

基于RCS数据的矩形体卫星尺寸估计研究

张显, 杨波威

(浙江大学航空航天学院, 浙江杭州 310007)

摘要: 传统的基于RCS数据的卫星尺寸估计方法主要采用椭球体模型进行等效, 这种估计方法对矩形体卫星尺寸估计不够准确。本文主要研究矩形体卫星的尺寸估计技术, 基于构成矩形体卫星的矩形平板的RCS等效公式, 研究矩形平板的长和宽与RCS序列特征的关系; 通过矩形体卫星运动姿态建模, 实现卫星在轨运动姿态角计算。在上述研究基础之上, 提出基于RCS数据的矩形体卫星尺寸估计方法, 能够实现利用RCS数据对矩形体卫星的长和宽进行估计。实验结果表明, 该方法能有效提升矩形体卫星的尺寸估计准确度, 为空间目标特征识别提供新的方法和思路。

关键词: 矩形体卫星; 雷达截面积; 卫星姿态; 尺寸估计

中图分类号: TN951

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2025)05-0563-06

引用格式: 张显, 杨波威. 基于RCS数据的矩形体卫星尺寸估计研究[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(5):563-568.

ZHANG Xian, YANG Bowei. Research on Size Estimation of Rectangular Satellite Based on RCS Data [J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(5):563-568.

Research on Size Estimation of Rectangular Satellite Based on RCS Data

ZHANG Xian, YANG Bowei

(School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The traditional satellite size estimation method based on RCS data mainly uses ellipsoid model for equivalence, which is not accurate enough for estimating the size of rectangular satellites. This article mainly studies the size estimation technology of rectangular satellite. Based on the RCS equivalent formula of the rectangular flat plate that constitutes the rectangular satellite, the relationship between the length and width of the rectangular flat plate and the RCS sequence characteristics is studied; By modeling the motion attitude of a rectangular satellite, the calculation of the satellite's in orbit motion attitude angle has been achieved. Based on the above research, a method for estimating the size of rectangular satellite based on RCS data is proposed, which can estimate the length and width of rectangular satellite by using RCS data. The experimental results show that this method can effectively improve the accuracy of size estimation for rectangular satellites, providing a new method and idea for spatial target feature recognition.

Key words: rectangular satellite; radar cross section; satellite attitude; size estimation

0 引言

随着空间技术的迅速发展, 世界各国对太空资源的开发和利用日益增加, 这导致空间碎片数量急剧增加^[1], 也给在轨航天器安全和人类宇航活动带来持续性威胁和挑战。如何有效对空间目标进行探测跟踪和识别判定, 从而更好地掌握太空目标的位置、速度、尺寸等属性信息, 对维护太空资产安全和保障太空环境安全具有重要意义。

雷达是探测和跟踪空间目标的重要设备, 其获取的空间目标雷达截面积(Radar Cross Section, RCS)数据对空间目标的识别判定具有重要作用, 是空间目标电磁特性的重点研究方向^[2]。通过对RCS数据的分析研究, 可以识别判断空间目标的形状、姿态、尺寸等各种属性信息。其中, 利用RCS数据对空间目标的尺寸进行估计是其中一个重要的研究方向, 它主要获取空间目标的尺寸特性, 从而能够为空间目标身份识别、空间碰撞预警等环

节提供特征信息支持。

在利用 RCS 数据进行空间目标尺寸估计时,传统方法是空间目标等效为一个椭球体^[3],基于椭球体模型的 RCS 数据中,长轴和短轴的比值不随椭球体大小影响这一特性,计算椭球体的长短轴之比,进而计算得到椭球体的长轴和短轴,并将该结果作为空间目标的尺寸估计结果^[4]。该方法计算过程简便,但作用对象过于泛化,针对性不强,导致尺寸估计结果往往不够准确。

当前,人造卫星的主体结构一般为矩形体^[5],这样的形体结构更有利于卫星在火箭体内层叠放置,从而实现一箭多星批量发射^[6],降低发射成本。如美国 SpaceX 公司发射的数千颗“星链”卫星,其主体结构和太阳能帆板均为矩形体^[7];许多航天科创公司和研究机构则大量研制立方体卫星,其结构简单,造价便宜,非常适合作为次级载荷批量发射。

