

# 基于成像提取的 RCS 精确测量方法研究\*

李南京<sup>1</sup>, 徐志浩<sup>1,2</sup>, 胡楚锋<sup>1</sup>, 党娇娇<sup>1,2</sup>, 郭淑霞<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室 西安 710065; 2. 西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

**摘要:**高精度雷达散射截面(RCS)测量对背景环境具有较高要求,当背景环境存在较强干扰时,通过背景矢量对消难以消除杂波影响。提出基于成像提取的高精度 RCS 测量方法,从背景杂波中分离和提取出目标的散射信号,从而提高了测量的精度。首先推导了像与 RCS 的数学关系,然后利用转台模式下的测量回波进行成像处理,得到目标区域的二维像;从成像区域中提取目标的二维像,通过波谱变换和定标获得目标的 RCS。仿真结果表明,该方法对于具有干扰情况下的 RCS 测量,可以改善 3 ~ 5 dB 的测试精度,并且能够对弱散射目标进行测量。实验结果表明了成像提取方法的有效性和准确性。

**关键词:** 雷达散射截面;微波成像;成像提取;成像分辨率

**中图分类号:** TN95 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Research on accurate radar cross section measurement method based on imaging extraction

Li Nanjing<sup>1</sup>, Xu Zhihao<sup>1,2</sup>, Hu Chufeng<sup>1</sup>, Dang Jiaojiao<sup>1,2</sup>, Guo Shuxia<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Unmanned Aerial Vehicle, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China; 2. Institute of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** High-precision radar cross section (RCS) measurement has high requirement for background environment. It is difficult to eliminate the clutter effect through background vector cancelling when strong interference exists in background environment. This paper proposes a high accuracy RCS measurement method based on imaging extraction to separate and extract the target scattering signal from background clutter, thereby the measurement accuracy is improved. Firstly, the mathematical relationship between the image and RCS is derived, then the echo measured in the revolving stage mode is utilized to conduct the imaging processing and obtain the 2-D image of the target area. Then, the 2-D image of the target is extracted from the imaging area, and the RCS of the target is obtained through spectrum transform and calibration. The simulation results show that in RCS measurement under interference the proposed method can improve the measurement accuracy by 3 ~ 5 dB, and measure the target with weak scattering. Experiment results show the effectiveness and accuracy of the imaging extraction method.

**Keywords:** radar cross section (RCS); microwave imaging; imaging extraction; imaging resolution

## 1 引言

随着现代战争中各种武器装备隐身技术的发展,为了验证目标的隐身性能,需要精确测量目标的雷达散射截面(radar cross section, RCS)。目前 RCS 的定量获取方法主要分为理论预估和实际测量。RCS 的实际测量始于雷达发展的初期,但因其军工背景,直到 20 世纪 60 年

代都难以获知其发展程度。1965 年,IEEE 论文集出版了雷达散射特刊,提出了一些先进的 RCS 测量概述及技术要求,在此之后随着开源文献越来越多,更多的高校和研究人员开始投身于这一领域。接下来的一段时期,基于电磁散射理论,出现了很多算法和工具,如矩量法(method of moments, MOM)、几何绕射理论(geometrical theory of diffraction, GTD)和物理光学法(physical optics, PO),奠定了电磁散射数值计算的基础。同一时期人们

对降低军用目标 RCS 的需求,推动了散射测量技术的快速发展,使人们开始追求精确测量低散射目标的 RCS<sup>[1]</sup>。随着测量技术的不断提高,RCS 测量技术已经发展得相当成熟,包括常规的室内、室外 RCS 测试场测量<sup>[2-3]</sup>,抛物面紧缩场缩距测量<sup>[4]</sup>,利用时域门的时间分离法和角度滤波的空间分离法提高信噪比<sup>[5]</sup>,利用高分辨率系统和逆合成孔径技术进行散射点识别的成像测量技术<sup>[6-8]</sup>,利用时域测量系统测试目标的瞬态响应、以及太赫兹 RCS 测量等先进技术<sup>[9]</sup>,均已发展到相当成熟的阶段,误差甚至可小于 1 dB,而且正在向更高的测试精度和更完善的测试功能发展<sup>[10]</sup>。

当目标的 RCS 量级较大时,对测试系统及测试方法的要求较低,使用常规的 RCS 测试方法就能够获得较准确的结果。但当被测目标的 RCS 量级较低时,如测量 -40 dBsm 的目标,要满足 1 dB 的误差,背景电平需要达到 -60 dBsm,弱散射目标的高精确测量对测试系统和测试方法提出了更高的要求<sup>[11]</sup>。一般暗室的测试环境可以通过选用合适的器材、妥善布置吸波材料,对杂波进行对消,并加时域窗以降低、消除收发天线间耦合和暗室后墙等强散射杂波干扰影响,提高测量精度。但是对消技术对于测试环境(主要是支架)与测试目标互相耦合产生的干扰信号的优化效果有限,且随着时间推移对固有强散射点的对消效果会逐渐变差<sup>[12]</sup>。为了获得精确的 RCS,还需要测量定标体,对目标的回波数据进行定标处理,以补偿系统特性对目标测量的影响,但定标并不能消除背景噪声的干扰<sup>[13]</sup>。紧缩场可以有效解决远场测试距离的问题,产生的平面波将聚集在平行波束内,暗室内 4 个侧壁的照射电平很低,从而降低了对暗室的要求。但当测试的频率较低时,紧缩场存在严重的边缘绕射,极大地影响了测试精度,且同样难以消除互耦产生的杂波干扰<sup>[14-15]</sup>。即使改变转台的形状,或全部包覆吸波材料,仍然存在部分干扰信号,严重影响测试精度<sup>[16]</sup>。

