

标准姿态空间目标 RCS 角度归一化的处理方法

张延鑫 李宗利 刘世奎 梁志刚

(中国酒泉卫星发射中心·甘肃酒泉·732750)

摘要 简要介绍了 RCS 角度归一化的概念和传统方法，提出了一种具有标准姿态空间目标 RCS 角度归一化的处理方法。使用该方法对欧洲资源 2 号卫星的数据进行了处理，得出了比较有效的结果。

关键词 空间目标；标准姿态；RCS；角度归一化

1 引言

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 缩记为 RCS) 是反映目标形体及电磁特性的最基本参量，也是在目前条件下使用最为广泛的特征量。随着空间技术的发展，作为空间目标重要特征的 RCS 成为提取空间目标特征的重要信息资源。

目前窄带雷达通常只能提供空间目标的轨(弹)道和 RCS 随时间变化的序列值，一般不能直接提供诸如目标的物理尺寸、形状、姿态等其它信息。利用窄带雷达进行空间(或再入飞行器)目标识别的一种常规方法是通过寻找和比较目标 RCS 随时间的变化规律来实现的。就国外 RCS 的应用研究来讲，他们在目标的三维立体模型的建立、制造低散射特性的介质和对目标 RCS 的仿真计算等方面取得了卓有成效的成果，并且开发了 3DSMAX、RadBase、Xpatch、STK 等软件，这些成果和软件已在目标特性研究方面起到了重要的作用。与此同时，为测量空间目标的 RCS 并从中提取可供利用的信息，学术界展开了空间目标探测与识别方面的研究，并取得了很大的进展。目标特性研究工作已从理论仿真和地面试验为主，向以理论仿真、地面试验和动态特性测量试验相结合的方法综合研究各种目标特征转变。

我们知道使用雷达进行目标散射特性测量，一般经数据处理可获得目标 RCS 的时间序列值，对于球体这样的规则形体我们测出的 RCS 在各个方向上是稳定的，但是对于不规则的空间目标来讲，测量出的 RCS 在不同的方向上是剧烈变化的。在这种情况下如何来解释测得的 RCS 数据，就需要把测得的 RCS 时间历程转换到空间目标体坐标系中。若已知某时刻空间目标的位置数据、姿态数据和测站位置数据，求出该时刻 RCS 数据在目标坐标系中的方向，以便把测量的目标 RCS 数据和理论 RCS 数据进行比对，我们把该工作叫做 RCS 角度归一化。本文利用获得的大量测量数据对 RCS 角度归一化处理方法进行了探讨，试图通过 RCS 角度归一化处理为理论研究和实际测量相互验证提供新的途径。

2 RCS 角度归一化的传统方法

要完成 RCS 角度归一化，需要知道空间目标的姿态、测量雷达站和空间目标的相互位置。因此 RCS 角度归一化过程需要的输入数据包括：①雷达测站在地心系中的位置坐标；②空间目标在地心坐标系中的位置坐标；③空间目标相对于 J2000 ECI 惯性坐标系的旋转角度（姿态角）。

一般情况下，角度归一化分为以下几个步骤：①数据段的检择、加密和微分；②计算测量站在惯性系中的坐标；③利用姿态角旋转坐标系得到测量站在弹体坐标系中的坐标；④计算出目标的反射角序列；⑤对全向 RCS 数据插值计算得出理论上的 RCS 序列；⑥最后做理论 RCS 和实测 RCS 数据的比对分析。

2.1 测量数据的预处理

对空间目标进行跟踪测量时由于受到多方面条件的制约，测得的数据并非全程有效，所以 RCS 角度归一化过程中要选择轨道数据和目标特性数据都存在的时间段进行处理，而且该测量时间段要求尽可能长，而数据的波动不能太大。为了保证计算所需数据的有效性，计算时须对测量数据做必要的检择。第一次检择主要是统计轨道数据和 RCS 测量数据的连续性，把相连续的数据段分成离散的两类集合，然后求这两类集合的交集。第二次检择主要是先对轨道测量数据求二阶导数，然后从中选择出数据变化较为平稳且时间最长的数据段，并标记出数据的开始时间和结束时间。