本文围绕矩形体卫星尺寸估计问题开展研究,从矩形平板的 RCS 等效公式出发,研究矩形平板 RCS 序列和其长宽的对应关系,并通过卫星运动姿态进行建模,实现了对卫星过境姿态角的计算,进而实现对矩形体卫星的尺寸估计。相比于传统的椭球体等效方法,本文方法针对性强,对矩形体卫星的尺寸估计准确度具有明显的提升。

1 矩形平板 RCS 特性

1.1 RCS 定义

RCS 全称为 Radar Cross Section,即雷达截面积,它用于表征目标在面雷达照射时的截面积大小,其值可通过目标处的雷达波入射电磁强度和雷达接收到的目标散射波电场强度表示^[8],具体公式如下:

$$RCS = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

式中, E_i 表示目标处的雷达波入射电场强度, E_s 表示雷达接收到的目标散射波电场强度, r 表示目标距雷达的距离。

此外,也可以通过雷达接收功率表达式来计算目标的雷达截面积。雷达接收功率表达式为

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R^2}\right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R^2}\right) (A_r) \quad (2)$$

式中, P_t 为雷达的发射功率, P_r 为雷达接收的回波功率, G_t 为发射天线增益, A_r 为接收天线有效面积, R 为雷达至目标的斜距, σ 为雷达散射截面积。

由于目标的径向运动以及目标的姿态旋转,目标朝向雷达的面不断变化,导致目标散射波电场强度不断变化,雷达测得的目标 RCS 为一条随时间变化的序列。此外,目标的外形结构、表面材料电磁特性、雷达波频率等也会影响测得的目标 RCS 大小。因而可以说,目标 RCS 序列蕴含着目标的尺寸、形状、旋转速度等信息,可以研究目标 RCS 序列,从中提取空间目标的相关物理特征。

1.2 矩形平板 RCS 等效公式

如图 1 所示,在 xy 平面内有一个理想导电的矩形平板,其两个边的长度分别用 a 和 b 表示。对于 xz 平面内线性极化的入射波(波长为 λ),其散射 RCS 可由公式(3)确定^[9]:

$$\sigma = \frac{b^2}{\pi} \left| \sigma_{1V} - \sigma_{2V} \left[\frac{1}{\cos \theta} + \frac{\sigma_{2V}}{4} (\sigma_{3V} + \sigma_{4V}) \right] \sigma_{5V}^{-1} \right|^2 \quad (3)$$

式中:

$$\sigma_{1V} = \cos(ka \sin \theta) - j \frac{\sin(ka \sin \theta)}{\sin \theta} \quad (4)$$

$$\sigma_{2V} = \frac{e^{j(ka - \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2\pi} (ka)^{3/2}} \quad (5)$$

$$\sigma_{3V} = \frac{(1 + \sin \theta) e^{-jka \sin \theta}}{(1 - \sin \theta)^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{4V} = \frac{(1 - \sin \theta) e^{jka \sin \theta}}{(1 + \sin \theta)^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{5V} = 1 - \frac{e^{j(2ka - \frac{\pi}{2})}}{8\pi(ka)^3} \quad (8)$$

式中,

$$k = 2\pi/\lambda \quad (9)$$

上述矩形平板的 RCS 计算公式(在文中标记为“等效公式(1)”)在视角 $0^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ 时成立且非常精确。

当入射角向 y 轴方向偏离角度 φ 时,一个理想导电的矩形平板的后向散射 RCS 可以近似表达为

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left(\frac{\sin(ak \sin \theta \cos \varphi)}{ak \sin \theta \cos \varphi} \cdot \frac{\sin(bk \sin \theta \sin \varphi)}{bk \sin \theta \sin \varphi} \right)^2 (\cos \theta)^2 \quad (10)$$