针对测量弱散射目标时的背景杂波难以消除,以及需要测量某一目标局部区域 RCS 的情况,提出了采用成像提取的方法改善 RCS 测量精度。首先推导了像和 RCS 的关系,采用高分辨率微波成像算法,从回波中获得目标和背景的二维像;然后从二维像中提取出目标像并反演 RCS;最后通过仿真和实验证明此方法可以有效消除环境噪声,获取弱散射点的散射特性。与一般的 RCS 测量方法相比,通过成像提取能够提高 RCS 测量的准确性,能从背景环境中分离和提取出感兴趣目标的散射特性,数据处理过程直观,具有较高的测量精度。

## 2 像与 RCS 的关系

如图 1 所示,发射天线沿着距目标中心  $R_0$  的距离做圆周移动, $OB$  间的距离为  $R_{OB}$ ,这种运动方式与转台模式是等效的。当雷达的测试距离为  $R$ ,偏离角为  $\theta$ ,则其方位坐标为  $(R\sin\theta, -R\cos\theta)$ ,对应的单位矢量为  $(\sin\theta, -\cos\theta)$ 。若测试距离满足远场条件,从雷达到目标上任意一点  $(x_0, y_0)$  的距离为:

$$R(x, y) \approx R_0 + R_{OB} = R_0 + y_0 \cos\theta - x_0 \sin\theta \quad (1)$$

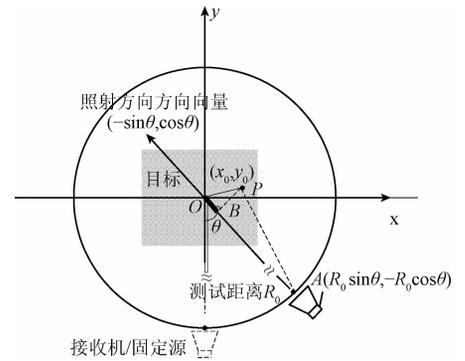


图1 转台成像模型

Fig. 1 Revolving stage imaging model

天线接收到的雷达波信号的回波为<sup>[17]</sup>:

$$E_r(f, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(x, y) e^{-j(4\pi/c)(R_0 + y\cos\theta - x\sin\theta)} dx dy \quad (2)$$

式中:  $\gamma(x, y)$  是目标的空间反射率分布,即目标的二维像,是天线频率  $f$  和方位角  $\theta$  的函数。标准球的反射率分布为:

$$\gamma(x, y) = \delta(0, 0) \quad (3)$$

相应的接收信号为:

$$E_s(f, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(0, 0) e^{-j(4\pi/c)(R_0 + y\cos\theta - x\sin\theta)} dx dy = e^{-j(4\pi/c)R_0} \quad (4)$$

为消除系统的频率特性影响,在成像之前,将目标与标准球的数据相比:

$$E(f, \theta) = E_r(f, \theta) E_s(f, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(x, y) e^{-j(4\pi/c)(y\cos\theta - x\sin\theta)} dx dy \quad (5)$$

令  $K_x = 2\sin\theta/\lambda$ ,  $K_y = -2\cos\theta/\lambda$ , 则式(5)可写为:

$$E(K_x, K_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(x, y) e^{j2\pi(K_x x + K_y y)} dx dy \quad (6)$$

式(6)满足傅里叶变换关系式,当  $E(K_x, K_y)$  已知时,可通过逆傅里叶变换得到:

$$\gamma(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(K_x, K_y) e^{-j2\pi(K_x x + K_y y)} dK_x dK_y \quad (7)$$

则像与回波电场是傅里叶变换对:

$$\gamma(x, y) \Leftrightarrow E(K_x, K_y) \quad (8)$$

式中:  $E(K_x, K_y)$  是相应的波谱, 它将目标的像与目标散射联系起来。而由入射功率和回波功率可计算出目标区域的 RCS, 从而建立起像与 RCS 之间的关系。

### 3 成像算法

由消除系统频率特性后的式(5), 令  $k = 2f/c$ , 可得:

$$E(k, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(x, y) e^{-j2\pi k(y \cos \theta - x \sin \theta)} dx dy \quad (9)$$

将式(9)做二维逆傅里叶变换, 由于在实际测试中频率范围和转角是有限的, 得到近似的转台成像基本公式为:

$$\gamma(x, y) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} k E(k, \theta) e^{j2\pi k(y \cos \theta - x \sin \theta)} dk d\theta \quad (10)$$

因式(10)的积分限不满足快速傅里叶逆变换 (IFFT) 条件, 在实际的运算中需要对  $k$  频移  $k_{\min}$ 。令  $B'$  为空间频率  $k$  的带宽, 且  $l = y \cos \theta - x \sin \theta$ , 得:

$$P_{\theta}(l) = \int_0^{B'} (k + k_{\min}) E(k + k_{\min}, \theta) e^{j2\pi k l} dk \quad (11)$$

$$\gamma(x, y) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} P_{\theta}(l) e^{j2\pi k_{\min} l} d\theta \quad (12)$$