另外，由于目标特性测量支路录取的数据率为 292Hz，轨道测量数据率为 20Hz，两个记录时间不一一对应。所以数据处理时需要对轨道数据进行插值加密，建立轨道数据和目标特性测量数据间的一一对应关系。最后对加密后的轨道数据微分，求出各点对应的速度分量。

2.2 计算测量站在惯性系中的坐标(参考坐标)

首先求出给定时刻由地心系向 J2000 ECI 惯性系的转换矩阵。由卫星轨道理论可知，地心直角坐标系（地固坐标系）和惯性系的差别在于地球的自转、岁差、章动和极移，这种坐标系的转换过程是非常复杂的，如图 1 所示。

对于历元地心惯性系到瞬时平赤道地心系的转换要经过三次旋转，若记旋转矩阵是 PR，则

$$(PR) = R_z(-z_A)R_y(\theta_A)R_x(-\zeta_A) \quad (1)$$

其中 $\begin{cases} \zeta_A = 2306''.2181T - 0''.30188T^2 - 0''.017998T^3 \\ z_A = 2306''.2181T - 1''.09468T^2 - 0''.018203T^3 ; \quad T = \frac{JD(t) - 2451545.0}{36525.0} \\ \theta_A = 2004''.3109T - 0''.42665T^2 - 0''.041833T^3 \end{cases}$

$JD(t)$ 为儒略日。

上述地心系转换到惯性系要经过四次矩阵变换，各个环节的旋转矩阵可以参阅资料

[3]、[4]。但是岁差的影响是主要的，作为粗略的处理，若仅考虑岁差和地球自转的影响，可大大简化软件的编写过程和计算机的运算量。

然后，把已知测站的地心坐标乘以求出的旋转矩阵，得到测量站的参考坐标(B_{xyz})。

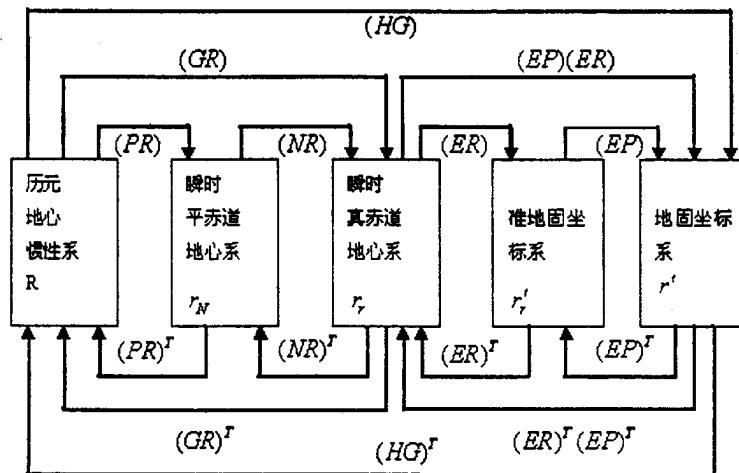


图 1 坐标系转换关系图

2.3 计算测量站在弹体坐标系中的坐标

若已知空间目标的姿态角分量(偏航角 η 、俯仰角 ζ 和滚动角 θ)，测站在星体(或弹体)坐标系中的位置矢量可由下式计算：

$$B_{\eta\zeta\theta} = D_z D_y D_x B_{xyz} \quad (2)$$

式中

$$D_z = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta & 0 \\ -\sin \eta & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad D_y = \begin{bmatrix} \cos \zeta & 0 & -\sin \zeta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \zeta & 0 & \cos \zeta \end{bmatrix} ;$$

$$D_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

按此方法计算，其结果和 STK 仿真的结果一致，如图 2、图 3 所示。图中实线为 STK 仿真得出的弹体反射角，点线为角度归一化后的软件得出的弹体反射角。坐标轴的横轴是时间，纵轴是角度。