该计算公式(在文中标记为“等效公式(2)”)仅在视角 $\theta \leq 20^\circ$ 时成立。

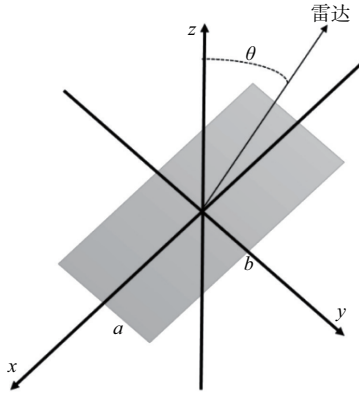


图1 矩形平板模型示意图

1.3 等效公式仿真验证

在一个示例中,取矩形平板两个边长分别为2 m、1 m(即 $a=2$ m、 $b=1$ m),雷达波频率为1 GHz,使用Feko电磁仿真软件仿真该目标RCS,同时利用上述两种等效公式计算目标在俯仰角 θ 变化范围为 $0^\circ \sim 80^\circ$ 、方位角 φ 为 0° 时的RCS,相关结果如图2所示。

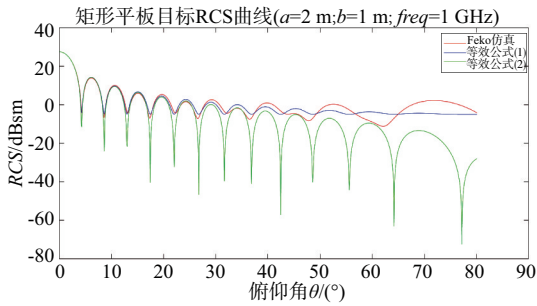


图2 使用Feko仿真和公式计算得到的矩形平板RCS曲线

由图2可见,当俯仰角小于 50° 时,仿真结果(红色曲线)和“等效公式(1)”计算得到的RCS曲线(蓝色曲线)基本一致;当俯仰角大于 50° 后,两条曲线的差值有所增大。利用“等效公式(2)”计算得到的RCS曲线(绿色曲线)在俯仰角小于 30° 以内区间同上述两条曲线基本一致,仅在曲线的极小值点区域出现更小的极小值。

因而可以说,“等效公式(1)”相比于“等效公式(2)”的计算结果更精确,但两种等效公式的极小值点对应的俯仰角位置同仿真结果基本一致。

1.4 矩形平板尺寸估计方法

由于“等效公式(2)”包含两个角度变化,更加符合真实情况,因而可利用公式(10)计算极小值点出现的位置,可将公式(10)改写为

$$\sigma = \left[\frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} (\cos \theta)^2 \right] \left(\frac{\sin(bk \sin \theta \sin \varphi)}{bk \sin \theta \sin \varphi} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin(ak \sin \theta \cos \varphi)}{ak \sin \theta \cos \varphi} \right)^2 \quad (11)$$

公式(11)等号右侧,前面的中括号部分内容大于0,可代表震荡的幅度值,和极值点无关;中间的小括号部分内容中,当 $bk \sin \theta \sin \varphi$ 取值为 π 的非0整数倍时,该部分的值为0,对应着公式取值的极小值点;最后的小括号部分内容中,当 $ak \sin \theta \cos \varphi$ 取值为 π 的非0整数倍时,该值为0,对应着公式取值的极小值点。

根据公式(11),矩形平板RCS在俯仰角 θ 取值为 0° 时取得极大值,即

$$\sigma_{\max} = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \quad (12)$$

同时,公式(11)的极小值点满足条件:

$$bk \sin \theta \sin \varphi = n \cdot \pi \quad \text{或} \quad ak \sin \theta \cos \varphi = n \cdot \pi \quad (13)$$

因而,在对矩形平板目标进行尺寸估计时,可以先进行姿态角的计算,得到RCS和姿态角的对应曲线。然后根据公式(12),求解RCS极大值,得到包含 a 、 b 的一个等式;根据公式(13),求解出姿态角中若干个极小值点对应的俯仰角,得到包含 a 、 b 的若干个等式。利用这些等式,可以计算出目标的 a 或 b 。

