

舰船目标 RCS 动态测量数据角度修正方法*

任群亭 武自卫 荆惠连 赵剑光 白 杨
(电磁散射重点实验室, 北京 100854)

摘要: RCS 动态测量可以获得真实环境中目标的 RCS, 是目标与环境特性研究的重要手段之一。针对舰船目标 RCS 动态测量中因目标姿态和位置不断变化造成 RCS 测试数据与目标测试角度无法直接对应的问题, 提出了角度内均值和数据角度求取两种测试数据角度修正方法。两种方法将组合导航数据通过坐标系转换和角度计算获得测试角度的时间序列, 与 RCS 测试数据时间序列综合处理, 得到测试数据与角度之间的对应关系, 支撑舰船目标 RCS 缩减、特征模拟等研究。通过试验验证了提出方法的有效性和正确性。

关键词: 雷达散射截面(RCS), 动态测量, 角度修正

Angle Correction Method of Ship Target RCS Dynamic Measurement Data

REN Qun-ting, WU Zi-wei, JING Hui-lian, ZHAO Jian-guang, BAI Yang
(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: RCS dynamic measurement can obtain the target RCS in the real environment, which is one of the important means to study the characteristics of the target and the environment. Aiming at the problem that the RCS measurement data cannot directly correspond to the target measurement angle in the dynamic measurement of ship target RCS because of the attitude and position of the target are constantly changing, two methods for correcting the angle of the measurement data are proposed in this paper. The two methods use coordinate system conversion and angle calculation to obtain the time series of the measurement angle, and comprehensively process the time series of the RCS measurement data to obtain the corresponding relationship between the measurement data and the angle, which supports ship target RCS reduction and feature simulation research. The effectiveness and correctness of the proposed methods are verified by experiments.

Key words: radar cross section (RCS), dynamic measurement, angle correction

引 言

近年来, 装备隐身化成为现代武器发展的重要方向, 而测量技术是分析诊断强散射源、指导隐身武器研制、评估武器隐身性能等的最有效、快捷、准确的手段^[1-2]。按照目标的状态可以将测试分为静态测试和动态测试。动态测试要求舰船目标处于航行状态。虽然动态测试成本更加高昂, 但是可以测试其他方法难以测试的大型舰船目标, 且测试结果可以包含实际航行环境中的发动机、航迹等所有雷达散射截面(RCS)影响因素, 具有重要的研究意义。

现有的动态测试方法主要为地面平台对飞机目

标测试^[3], 或者空中平台对地面目标进行测试^[4], 而在舰船目标 RCS 动态测量中, 目标姿态和位置会不断变化, 从而导致实际测试中 RCS 测试数据与测试角度无法直接对应。针对这个问题, 本文推导了结合惯性/差分 GPS 组合导航及雷达位置得到随时间变化的雷达观察目标的角度关系, 提出了两种角度与 RCS 测试数据融合对应的方法, 一种是对 RCS 测试数据角度内均值, 另外一种是对 RCS 测试数据角度求取。最后, 利用 X 波段测试系统对典型舰船目标进行测试, 对方法的有效性进行验证, 数据处理结果与仿真结果的对比表明达到了较好的 RCS 测试数据与测试角度的对应结果。

* 收稿日期: 2021-09-16; 修回日期: 2022-03-22

1 角度修正

惯性/差分 GPS 组合导航系统给出的数据包括设备坐标系下的航向、俯仰、横滚,大地坐标系下设备的经度、纬度、高度,需要结合雷达位置求得测试时刻目标坐标系中雷达方向。

地心大地坐标系经纬高 (ϕ, λ, h) 转换为地心地固直角坐标系 (x, y, z) 的转换公式为:^[5]

$$\begin{cases} e^2 = f(2 - f) \\ N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \\ x = (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ z = [N(1 - e^2) + h] \sin \phi \end{cases} \quad (1)$$

其中, e 为椭球偏心率, N 为基准椭球体的卯酉圆曲率半径, a 和 f 分别为基准椭球体的长半径和极扁率,基于 WGS-84 大地坐标系,取 $a = 6378137$ m, $f = 1/298.257223563$ 。地心大地坐标系和地心地固直角坐标系示意图如图 1 所示。