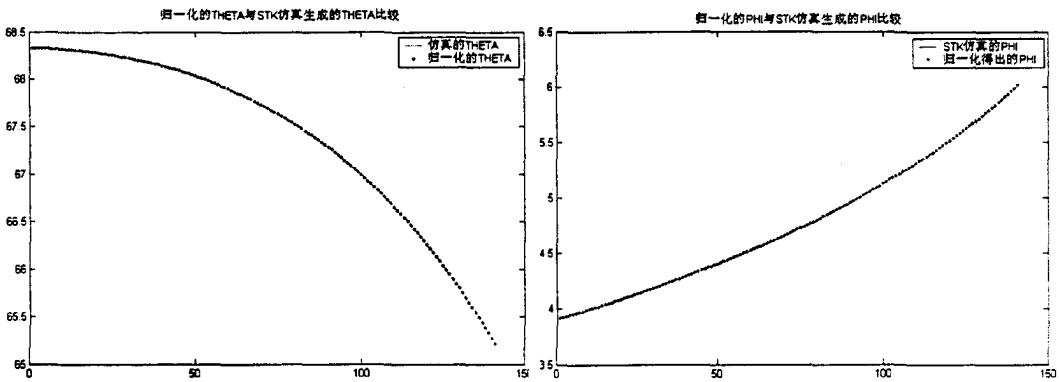


图2 角度归一化后的 THETA 角
与仿真生成的 THETA 角

图3 角度归一化后的 PHI 角
与仿真生成的 PHI 角

3 标准姿态空间目标 RCS 角度归一化方法

卫星最常用的姿態有两种，就是受 ECF 速度约束的指向天底的姿態和受 ECI 速度约束的指向天底的姿態，具体定义为：

“Nadir alignment with ECF velocity constraint”是 Z 轴指向天底方向，X 轴受限于 ECF 速率矢量方向，“Nadir alignment with ECI velocity constraint”是 Z 轴指向天底方向，X 轴受限于 ECF 速率矢量方向。本文对这两种姿態进行了单独的角度归一化研究。

对于第一种标准姿態，根据其定义，建立它的坐标轴如下：

Z 轴——目标质心指向地心；X 轴——位于轨道面内，与 Z 轴垂直，指向目标前进的方向；Y 轴——根据右手螺旋法则建立。垂直于轨道面。

图4 所示为某空间目标的质心轨道坐标系。

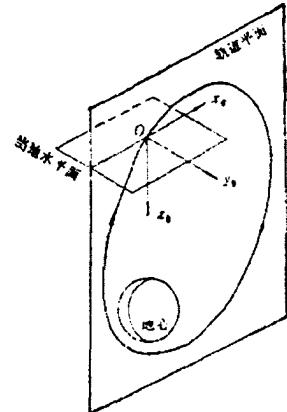


图4 质心轨道坐标系

3.1 数据段的检择、加密和微分

方法同上。

3.2 质心轨道坐标系的建立

输入的数据是飞行目标的地心系坐标分量(x_0, y_0, z_0)和速度分量($\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$)。根据输入数据建立质心轨道坐标系，它的原点记为 $O(x_0, y_0, z_0)$ ；Z 轴方向为 $e_z = \frac{A}{|A|}$ ，

$A = (-x_0, -y_0, -z_0)$ ；Y 轴方向为 $e_y = \frac{B}{|B|}$ ， $B = (\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0) \times (x_0, y_0, z_0)$ ；X 轴方向为

$$e_x = e_y \times e_z$$

3.3 求测量线在质心轨道坐标系中的坐标分量

已知测站在地心系的坐标(x_d, y_d, z_d)，将测量线矢量记为，这里 $\Delta = (x_d - x_0, y_d - y_0, z_d - z_0)$ ，则

$$x = e_x \cdot \Delta^T, y = e_y \cdot \Delta^T, z = e_z \cdot \Delta^T \quad (3)$$

得到的(x, y, z)就是测量线在质心轨道坐标系中的坐标分量。

3.4 用球坐标系描述该测量线

也就是把测量线描述成球坐标的形式，这里仅仅求出代表矢量方向的 θ 角和 φ 角。

$$\theta = \arctg \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \right) \quad \varphi = \arctg \left(\frac{x}{y} \right) \quad (4)$$

图 5 是某卫星 RCS 角度归一化的结果，黑色的点为归一化后的数据，线构成的网格是对应同一颗卫星使用 RadBase 计算出的 RCS 数据，可以看出曲线符合得较好。