如,对于第一个极小值点($n=1$),其对应的俯仰角为 θ 、方位角为 φ ,则尺寸 a 或 b 可用如下公式计算得到:

$$a = \frac{\pi}{k \sin \theta \cos \varphi} = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta \cos \varphi} \quad (14)$$

$$b = \frac{\lambda}{a} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{4\pi}}$$

或

$$a = \frac{\lambda}{b} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{4\pi}} \quad (15)$$

$$b = \frac{\pi}{k \sin \theta \sin \varphi} = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta \sin \varphi}$$

由于上述公式具有两种计算结果,无法确定哪一项结果为更加准确的结果。此时可以选择两个极小值点进行计算,将两组计算结果中 a 、 b 估值更一致的结果作为最终计算结果。如可以选择 $n=\pm 1$ 对应的两个极小值点进行计算,或者选择 $n=1$ 、 2 对应的两个极小值点进行计算($n=2$ 时,可按照公式(13)进行计算)。

在一个示例中,利用 Feko 电磁仿真软件仿真得到矩形平板的一条 RCS 曲线($\varphi=0^\circ$),如图 3 所示。

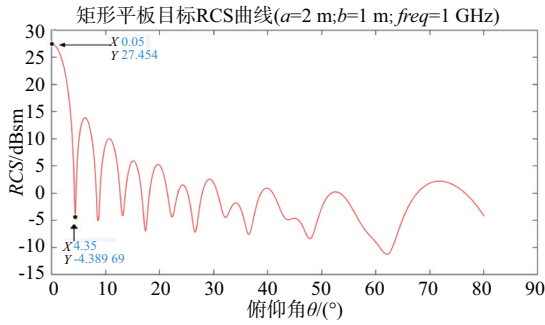


图3 矩形平板目标 RCS 曲线

该 RCS 曲线中,第一个极小值点对应的俯仰角为 4.35° 。由于 $\varphi=0^\circ$,可依据公式(14)计算得到尺寸 a 为 1.98 m ;RCS 曲线中俯仰角为 0° 时对应的 RCS 极大值为 27.454 dBsm ,可转换为 556.42 m^2 ,可依据公式(15)计算得到尺寸 b 为 1.01 m 。该方法计算得到的 a 、 b 的值同仿真目标的实际尺寸($a=2\text{ m}$, $b=1\text{ m}$)非常接近,表明该方法可行性强、准确度高。

2 卫星运动姿态角计算

第 1 节介绍了矩形平板 RCS 等效公式,基于该公式给出了矩形平板的尺寸估计方法。可以看到,在矩形平板的尺寸估计过程中,需要用到目标的姿态角信息,而雷达测量得到的目标 RCS 数据中并不包含这些信息,因而需要构建卫星运动姿态矩阵,从运动数据中解析目标的运动姿态^[10]。正常工作的卫星主要处于三轴稳定状态,因而这里主要计算三轴稳定卫星的运动姿态。

2.1 三轴稳定卫星本体坐标系

工作卫星一般处于三轴稳定状态,其稳定方

向一般同目标的任务需求有关。如遥感卫星需要将其遥感相机稳定对准地面方向,通信卫星天线指向通信服务区域等。这里主要构建卫星稳定轴向对准地面的运动场景。

假设三轴稳定卫星对地轴为 Z 轴,卫星在轨运动方向为 X 轴,以右手法则确定的另一个方向为 Y 轴,构建卫星本体坐标系。卫星在 J2000 坐标系下的位置信息用 (x, y, z) 表示,速度信息用 (dx, dy, dz) 表示。基于目标在轨运动信息,卫星本体坐标系在 J2000 坐标系^[11]下的坐标轴方向可简单表示如下:

$$\begin{cases} X\text{轴: } \mathbf{Axis}_x = \left(\frac{dx}{\Delta_x}, \frac{dy}{\Delta_x}, \frac{dz}{\Delta_x} \right), \Delta_x = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} \\ Z\text{轴: } \mathbf{Axis}_z = \left(-\frac{x}{\Delta_z}, -\frac{y}{\Delta_z}, -\frac{z}{\Delta_z} \right), \Delta_z = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ Y\text{轴: } \mathbf{Axis}_y = \mathbf{Axis}_z \times \mathbf{Axis}_x \end{cases} \quad (16)$$