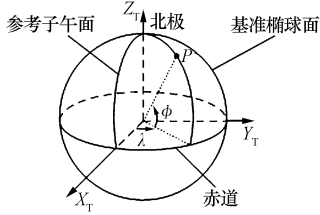


图 1 地心大地坐标系和地心地固直角坐标系

大地坐标系中,雷达和目标的经纬高分别为 (ϕ_r, λ_r, h_r) 和 (ϕ_t, λ_t, h_t) ,在地心地固坐标系中为 (x_r, y_r, z_r) 和 (x_t, y_t, z_t) ,则从目标到雷达的观测向量为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。以目标位置为原点,建立站心坐标系(如图 2 所示),观测向量可以等效表示为站心坐标:

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta n \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ \cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (2)$$

其变换过程为首先绕地心地固坐标系 Z 轴旋转 $\lambda \pi/2$,然后再绕新 X 轴旋转 $\pi/2 - \phi$ 。

考虑到基准椭球体的偏心率 e 很小,并结合系统性能和测试结果准确度,测试中雷达和目标的距离一般较近,且运动速度较慢,可利用近似公式减小运算量,地心大地坐标系转换到站心坐标系的近似公式为:

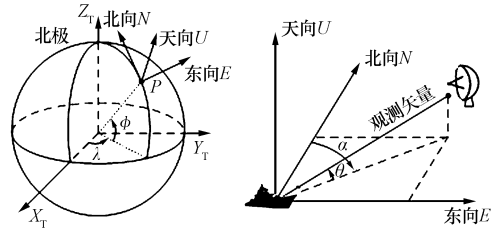


图 2 站心坐标系

$$\begin{cases} \Delta e = \Delta \lambda \cdot a \cos \phi' \\ \Delta n = \Delta \phi \cdot a \\ \Delta u = \Delta h \end{cases} \quad (3)$$

对于测试中某一时刻,目标拥有航向、俯仰、横滚,对应于 $\theta_h, \theta_p, \theta_r$,目姿态角定义如图 3(a)、(b)和(c)所示,目标姿态坐标系示意图如图 3(d)所示。将站心坐标系转换到目标坐标系,规定舰艏指向为 0° ,右舷为 90° 。由于组合导航系统安装原因,系统设备与目标姿态之间存在偏差,需要对该偏差值进行修正。

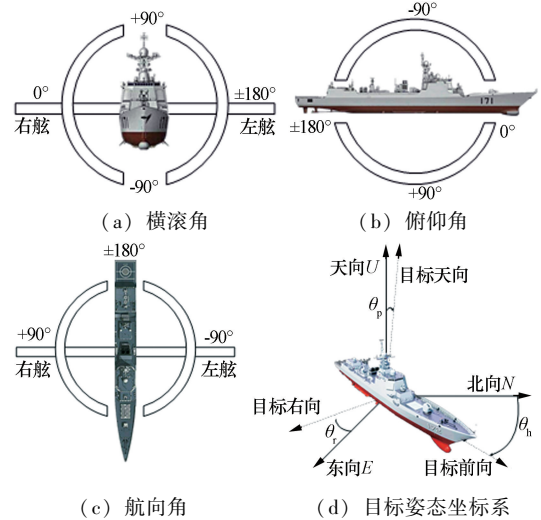


图 3 目标姿态坐标系及姿态角定义

再经过坐标系旋转,即得到目标坐标系中雷达方向,旋转公式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta e' \\ \Delta n' \\ \Delta u' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{p0} & \sin \theta_{p0} \\ 0 & -\sin \theta_{p0} & \cos \theta_{p0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{r0} & 0 & -\sin \theta_{r0} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{r0} & 0 & \cos \theta_{r0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{h0} & \sin \theta_{h0} & 0 \\ -\sin \theta_{h0} & \cos \theta_{h0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta n \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (4)$$

则可以得到目标坐标系中目标对雷达的俯仰角 θ 和方位角 α , 方位角定义为雷达北向顺时针转到观测矢量在水平面内投影方向上的角度。

$$\begin{cases} \theta = \arcsin\left(\frac{\Delta u}{\sqrt{(\Delta e')^2 + (\Delta u')^2 + (\Delta u'')^2}}\right) \\ \alpha = \arctan\left(\frac{\Delta e'}{\Delta n'}\right) \end{cases} \quad (5)$$