由于系统发射的是步进频率信号, 频率点是离散的, 根据采样的频率点数  $N$ , 对  $k$  进行离散化:  $k = n \cdot B' / N - 1$ , 其中  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , 于是式(11)改写成:

$$P_{\theta}(l) = \sum_{n=0}^{N-1} \left( \frac{B'}{N-1} \cdot n + k_{\min} \right) E(n, \theta) e^{j2\pi \frac{B'}{N-1} \cdot n \cdot l} \quad (13)$$

将投影线  $l$  按照距离分辨率  $c/2B$  进行等间距离散化  $l_m = m \cdot c/2B = m/B'$ , 其中  $m = 0, 1, \dots, N-1$ , 令  $E_{\theta}(n) = (B' \cdot n / (N-1) + k_{\min}) E(n, \theta)$ , 则式(13)可表示为:

$$P_{\theta}(l_m) = \sum_{n=0}^{N-1} E_{\theta}(n) e^{j2\pi \frac{m}{N} n} = \text{IFFT}[E_{\theta}(n)] \quad (14)$$

式中:  $P_{\theta}(l_m)$  是在相应  $l_m$  点上得到的投影值。积分过程中的投影线  $l$  随  $\theta$  变化, 对于空间任一点的  $\gamma(x, y)$ , 每个  $\theta$  对应不同的  $l$ , 故  $P_{\theta}(l)$  是离散的  $l$  处的投影值, 需通过对  $P_{\theta}(l_m)$  进行插值获得  $P_{\theta}(l)$ :

$$P_{\theta}(l) = P_{\theta}(l_{m-1}) + (l - l_{m-1}) \tan \alpha \quad (15)$$

$$\tan \alpha = [P_{\theta}(l_m) - P_{\theta}(l_{m-1})] / (l_m - l_{m-1}) \quad (16)$$

插值后即可对角度进行积分:

$$\gamma(x, y) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} P_{\theta}(l) e^{j2\pi k_{\min} l} d\theta = \sum_{\theta} P_{\theta}(l) e^{j2\pi k_{\min} l} \quad (17)$$

通过 IFFT、插值、角度积分 3 步, 便完成了对回波的回波成像处理过程, 得到了被测目标的二维图像。

### 4 像的提取及 RCS 反演方法

提取出被测目标的反射率分布后, 根据目标散射源在二维图像中区域, 用半径为  $a$  的二维窗函数此对区域反射率分布进行截取, 得到新的二维像为:

$$\gamma_0(x, y) = \begin{cases} \gamma(x, y), & r < a \\ 0, & r \geq a \end{cases} \quad (18)$$

对新的二维像进行二维傅里叶变换, 得到目标的谱域数据为:

$$E(K_x, K_y) = \iint_{\gamma_0(x, y)} \gamma_0(x, y) e^{j2\pi(K_x x + K_y y)} dx dy \quad (19)$$

与式(6)对比可知  $K_x$  和  $K_y$  是谱域的横轴和纵轴, 积分范围对应  $\gamma_0(x, y)$  所在二维平面的上下限。对  $E(K_x, K_y)$  进行插值, 得到随频率和角度变化的  $E(f, \theta)$ , 插值公式为:

$$f = (c/2) \times \sqrt{K_x^2 + K_y^2} \quad (20)$$

$$\theta = -\tan^{-1}(K_x/K_y) \quad (21)$$

同样测试一个 RCS 为  $\sigma_0$  的定标体, 对其反射率分布进行二维傅里叶变换, 得到随频率和角度变化的金属球谱域数据  $E_0(f, \theta)$ 。将目标与金属球的谱域数据相比, 最终得到被测目标的 RCS:

$$\sigma = E(f, \theta) - E_0(f, \theta) + \sigma_0 \quad (22)$$

### 5 仿真分析

为了验证基于成像提取的 RCS 精确测量方法, 用 FEKO 仿真软件仿真了在远场测试条件下 3 种情况的测量结果。

- 1) 目标干扰的消除精度;
- 2) 弱散射目标 RCS 测量精度;
- 3) 可进行成像提取目标的最小间隔。

#### 5.1 目标干扰消除精度

若被测目标周围存在强散射源, 将对目标回波产生影响, 使计算的目标 RCS 与真实值产生严重偏差。RCS 的测量误差主要由目标与背景环境的回波功率比决定, 产生的最大差可表示为:

$$\Delta \sigma = -20 \lg(1 - 10^{-\varepsilon/20}) \quad (23)$$

式中:  $\varepsilon$  表示目标与背景环境的回波功率比。为了验证方法的效果, 仿真了直径为 150 mm 的金属球, 与球心间距 200 mm 处放置直径为 50 mm 金属球作为背景干扰, 仿真模型如图 2 所示。

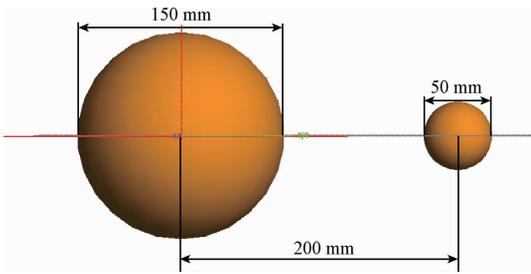


图 2 球间距 200 mm 的大球(直径 150 mm)与小球(直径 50 mm)的仿真模型

Fig. 2 Simulation model of the big ball (the diameter of 150 mm) and the small ball (the diameter of 50 mm) with the distance of 200 mm apart