式中, \mathbf{Axis}_x 表示卫星本体坐标系的 X 轴在 J2000 坐标系下的单位矢量, \mathbf{Axis}_z 表示卫星本体坐标系的 Z 轴在 J2000 坐标系下的单位矢量, \mathbf{Axis}_y 表示卫星本体坐标系的 Y 轴在 J2000 坐标系下的单位矢量。

空间目标运动的轨道一般是椭圆轨道,目标对地心方向同目标运动方向并不是严格意义上的垂直关系,因而上面公式计算得到的 X 轴和 Z 轴并不完全垂直。在 Z 轴方向不变的情况下,可以对构建的坐标系 X 轴和 Y 轴进行一次修正,得到修正后的三轴稳定卫星本体坐标系如下:

$$\begin{cases} Z\text{轴: } \mathbf{Axis}_{z\text{-new}} = \mathbf{Axis}_z \\ X\text{轴: } \mathbf{Axis}_{x\text{-new}} = \mathbf{Axis}_x - (\mathbf{Axis}_x \cdot \mathbf{Axis}_z) \mathbf{Axis}_z \\ Y\text{轴: } \mathbf{Axis}_{y\text{-new}} = \mathbf{Axis}_z \times \mathbf{Axis}_{x\text{-new}} \end{cases} \quad (17)$$

当目标在轨运动位置变化后,可利用上式快速计算出目标当前的本体坐标系指向。

2.2 运动姿态角计算

上文计算构建了三轴稳定卫星在任意时刻的本体坐标系,该坐标系的三轴方向由 J2000 坐标系下的三坐标表示。要计算目标运动时雷达视线方向的姿态角,只需要计算雷达视线方向向量在卫星本体坐标系内对应的姿态角和方位角即可。

假设地面雷达在J2000平赤道地心坐标系下的坐标为 (x_r, y_r, z_r) ,目标当前在J2000坐标系下的坐标为 (x, y, z) ,则卫星反射电磁波至雷达方向的向量可表示为

$$\mathbf{D}_r = (x_r - x, y_r - y, z_r - z) \quad (18)$$

根据俯仰角和方位角的定义,结合目标本体坐标系在J2000下的表示,则卫星至雷达矢量方向对应的目标姿态角表示如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{俯仰角 } \theta = \arctan \left(\frac{\mathbf{D}_r \cdot \mathbf{Axis}_{x-new}}{\mathbf{D}_r \cdot \mathbf{Axis}_{z-new}} \right) \\ \text{方位角 } \varphi = \arctan \left(\frac{\mathbf{D}_r \cdot \mathbf{Axis}_{y-new}}{\mathbf{D}_r \cdot \mathbf{Axis}_{x-new}} \right) \end{array} \right. \quad (19)$$

目标运动过程中,任意时刻目标相对雷达的姿态角均可以通过上述公式计算得到。

3 矩形体卫星尺寸估计方法

3.1 RCS仿真

矩形体由6个矩形平面构成,当该类型的目标以三轴稳定形态通过雷达观测空域时,雷达主要能够观测到该目标的一个平面,因而其RCS特征在一定观测角度范围内同矩形平板较为一致。

利用Feko电磁仿真软件仿真矩形体目标、“矩形平板一”、“矩形平板二”这3个目标随俯仰角变化产生的RCS曲线。矩形体目标形状为矩形体,规模大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$,其 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的平面正对地面;“矩形平板一”形状为长方形,其边长为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,用于模拟矩形体目标的 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 平面;“矩形平板二”形状为长方形,其边长为 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$,用于模拟矩形体目标的 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 平面。两个矩形平板被雷达观测的视角同对应的矩形体目标平面一致。在入射波频率为 1 GHz 的情况下,3个目标的RCS曲线如图4所示。

