Rosebrock J. Absolute Attitude from Monostatic Radar Measurements of Rotating Objects[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10):3737-3744.
- [8] Ferrara M, Arnold G, Stuff M. Shape and Motion Reconstruction from 3D-to-1D Orthographically Projected Data via Object-image Relations[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(10):1906-1912.
- [9] Lemmens S, Krag H, Rosebrock J, *et al.* Radar Mapping for Attitude Analysis of Objects in Orbit[C]//The 6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, 2013.
- [10] Lemmens S, Krag H. Sensitivity of Automated Attitude Determination Form ISAR Radar Mappings [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference, 2013:768-779.
- [11] Xu F, Jin Y Q. Bidirectional Analytic Ray Tracing for Fast Computation of Composite Scattering from Electric-large Target over a Randomly Rough Surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5):1495-1505.
- [12] Dai J W, Jin Y Q. Scattering Simulation and Reconstruction of A 3-D Complex Target Using Downward-looking Step-frequency Radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10):4035-4047.
- [13] Li W, Jin Y Q. Scattering Simulation and Reconstruction of A 3D Complex Target above an Underlying Surface Using SI-MO Radar with Plane Array[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(10):2740-2749.
- [14] Wang F, Eibert T F, Jin Y Q. Simulation of ISAR Imaging for a Space Target and Reconstruction Under Sparse Sampling via Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(6):3432-3441.
- [15] Tomasi C, Kanade T. Shape and Motion from Image Streams Under Orthography: A Factorization Method[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2):137-154.
- [16] Shi J, Tomasi C. Good Features to Track[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994:593-600.

3-D Information Reconstruction of a Space Target from 2-D ISAR Image Sequence

Wang Feng,Xu Feng,Jin Yaqiu

*(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE),
Fudan University,Shanghai 200433,China)*

Abstract: To monitor a space object in ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) technology,how to extract 3-D information from 2-D imaging is an interesting challenge in ATR (Automatic Target Recognition).A numerical approach,so-called the Bidirectional Analytic Ray Tracing (BART) method,is first employed to numerically calculate the scattering of a complex object in space,e.g.an Envisat model under different angular positions.And then,the sequence of 2-D ISAR imaging with angular positions is produced.Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) feature tracker is adopted for feature extraction and matching among consecutive ISAR images,3-D positions of featured points are estimated by the orthographic factorization method (OFM).The ISAR image sequence of a simple hexagonal frustum model is simulated firstly.Then,3-D position of corner points are estimated and the result shows good accuracy.Simulated ISAR image sequence of Envisat satellite is taken as an example.The results show that 3-D shape information can be properly acquired from 2-D ISAR image sequence.

Key words: ISAR imaging;3-D information;Space target;BART;OFM