首先使用成像算法对目标回波进行处理,根据所成的二维像,提取大球的像消除小球干扰,并根据 150 mm 定标球的散射数据反演目标的 RCS。目标区域的二维像、提取的目标像、干扰下的大球 RCS、消除干扰后的大球 RCS 与真实 RCS 的对比分别如图 3~5 所示。消除干扰后的大球 RCS 与小球理论 RCS 基本吻合,图 5 中金属球的 RCS 起伏已小于 1 dB,可以看出采用该方法消除了背景环境的干扰, RCS 的测量精度改善 3~5 dB。

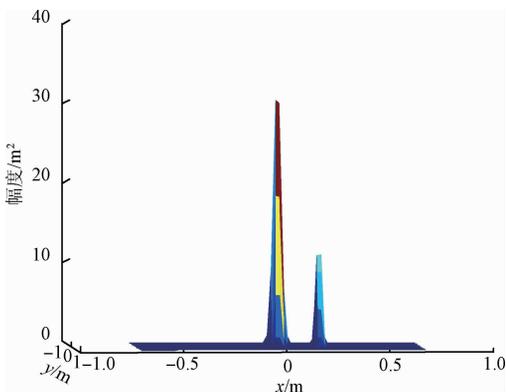


图 3 目标区域的二维像

Fig. 3 2-D image of the target area

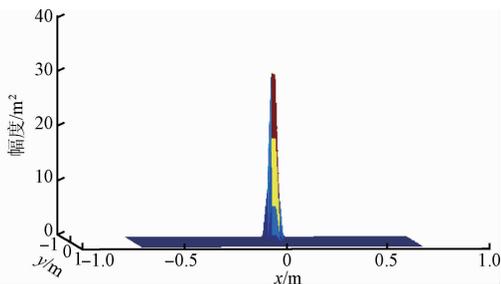


图 4 提取目标的二维像

Fig. 4 2-D image of the extracted target

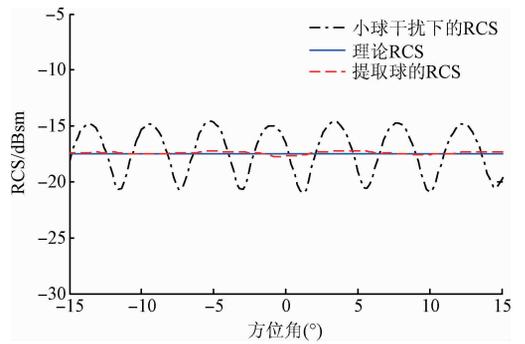


图 5 小球干扰下的大球 RCS、消除干扰后的大球 RCS 与理论 RCS 的对比

Fig. 5 Predicted RCS of the big ball under the small ball interference, the big ball RCS after eliminating the interference compared with the theoretical RCS

### 5.2 弱散射目标 RCS 测量精度

弱散射目标的 RCS 通常要低于  $-40 \text{ dBsm}$ ,在高精度的 RCS 测量时,容易受到背景杂波的干扰,精确测量弱散射目标的 RCS 往往比较困难。以测量直径为 10 mm 金属球(理论值为  $-41 \text{ dBsm}$ )为例,与球心间距 200 mm 处放置直径为 150 mm 的金属球作为干扰,仿真模型如图 6 所示。使用成像算法对目标回波进行成像,提取小球的二维像,并根据定标球的散射数据反演目标的 RCS。目标区域的二维像、提取的目标像、反演得到的小球 RCS 与真实 RCS 的对比分别如图 7~9 所示。

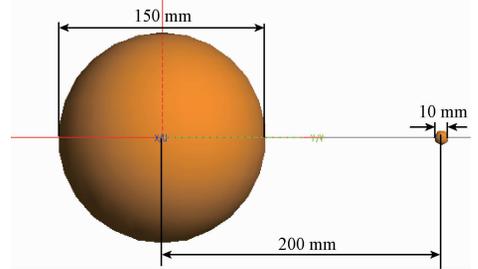


图 6 球间距 200 mm 的大球(直径 150 mm)与小球(直径 10 mm)的仿真模型

Fig. 6 Simulation model of the big ball (the diameter of 150 mm) and the small ball (the diameter of 10 mm) with the distance of 200 mm apart