数据处理流程如图 4 所示。

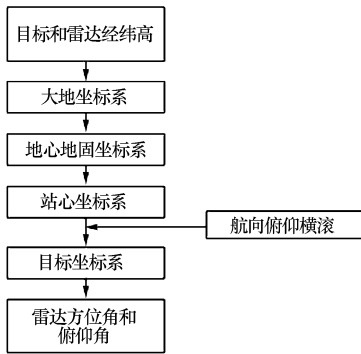


图 4 数据处理流程图

2 RCS 测试数据与组合导航数据综合处理

借助于组合导航数据计算获得测试角度的时间序列和 RCS 测试数据时间序列, 以测试时间为纽带, 可以将 RCS 测试数据与测试角度对应起来, 但是两者的时间序列都是离散的, 时间数据点并不对应。且在测试过程中, 由于海浪、洋流、阵风等环境因素, 目标转动时加速度、速度变化等目标因素的影响, 引起目标姿态的不均匀变化, 同时目标所处的位置也会移动, 这些共同造成了在目标坐标系中, 雷达方位变化的不均匀, 最终导致在单位角域范围内测试数据的数量不同。

针对以上问题, 有两种解决思路: 一是对 RCS 测试数据进行角度内均值 (如图 5 所示); 二是对 RCS 测试数据进行角度插值求取 (如图 6 所示)。第一种处理方法对原始 RCS 测试数据进行平滑处理, 适用于要求角度均匀的处理情况。由于噪声及目标特性影响, 测试得到的 RCS 测试数据往往变化比较剧烈, 所以一般不采用插值的方式得到对应时间的 RCS 测试数据, 而是采用角度内均值的方式对结果进行优化, 默认小角度内目标姿态不发生剧烈

变化。处理过程为基于采样间隔均匀的组合导航数据的时间, 对 RCS 测试数据进行平滑, 得到均匀间隔的 RCS 测试数据处理结果, 处理过程如下式:

$$\begin{cases} \theta - \frac{\Delta\theta}{2} \leq \theta(t_m) < \theta + \frac{\Delta\theta}{2}, t_m = t_1, t_2, \dots, t_M \\ \sigma(\theta_n) = \frac{1}{M} \sum_{t=t_1}^{t_M} \sigma(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\theta(t)$ 是测试角度时间序列, $\Delta\theta$ 是选定小角度间隔, M 是小角度间隔内 RCS 测试数据个数, $\sigma(t)$ 是 RCS 测试数据时间序列, $\sigma(\theta)$ 是 RCS 测试数据角度序列。

第二种处理方法适用于需要体现原始 RCS 测试数据与角度对应结果的情况。处理过程为基于雷达采样的时间 t' , 对观察目标角度进行插值, 得到雷达每个采样时间对应的角度 θ' 。

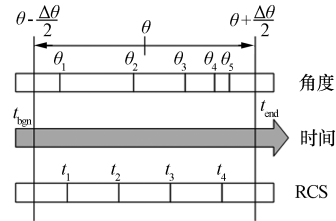


图 5 RCS 测试数据平滑示意图

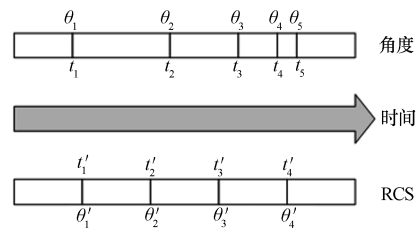


图 6 RCS 测试数据角度求取示意图

在测试时为了保证测试结果的完整性, 一般需要对目标进行超过 360° 的采样, 保证数据的完整性, 同时这也带来了一定的冗余数据, 这些冗余数据由于测试中目标姿态等各种因素的影响, 与原对应角度的数值并不完全对应, 所以应舍弃这部分数据。

3 试验

为验证方法的有效性, 利用 X 波段雷达在固定点位对典型舰船目标开展了目标 RCS 测量试验。主要技术参数如表 1 所示, 测试时目标航迹由于测

试环境影响,不再是圆形,而是随洋流不断移动位置,由此导致实际测试中角度的不均匀。

表 1 主要技术参数

| 参数项 | 参数值 |
|------------|------|
| 波段 | X |
| 极化方式 | VV |
| 采样速率/Hz | 500 |
| 组合导航数据率/Hz | 50 |
| 测试距离/m | 3000 |