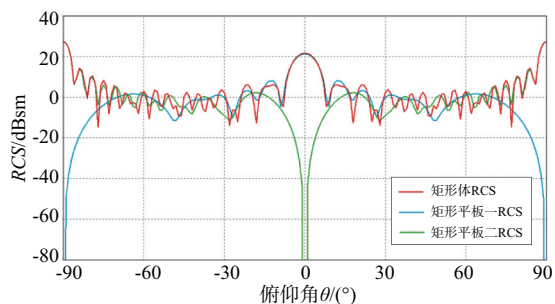


图4 矩形体和2个矩形平板的RCS曲线对比

图4中,红色曲线为矩形体目标的RCS曲线,蓝色为“矩形平板一”的RCS曲线,绿色为“矩形平板二”的RCS曲线。可以看出,当俯仰角在 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 范围内时,矩形体的RCS曲线同“矩形平板一”的RCS曲线较为一致;当俯仰角在 $[-90^\circ, -60^\circ]$ 或 $[60^\circ, 90^\circ]$ 范围内时,矩形体的RCS曲线同“矩形平板二”的RCS曲线较为一致。因而可以总结出,当矩形体某一平面的俯仰角在 30° 范围内时,矩形体的RCS曲线可用与该平面尺寸一致的矩形平板RCS进行代替。

3.2 矩形体卫星尺寸估计

3.1节的仿真结果表明,在俯仰角范围为 30° 以内时,矩形体卫星的雷达照射面的RCS同该平面对应的矩形平板RCS一致,可以使用矩形平板尺寸估计方法来对矩形体卫星的雷达观测面尺寸进行估计。

在矩形体卫星尺寸估计时,首先应当按照第2节内容进行卫星姿态角计算,将RCS时间序列转换为带有姿态角信息的RCS序列。随后,可按照1.4节中矩形平板尺寸估计方法,寻找RCS序列中的极小值点和最大值点,利用这些点对应的姿态角信息对目标的尺寸进行计算。由于两组计算公式对应着两种情况,最后还需要对比两种计算结果,从中确定最为合理的结果,并作为最终的尺寸估计结果。本文主要利用计算结果的“标准差/均值”大小来衡量两种计算结果的一致性,并选取“标准差/均值”较小的一组计算结果作为最终的尺寸估计结果。

3.3 计算案例

3.3.1 单条数据处理

在一个示例中,我们利用某立方体卫星的一条RCS数据对该方法进行验证。该卫星为边长 0.3 m 的立方体卫星,其RCS序列和计算得到的姿态角序列如图5所示。

目标的RCS最大值为 -0.0656 dBsm ,即 0.9850 m^2 。RCS最大值左侧低点的姿态角值为 $(44.24^\circ, -62.45^\circ)$,右侧低点的角度值为 $(-28.77^\circ, 74.68^\circ)$ 。利用矩形平板目标尺寸估计方法,计算得到该目标的两个极小值点的尺寸计算结果,如表1所示。

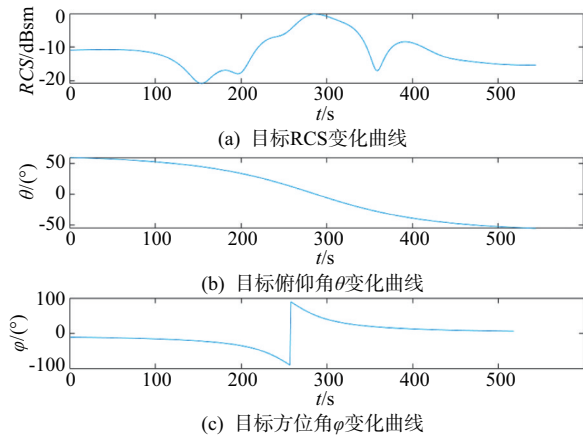


图 5 某立方体卫星的 RCS 和姿态角变化曲线

表 1 RCS 序列的两个极小值点尺寸计算结果

参量	公式(14)		公式(15)	
	a	b	a	b
左侧极值点计算结果	0.464 8 m	0.180 7 m	0.242 5 m	0.346 4 m
右侧极值点计算结果	1.179 6 m	0.071 2 m	0.323 1 m	0.259 9 m
均值	0.822 2 m	0.126 0 m	0.282 8 m	0.303 2 m
标准差/均值	0.434 7	0.434 7	0.142 5	0.142 7