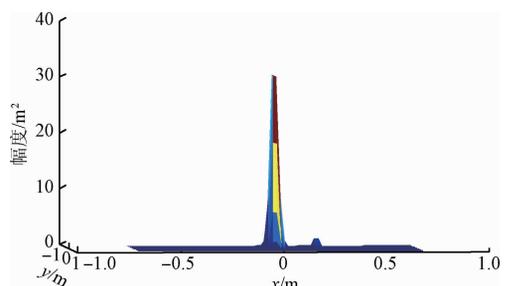


图 7 目标区域的二维像

Fig. 7 2-D image of the target area

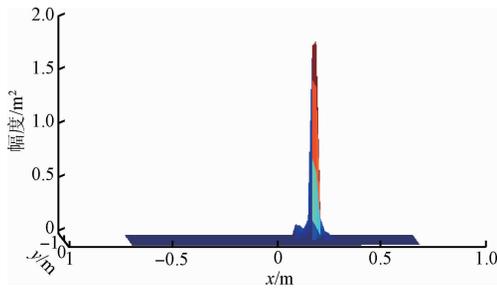


图8 提取目标的二维像

Fig. 8 2-D image of the extracted target

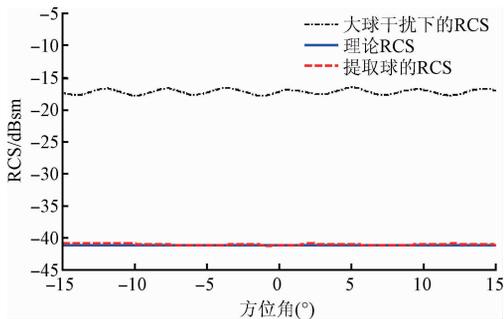


图9 反演得到的小球 RCS 与理论 RCS 的对比

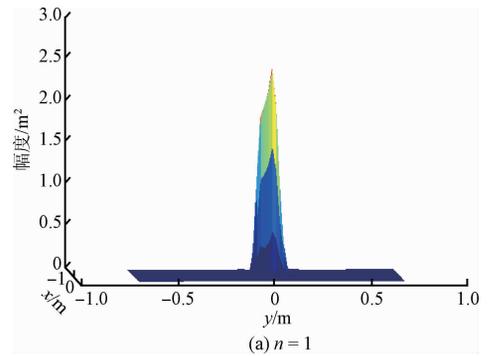
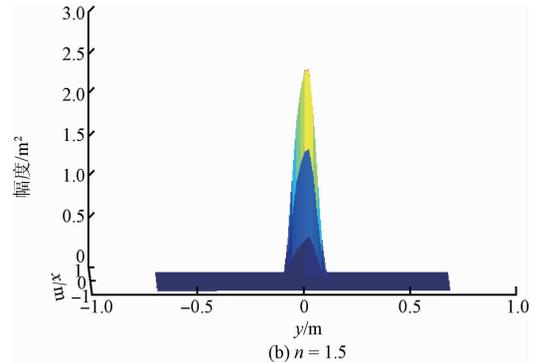
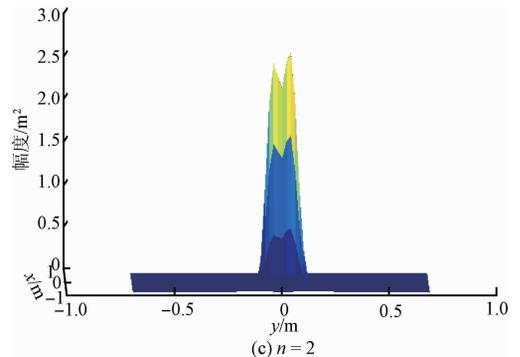
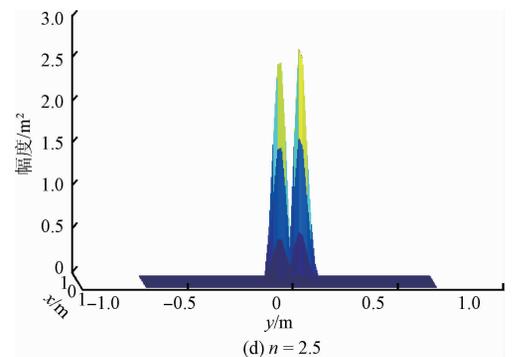
Fig. 9 Comparison between the retrieved small ball RCS and the theoretical RCS

由图9可知,反演得到的小球 RCS 与理论 RCS 基本吻合,表明基于成像提取的目标 RCS 反演方法可以准确测量弱散射源的 RCS。

### 5.3 成像提取目标的最小间隔

理论上,在仿真和实际测量中,散射源的间距不能小于成像分辨率。成像分辨率分为纵向分辨率和横向分辨率,其中纵向分辨率  $\Delta y = c/2B$ ,  $c$  为光速,  $B$  为测量的频率带宽;横向分辨率  $\Delta x = \lambda/2\theta$ ,  $\lambda$  为波长,  $\theta$  为孔径角。由于在成像过程中,未经加窗处理会引起很高的旁瓣,故一般成像都会采用加窗处理。但是加窗会使的主瓣展宽,影响分辨率。仿真两个直径为 20 mm 的金属球验证可进行成像提取的目标最小间隔,频率范围为 8 ~ 12 GHz,步进频率为 5 MHz,转角从  $-11.5^\circ \sim 11.5^\circ$ ,角度间隔  $0.2^\circ$ ,使纵向分辨率和横向分辨率大致相等。两球分别纵向和横向摆放,取球间距为  $n$  倍分辨率,成像结果如图 10 和 11 所示。

通过仿真数据可知,目标间距为 2 倍分辨率时恰好可以分辨。由于没有系统架设和环境的影响,在纵向分辨率和横向分辨率一致的情况下,成像的纵向成像效果与横向基本一致。

(a)  $n = 1$ (b)  $n = 1.5$ (c)  $n = 2$ (d)  $n = 2.5$ 图10 纵向排列间距为  $n$  倍分辨率时的两球的二维像Fig. 10 2-D images of the vertically arranged two balls with the distance of  $n$  times of the resolution apart