测试中通过同轴摄像机观测目标方向,初步确定目标坐标系中雷达位置,如同轴摄像机观测到目标舰船,则认为此时测量的 RCS 数据为目标舰船数据,重复得到 RCS 测试结果中各峰值对应的舰艇、左舷、舰艏、右舷位置,但是对于各峰值间的测试数据,由于没有明显特征,无法精确得到对应角度结果。图 7 为时域采样数据,横坐标是脉冲数。图 8 是测试过程中通过雷达和目标的惯性/差分 GPS 组合导航数据计算得到的目标姿态角,需要通过本文提出的算法获得测试数据与角度之间的对应关系。

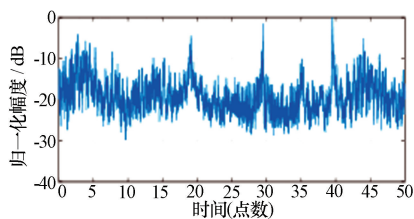


图 7 时域采样数据

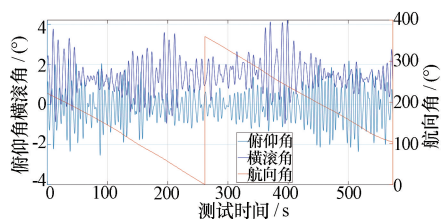


图 8 目标姿态角

图 9 是角度内均值处理结果,均值角度间隔为 0.1° ,图 10 是测试数据角度插值求取处理结果。电磁计算仿真可以精确获得目标 RCS 与角度对应结果。为验证算法正确性,图 9 和图 10 将测试结果与目标电磁计算仿真结果进行了对比,可以看出,两种处理过程都能达到较好的角度对应结果,舰艇、舰艏、左舷及右舷的特征峰值与仿真结果相一致。图 11 在局部区域对两种方法进行了比较,角度内均值方法数据点间隔均匀,测试数据角度插值求取方法保留了更多数据信息。图 12 是角度求取结果的单位角度点数分析统计图,可以看出,测试角度的稀疏程度呈现慢波动变化,这是测试环境与舰船位置综

合作用的结果。

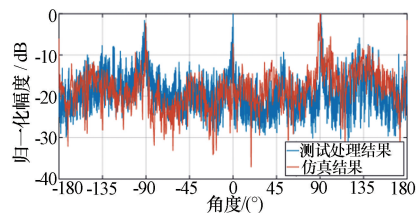


图 9 角度内均值处理结果

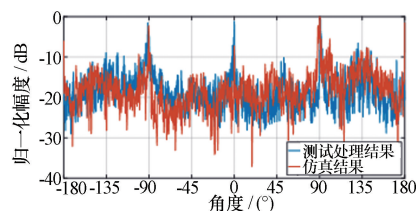


图 10 测试数据角度插值求取处理结果

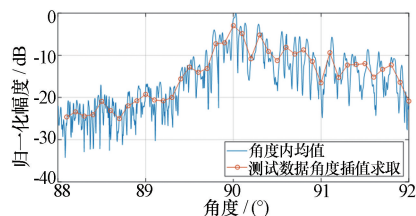


图 11 角度内均值方法与测试数据角度插值求取方法局部对比

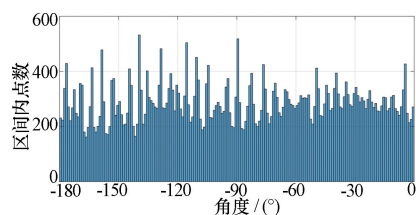


图 12 角度内目标点数变化

4 结论

目标姿态和位置会不断变化,从而导致实际测试中 RCS 测试数据与测试角度无法直接对应。本文利用惯性/差分 GPS 组合导航获得目标的航向、横滚、俯仰以及经纬高,结合雷达的经纬高,推导得到了测试角度时间序列。此外,提出了两种角度与 RCS 测试数据对应的方法,一种是对 RCS 测试数据角度内均值,该方法可以缩减数据量,得到均匀间隔角度测试结果;另外一种是对 RCS 测试数据角度求取,可以得到每个测试点对应的角度。利用 X 波段雷达在固定点位对典型舰船目标开展了目标 RCS 测量试验,数据处理结果与仿真结果的对比表明达到了较好的 RCS 测试数据与测试角度的对应结果。

(下转第 50 页)