从计算结果可以看出,公式(15)的尺寸计算结果的“标准差/均值”取值更小,表明该公式在两个极值点得到的尺寸计算结果更为接近,因而选取公式(15)的计算结果作为最终值,从而确定目标的尺寸估计结果为0.282 8 m和0.303 2 m。该计算结果同立方体卫星的边长(0.3 m)非常接近,表明本方法对矩形体卫星尺寸估计效果明显。

与此同时,基于该目标 RCS 数据,利用基于椭球体模型的尺寸估计方法对该目标的尺寸进行估计,并同本文矩形体卫星尺寸估计结果进行对比,结果见表 2。

表 2 两种尺寸估计方法结果对比

方法	尺寸 a/m	a 的偏离度	尺寸 b/m	b 的偏离度	综合偏离度
椭球体模型估计法	0.488 1	62.7%	0.171 0	43.0%	52.9%
本文方法	0.282 8	5.7%	0.303 2	1.1%	3.4%

由表 2 的两种方法对应的结果可以看出,利用基于椭球体模型的尺寸估计方法计算得到的目标尺寸同原尺寸偏离较大,而利用本文提出的矩形体卫星尺寸估计方法计算得到的目标尺寸同原尺寸偏离较小,表明本文方法更加适用于矩形体卫星尺寸估计。

3.3.2 多条数据批处理

在另一个示例中,我们利用某立方体卫星的一批 RCS 数据对该方法进行验证。该卫星为边长 1.0 m 的立方体卫星,共有 10 条包含方位角和俯仰角的 RCS 数据。利用本文方法对这些数据进行处理,计算得到的目标尺寸估计结果如表 3 所示。

表 3 某立方体卫星尺寸估计结果

数据序号	尺寸 a 估值/m	尺寸 b 估值/m
1	1.003 5	1.023 3
2	1.012 2	1.013 9
3	1.001 0	1.025 4
4	1.010 4	1.016 2
5	0.998 6	1.027 9
6	1.282 7	0.800 9
7	1.009 0	1.017 3
8	1.072 5	0.957 0
9	1.000 5	1.025 4
10	1.005 5	1.020 0
结果均值	1.035 9	0.992 7

本文方法对该立方体卫星的尺寸估计结果为 1.035 9 m×0.992 7 m,非常接近该立方体卫星的实际尺寸。估计结果的偏离度仅为 2.2%,表明该评估结果非常准确。

4 结束语

本文首先研究了矩形平板的 RCS 等效公式以及 RCS 序列特征,提出了矩形平板目标尺寸估计方法。在矩形平板目标尺寸估计的基础上,结合三轴稳定卫星的在轨姿态计算方法,提出了矩形体卫星的尺寸估计方法,并通过实验案例验证了本方法的有效性。实验对比表明,本文提出的矩形体卫星尺寸估计方法在进行矩形体卫星尺寸估计时,其估值结果优于基于椭球体模型的尺寸估计方法。本文方法针对性强,非常适用于基于 RCS 数据的矩形体卫星的尺寸估计,在空间目标特性识别中具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 胡坤娇,罗健.我国空间监视地基雷达系统分析[J].雷达科学与技术,2008,6(2):87-91.
- [2] 孙佳兴,姚慧婧.基于联合处理的复杂目标 RCS 估计方法[J].雷达科学与技术,2022,20(2):181-186. (下转第 590 页)