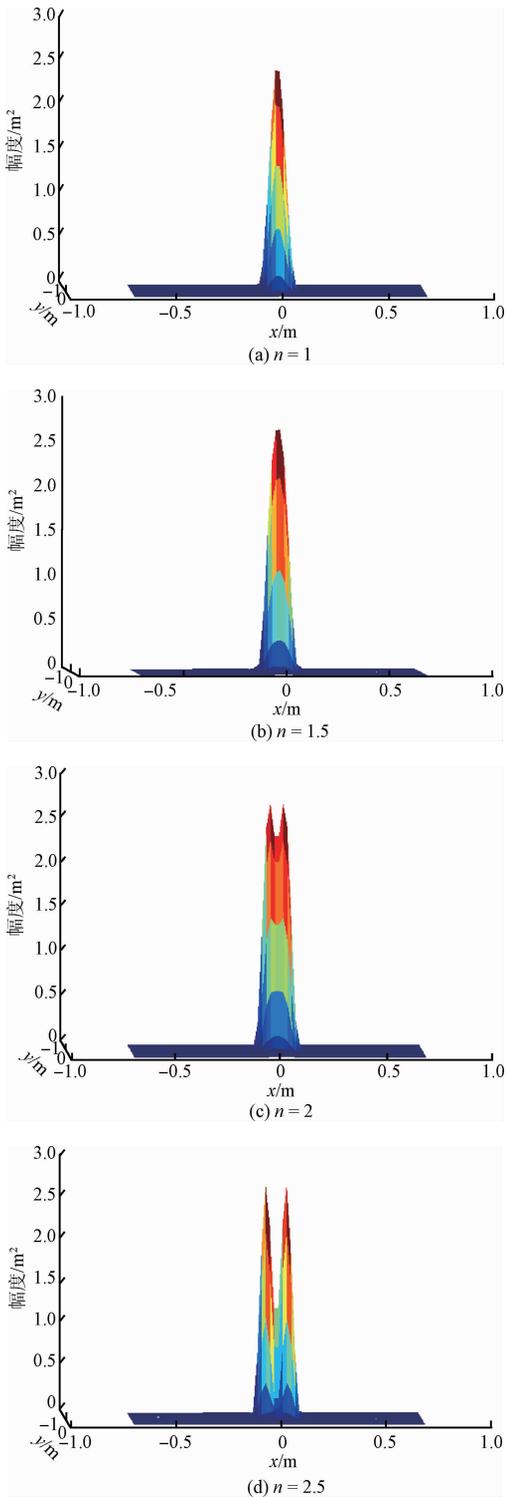


图 11 横向排列间距为  $n$  倍分辨率时的两球的二维像  
 Fig. 11 2-D images of the horizontally arranged two balls with the distance of  $n$  times of the resolution apart

## 6 实验结果

在微波暗室中分别测试 5 个直径为 53 mm 的金属球

(见图 12(a)), 及一个直径 53 mm 的金属球 (见图 12(b)), 测试的频率范围为 8 ~ 12 GHz, 频率间隔为 5 MHz。转动角度  $-25^\circ \sim 25^\circ$ , 角度间隔  $0.2^\circ$ 。以两种对比方案说明方法的有效性和准确性。1) 对 5 个金属球成像, 提取与图 12(b) 中位置相同的金属球的二维像, 并对这个金属球的 RCS 进行反演; 2) 直接测试图 12(b) 中金属球的 RCS, 经直径为 150 mm 的金属球定标, 得到金属球的 RCS。比较通过两种方案获得的单个金属球的 RCS。

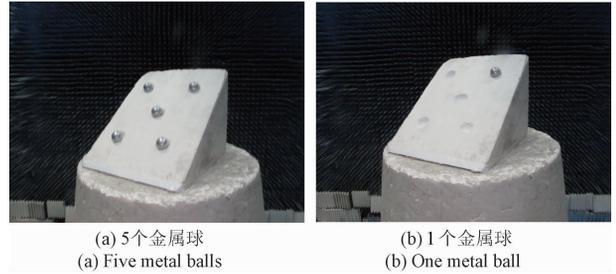


图 12 五个金属球与一个金属球

Fig. 12 Five metal balls and one metal ball

首先, 对 5 个金属球进行成像处理, 如图 13(a) 所示, 提取对应位置金属球的二维像, 如图 13(b) 所示。

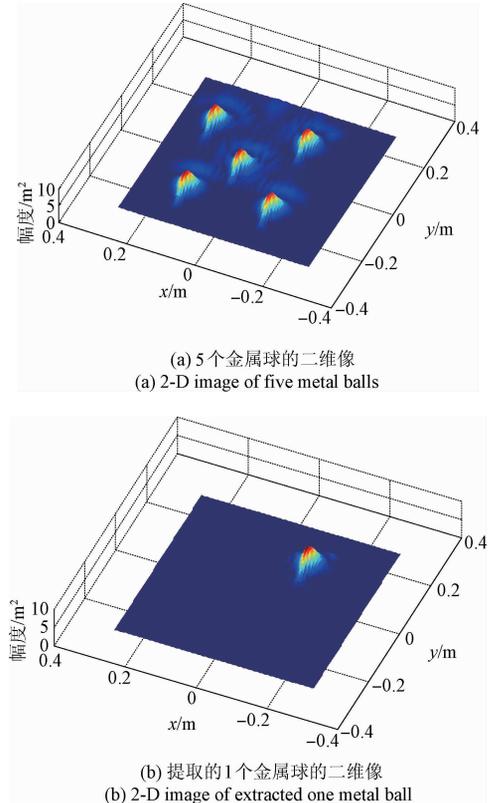


图 13 五个金属球和提取后一个金属球的二维像

Fig. 13 2-D images of five metal balls and extracted one metal ball

对提取的目标金属球的二维像分布进行波谱变换,经过反演和定标得到目标金属球的 RCS,如图 14 中实线所示。直接测试图 12 (b) 中的金属球,得到的目标金属球 RCS 如图 14 中虚线所示。从结果可知,测试角域内两种测试方法相差不超过 0.5 dB,说明通过成像提取目标散射源再反演获取目标 RCS 的方法是可行的。