- Wang X B, Lu Z J, Lv M Q, et al. Optical single sideband full-duplex RoF system with continuously tunable optical carrier-to-sideband ratio [J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(2): 89-94
- [8] Shahzad A, Zafrullah M, Islam M. Design and simulation of double side band optical carrier suppression (DSBSC) based millimeter wave system using optical sub carrier multiplication [J]. *Journal of Optics*, 2020, 49(2): 155-162
- [9] 王现彬, 杨彦彬, 卢智嘉, 等. 基于 FBG 和偏振复用的 8 倍频全双工 RoF 系统 [J]. *光电子激光*, 2020, 31(2): 130-135
- Wang X B, Yang Y B, Lu Z J, et al. Frequency eight-fold full-duplex RoF system based on FBG and polarization multiplexing [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2020, 31(2): 130-135
- [10] Muthu K, Raja A, Sevendran S. Optical generation of millimeter waves through frequency decoupling using DP-MZM with RoF transmission [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(2): 63
- [11] 卢智嘉, 杨蓓, 王现斌. 一种 12 倍频全双工 RoF 系统 [J]. *激光与红外*, 2021, 51(7): 917-924
- Lu Z J, Yang B, Wang X B. Frequency 12-tupling full-duplex RoF system [J]. *Laser and Infrared*, 2021, 51(7): 917-924
- [12] 刘爽. 基于光外调制器的高阶倍频毫米波信号产生技术与传输性能研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2020
- Liu S. Research on generation technology and transmission performance of high order frequency doubling millimeter wave signal based on optical external modulator [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020
- [13] Teng Y C, Zhang P, Xu X, et al. Photonic frequency-multiplication millimeter-wave generation with cascaded DPMZMs [J]. *Optical Review*, 2021, 28: 315-330
- [14] 应祥岳, 徐铁峰, 李军, 等. 基于级联双平行 MZM 的 16 倍频光生毫米波技术 [J]. *光电子激光*, 2017, 28(11): 1212-1217
- Ying X Y, Xu T F, Li J, et al. Photonic generation of millimeter-wave signal via frequency 16-tupling based on cascaded dual-parallel MZM [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2017, 28(11): 1212-1217
- [15] 彭继慎, 温禄淳. 基于级联调制器的 24 倍频毫米波信号产生 [J]. *光电技术应用*, 2016, 37(5): 758-762
- Peng J S, Wen L C. 24 frequency multiplication millimeter-wave signal generation based on cascade modulators [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2016, 37(5): 758-762
- [16] 李志浩, 倪鹏程, 王东飞, 等. 一种基于并联 DPMZM 结构的无滤波器 16 倍频光生毫米波方案 [J]. *激光杂志*, 2021, 42(3): 32-36
- Li Z H, Ni P C, Wang D F, et al. A filter-less scheme for frequency 16-tupling millimeter-wave generation based on double parallel DPMZM [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(3): 32-36
- 刘小磊** 男, 1980 年生, 博士, 讲师。主要研究方向: 光载无线通信技术。
E-mail: liuxiaolei@hpu.edu.cn

(上接第 44 页)

参考文献

- [1] 许小剑. 雷达目标散射特性测量与处理新技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017
- Xu X J. New techniques for radar target scattering signature measurement and processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017
- [2] 黄亚林, 张晨新, 刘凯越, 等. 基于动态 RCS 的隐身目标检测研究 [J]. *微波学报*, 2017, 33(1): 58-62
- Huang Y L, Zhang C X, Liu K Y, et al. A study on detection of stealth target based on dynamic RCS [J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(1): 58-62
- [3] 粘朋雷, 刘荣丰. 掠海飞行小目标 RCS 动态测量方法研究 [J]. *舰船电子对抗*, 2019, 42(4): 5-9, 36
- Nian P L, Liu R F. Research into dynamic measurement method of RCS for small skimming flying targets [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2019, 42(4): 5-9, 36
- [4] 张浙东, 黎鑫, 张金鹏, 等. 基于姿态修正的目标 RCS 动态测量方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(6): 1242-1248
- Zhang Z D, Li X, Zhang J P, et al. Dynamic measurement method of target RCS based on attitude correction [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(6): 1242-1248
- [5] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017
- Xie G. Principle of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017
- 任群亭** 男, 1996 年生, 硕士。主要研究方向: 目标电磁散射特性测量技术。
E-mail: kenton_ren@163.com