- sis of Antenna Arrays in Vehicle-Mounted Phased Array Radar: A Heat Dissipation Perspective [J]. International Journal of Heat and Technology, 2023, 41(4):838-846.
- [4] CHEN Long, HONG Linfeng. Lightweight Design of a High Mobility Vehicle-Based Radar [C]//Third International Conference on Mechanical Design and Simulation, Xi'an, China: SPIE, 2023:1263904.
- [5] 马林, 杨文军, 程望东, 等. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2024.
- [6] 唐宝富, 张轶群, 周金柱. 智能结构与相控阵雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [7] 刘炳辉, 程春红, 袁海平. 雷达结构精度影响因素与测量的分析研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(1):5-10.
- [8] 孙京, 马兴瑞, 于登云. 星载天线双轴定位机构指向精度分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(3):545-550.
- [9] 李岩, 范大鹏. 光电稳定机构指向误差建模与敏感度分析[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1):104-109.
- [10] 张赟霞, 任波. 一种地基相控阵天线指向系统性误差分析[J]. 微波学报, 2018, 34(4):16-21.
- [11] 韩旭, 于大群. 相控阵天线指向测量误差分析及消除方法研究[J]. 微波学报, 2023, 39(2):52-57.
- [12] 何文杰, 张增太, 房景仕, 等. 某测量雷达天线座轴系设计与精度测量[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(3):332-336.

作者简介:

- 祝崇辉** 男, 高级工程师, 主要研究方向为雷达结构总体。
- 赵文** 男, 高级工程师, 主要研究方向为雷达结构总体。
- 贺照鹏** 男, 工程师, 主要研究方向为雷达结构总体。
- 邹敏** 女, 研究员, 主要研究方向为雷达总体。
- 石同武** 男, 研究员, 主要研究方向为雷达结构总体。

(上接第 568 页)

- [3] LAMBOUR R, RAJAN N, MORGAN T, et al. Assessment of Orbital Debris Size Estimation from Radar Cross-Section Measurements [J]. Advances in Space Research, 2004, 34(5):1013-1020.
- [4] 于春锐, 梁佃农, 董臻, 等. 基于窄带雷达 RCS 序列的空间目标尺寸估计[J]. 空间科学学报, 2010, 30(3):250-254.
- [5] 刘芑, 韩飞, 曾惠忠, 等. 一箭多星发射微小卫星构型设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(5):57-64.
- [6] 刘江, 田宗军, 徐欣, 等. 一种适合组批部署的小卫星构型与结构设计[J]. 航天器工程, 2023, 32(5):63-68.
- [7] 季鹏飞, 张煜晨, 华松逸, 等. “星链”卫星低成本建设因素及方法研究[J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(10):36-39.
- [8] 于兴伟, 张学文, 侯鑫宇, 等. 基于窄带 RCS 数据的低速旋转空间目标识别研究[J]. 现代雷达, 2022, 44(7):75-81.
- [9] MAHAFZA B R. Radar Systems Analysis and Design Using Matlab [M]. USA: CRC Press, 2000.
- [10] 高治明, 罗子娟, 李雪松, 等. 卫星辅助的无人机视觉惯性自主定位方法[J]. 导航与控制, 2024, 23(2):41-50.
- [11] 李心草, 倪培双, 裴昊, 等. 基于 ISAR 图像的空间卫星目标姿态估计 [C]//2024 年全国微波毫米波会议, 北京: 中国电子学会, 2024:338-340.

作者简介:

- 张显** 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为信号处理、目标识别。
- 杨波威** 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为卫星通信网络、人工智能技术。

(上接第 576 页)

- Research Program (USGS), 2014.
- [19] LI Jianhui, LIU Hai, MENG Xu, et al. Ancient Ocean Coastal Deposits Imaged on Mars [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2025, 122(9):e2422213122.

作者简介:

段迪文 男, 硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达无损检测和深空探测。

孟旭 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为探地雷达无

损检测、数字信号处理和探月雷达数据反演。

刘海 男, 博士, 教授, 主要研究方向为城市工程物探、无损检测和深空探测。

李鉴辉 男, 博士研究生, 主要研究方向为探地雷达数据处理、深空探测和火星地质解释。

刘超 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大型地下工程施工及维护和地下工程智慧感知及智能施工。

王向宇 男, 博士, 主要研究方向为探地雷达成像和数据反演。