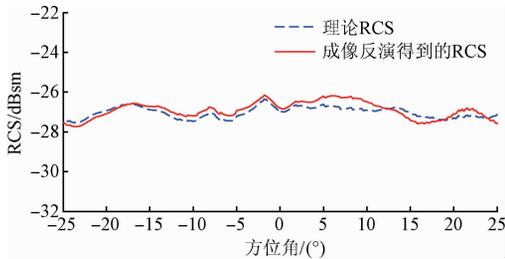


图 14 两种情况获取 RCS 的对比图

Fig. 14 Comparison of the RCSs obtained in two cases

为了提高飞行器的隐身性能,在飞机设计时,对天线和光电吊舱等外装部件采用共形式安装。进行 RCS 测试时,入射电场与这些部件基本处于平行的状态,因此它们在机体表面形成了弱散射源。对一个装机状态下的共形天线进行测量,如图 15 (a) 所示。将天线嵌入模拟机体的金属蒙皮中,金属蒙皮的周围包裹吸波材料,确保金属蒙皮边缘的散射尽可能小。测试频段为 9 ~ 11 GHz,频率间隔为 5 MHz。转动角度为  $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,角度间隔为  $0.2^{\circ}$ 。

通过微波成像算法得到金属蒙皮区域的二维图像,如图 15 (b) 所示。从中提取出共形天线区域的二维反射率分布,如图 15 (c) 所示。经过波谱变换得到目标的谱分布如图 15 (d) 所示。经过金属球定标之后,选取频率为 10 GHz 的 RCS,如图 16 所示。

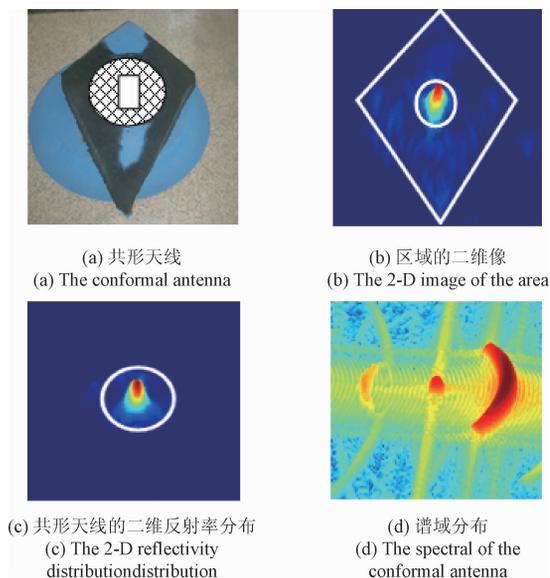


图 15 低散射共形天线的测试

Fig. 15 The test of conformal antenna with low scattering

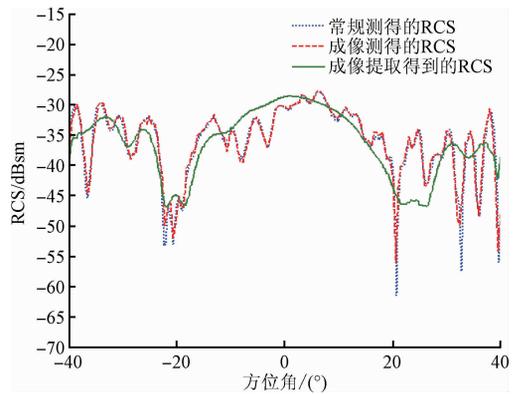


图 16 几种测试处理结果的比较

Fig. 16 Comparison of several test results

图 16 中,点线是采用常规 RCS 测试方法得到的结果,它包含了机体蒙皮和共形天线的散射。实线是先对整体区域进行二维微波成像,直接反演获得的 RCS。两者在全角域范围内吻合良好,说明通过微波成像反演 RCS 与常规测试方法获得的 RCS 是等效的。两条曲线在角域范围内有一定的波动,其主要原因是机体蒙皮表面的散射所引起的。提取共形天线区域的反射率分布,进行波谱变换后获得的共形天线 RCS 如虚线所示。它比前两者低 3 ~ 5 dB,而且也变得光滑。说明了采用这种成像提取的方法较好地分离了共形天线和机体蒙皮的散射,提高了弱散射源的测试精度。

## 7 结 论

针对一般的散射测量方法难以有效消除环境噪声,测量弱散射源的 RCS,推导了目标像与 RCS 的数学关系,采用微波成像算法获取目标的散射源分布,通过成像提取和波谱变换精确反演目标的 RCS,消除了目标周围的环境干扰。还讨论了测量弱散射目标 RCS 的有效性,以及成像提取时目标的最小间隔。结果表明成像提取的方法可以精确测量目标的 RCS,具有较强的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] HESS D W. Introduction to RCS measurements [C]. Antennas & Propagation Conference, 2008:37-44.
  - [2] 刘密歌,张麟兮,李南京. 基于矢量网络分析仪的 RCS 测量系统及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(1):82-85.
- LIU M G, ZHANG L X, LI N J. RCS Measurement system based on phasor network analyser[J]. Journal of