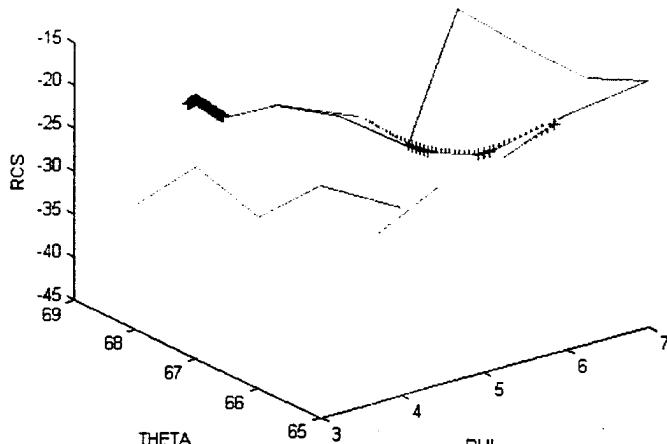


图 5 标准姿态归一化后的数据与理论数据比较结果

对于第二种标准姿态，需要在 ECF 速度方向叠加一个地球自旋速度，其它的处理同上。

4 角度归一化结果

为了验证 RCS 仿真软件和 RCS 归一化的正确性，我们对某雷达跟踪的欧洲资源 2 号卫星的一个圈次的数据进行了处理，结果见图 6 和图 7。两组结果虽然是同一圈次的不同时刻 RCS 测量数据，但是它们相同 THETA 角对应的 RCS 测量数据非常相近。这是因为欧洲资源 2 号卫星具有金属平板的类似性，相同夹角的 RCS 值非常相似，这说明我们所作的角度归一化处理是有效的。

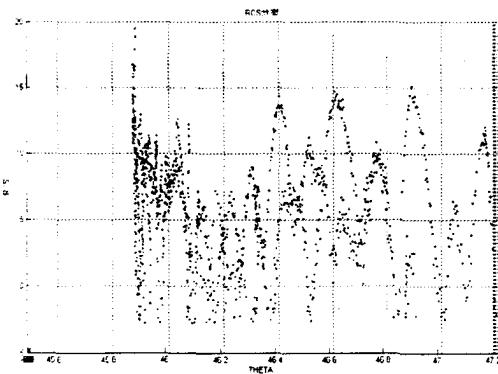


图 6 欧洲资源 2 号卫星 RCS 分布($\text{PHI}: -90^\circ \sim -60^\circ$)

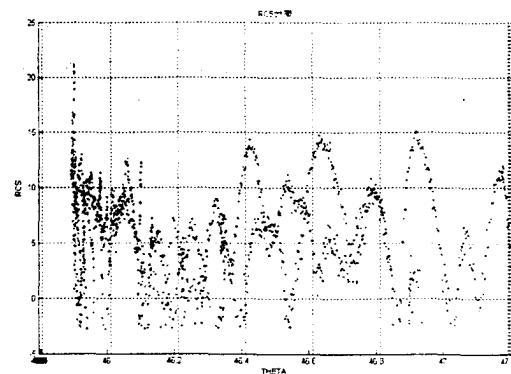


图 7 欧洲资源 2 号卫星 RCS 分布($\text{PHI}: -120^\circ \sim -90^\circ$)

注: THETA 和 PHI 是球坐标系中的两维元素。

5 结 论

本文提出的针对标准姿态空间目标 RCS 角度归一化的处理新方法要比传统的处理方法简单, 处理速度快, 节省系统开销, 而且处理的效果和传统的方法一致。但是该新方法只是针对具有标准对地定向姿态的卫星有效, 对于其它姿态的卫星则必须使用传统的方法进行处理。另外本文中的处理方法没有涉及卫星上太阳能帆板的影响。

参 考 文 献

- 1 航天测控坐标系. GJB2250-94.
- 2 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术. 北京: 国防工业出版社, 1998,6.
- 3 刘林. 人造地球卫星运动理论. 北京: 科学出版社, 1974.
- 4 陈芳允, 贾乃华. 卫星测控手册. 北京: 科学出版社, 1993.
- 5 赵汉元. 飞行器再入动力学与制导. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.
- 6 王行仁. 飞行实时仿真系统及技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998,9.

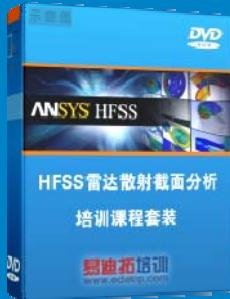
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>