- Electronic Measurement and Instrumentation, 2007, 21(1):82-85.
- [ 3 ] 张新好,田进军,洪韬,等. 外场 RCS 测量多路径干扰抑制技术研究[J]. 北京理工大学学报,2011,31(5):598-602.  
ZHANG X H, TIAN J J, HONH T, et al. Study of multipath interference suppression in outdoor RCS measurement [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(5):598-602.
- [ 4 ] 周国锋,李晓星,栾京东,等. 大型紧缩场边缘干涉误差检测及拼缝修正[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 166-171.  
ZHOU G F, LI X X, LUAN J D. Edges interference error detection and reflector gaps correction for large-scale compact range [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 166-171.
- [ 5 ] 江岩,吕朋尧. 基于矢量网络分析的材料反射率测试方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 19-22.  
JIANG Y, LV P Y. Research on material reflectivity measurement method based on vector network analyze[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(8):19-22.
- [ 6 ] 胡楚锋,周洲,李南京,等. 一种时域平面扫描三维成像算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 764-768.  
HU CH F, ZHOU ZH, LI N J, et al. Study on three-dimensional imaging time-domain algorithm based on planar scanning mode[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 764-768.
- [ 7 ] 张利军,张民,刘勍,等. 基于混和时频分析方法的 ISAR 成像研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 563-568.  
ZHANG L J, ZHANG M, LIU Q, et al. Research of ISAR imaging based on hybridized time-frequency analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 563-568.
- [ 8 ] CHO Y S, JUNG H K, CHEON C, et al. Adaptive back-projection algorithm based on climb method for microwave imaging [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(3):1-1.
- [ 9 ] 杨洋,姚建铨,王力,等. 基于太赫兹目标散射特性测试系统的设计与应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 975-980.  
YANG Y, YAO J Q, WANG L, et al. Design and application of the test system based on terahertz target scattering characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 975-980.
- [ 10 ] LAHAIE I J. An overview of advanced processing techniques for RCS measurements [C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001: 608-611.
- [ 11 ] 桑建华,张宗斌,王烁. 低 RCS 飞行器表面弱散射源研究[J]. 航空工程进展,2012,3(3):257-262.  
SANG J H, ZHANG Z B, WANG SH. Research on the radar cross section of weak scatterers on stealth vehicle[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012,3(3):257-262.
- [ 12 ] 刘君,马瑶,渠立永. 微波暗室低散射目标 RCS 测量方法[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2013, 14(1):19-24.  
LIU J, MA Y, QU L Y, et al. Research on radar cross section measurement method of low-scattering objects in microwave anechoic chamber [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2013, 14(1): 19-24.
- [ 13 ] 欧乃铭,白明,梁彬,等. 三角板角反射器在 RCS 定标测试中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(2):220-224.  
OU N M, BAI M, LIANG B, et al. Application of the trihedral corner reflector in RCS calibration test [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(2):220-224.
- [ 14 ] LU Z J, CHEN X D, Yao Y, et al. Modeling and simulation of a tri-reflector CATR system at 300GHz[C]. IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), :2015:1-3.
- [ 15 ] AMIN F, MUEED A, XU J D. Implementation and results of an RCS measurement system in CATR [C]. IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE),2012: 262-267.
- [ 16 ] MASSALOUX P, MOGNOT M, MAZE-MERCEUR G, et al. Impact of the target supporting mast in an indoor RCS measurement facility; Computation and measurement[C]. 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP),2015:1-4.
- [ 17 ] 张麟兮,李南京,胡楚锋,等. 雷达目标散射特性测试与成像诊断[M]. 北京:中国宇航出版社, 2009: 100-113.

ZHANG L X, LI N J, HU CH F, et al. Test of radar cross section ( RCS ) and imaging diagnosis [ M ]. Beijing: China Aerospace Press, 2009: 100-113.

## 作者简介



李南京, 分别在 1998 年、2001 年和 2006 年于西北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学副教授, 主要研究方向为微波测量。

E-mail: linanjing76@163.com

**Li Nanjing** received his B. Sc. in 1998, M. Sc. in 2001 and Ph. D. in 2006 all from Northwestern Polytechnical University. Now, he is an associate professor in Northwestern Polytechnical University. His main research interest includes microwave measurement.



徐志浩(通讯作者), 2014 年于西北工业大学获得学士学位, 现为西北工业大学硕士生, 主要研究方向为雷达目标特性。

E-mail: 543735087@qq.com

**Xu Zhihao** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2014 from Northwestern Polytechnical University; now, he is a master candidate in Northwestern Polytechnical University. His main research interest is radar target characteristics.



胡楚锋, 分别在 2004 年、2007 年和 2010 年于西北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为西北工业大学无人机特种技术重点实验室副教授, 主要研究方向为微波测量及雷达成像、微波遥感。

E-mail: huchufeng1982@163.com

**Hu Chufeng** received his B. Sc. in 2004 and M. Sc. in 2007 and Ph. D. in 2010 all from Northwestern Polytechnical University. Now, he is an associate professor in National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Northwestern Polytechnical University. His main research interest includes microwave measurement and radar imaging and microwave remote sensing.