

密级：非密

编号：Fs02012025679

北京环境特性研究所

测试报告
TESTING REPORT

送试单位：山东大杼新材料有限公司
(Customer)
地 址：日照
(Customer Address)
被测件名称：隐身 / 伪装结构一体化发射筒部件
(Target Under Test)
测 试：杨俊 20251106
(Tested by)
编 写：杨丽 20251106 校 对：李作涛 20251106
(Prepared by) (Reviewed by)
审 核：侯颖 20251106
(Checked by)
批 准：冯岩 20251107
(Approved by)

报告单位(专用章)
Issued by (stamp)



本结果仅对该被测件有效，报告未经本实验室批准，不得部分复制。

These results apply only to the tested sample, this report can't be partly copied without authorization.

联络信息(Addr.)：北京 142 信箱 207 分箱
电 话(Tel)：(010) 68387519
传 真(Fax)：(010) 68387207

(P.O.Box 142-207 Beijing, China)
邮政编码(Zip Code)：100854

隐身 / 伪装结构一体化发射筒部件 RCS 测试报告

摘要：本文报告山东大杼新材料有限公司提供的隐身 / 伪装结构一体化发射筒部件 RCS 测试情况。测试工作在北京环境特性研究所准动态散射辐射实验室内进行。测试频段：X、Ku、Ka，测试极化：水平极化、垂直极化。测量时间：2025 年 10 月 20 日。

1 测量方法与测量系统简介

目标 RCS 是依据 GJB 8807A-2024 《室内场雷达目标散射特性测试方法》，采用自由空间反射的相对标定法进行测量。在确定的雷达工作频率、极化方式及功率密度入射条件下，用 RCS 值精确已知的定标体标定，完成对测量系统的频响误差校准。经校准后的系统即可进行 RCS 精密测量。在测量过程中采用了距离选通门等处理技术，以降低背景电平，提高测量精度。具体测量步骤如下：

- (1) 运行 RCS 测试软件；
- (2) 设置系统测试参数；
- (3) 测量定标体获得定标参考体响应；
- (4) 测量空暗室获得背景响应；
- (5) 测量空暗室的背景等效 RCS 值；
- (6) 测量标准验证体，获得验证体的 RCS 值；
- (7) 确认背景符合要求，验证体测试结果正确后，放置送测目标进行 RCS 测量。

测试工作在北京环境特性研究所准动态散射辐射实验室内进行，**该实验室是经中央军委装备发展部认可的军用校准和测试实验室，证书编号：军认可 20230053 号。**测量系统以 ZVA40 矢量网络分析仪为基础构成，主要包括发射机和接收机子系统、低散射支架、目标方位与俯仰角控制子系统和主控微机子系统。系统校准、目标测量和数据采集处理均由计算机控制自动完成。

测试中使用的主要仪器设备如表 1 所列。

表 1 测试使用的主要仪器设备

序号	名称	型号	编号	主要技术指标	计量有效期
1	矢量网络分析仪	ZVA40	W0604011	10MHz~40GHz	2025-11-13
2	功率放大器	BLMA0526-1	W1099052-(2)2	0.5GHz~26.5GHz 输出功率 1W	2025-11-17
3	功率放大器	BLMA2640-1	W1009052-(2)1	26.5GHz~40GHz 输出功率 1W	2025-11-17
4	任意波形发生器	81160A	W0705022	1μHz~300MHz	2025-11-14

2 测量的主要参数

本测试和数据处理使用的软件是室内场 RCS 测量软件和 RCS 测试数据集成处理软件（NFSP）。

(1) 点频测试：

- a) 频率：10GHz、15GHz、35GHz；
- b) 方位角范围：-180° ~+180° ；
- c) 角度间隔：0.2° ；
- d) 俯仰角：0° ；
- e) 横滚角：0° ；
- f) 测试极化：HH、VV；

(2) 静区尺寸：7m（长）×5m（宽）×3.5m（高）；

(3) 目标支撑方式：泡沫支架；

(4) 背景等效 RCS 见表 2 所示；

表2 背景电平统计表

序号	频率(GHz)	极化	背景均值 (dBm ²)
1	10	HH	-58.48
2	10	VV	-55.64
3	15	HH	-48.68
4	15	VV	-46.30
5	35	VV	-47.54
6	35	HH	-48.41

3 测试目标说明

依据用户单位提供的编号为02251020003的隐身 / 伪装结构一体化发射筒部件测试委托书要求，北京环境特性研究所准动态散射辐射实验室对其进行了 RCS 测试。

测试件是 1 件隐身 / 伪装结构一体化发射筒部件（以下简称“发射筒”），发射筒规格尺寸约为：4.15m（长）×1.22m（直径），重量约 573kg。发射筒共 2 个状态，分别是隐身状态和金属状态，测试命名分别为：“SDDZ-001-FST”、“SDDZ-001-FST-JS”，测试状态如图 1-图 4 所示。

姿态定义：发射筒柱面正对雷达波入射方向定义方位角为 0° ，发射筒轴线平行于水平面定义为俯仰角 0° 、横滚角 0° 。

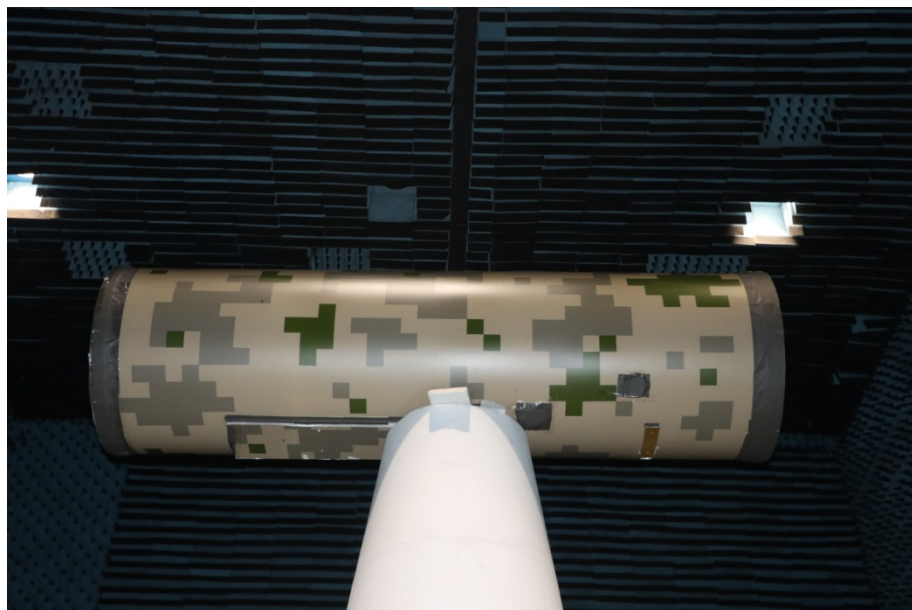


图1 发射筒隐身状态前向

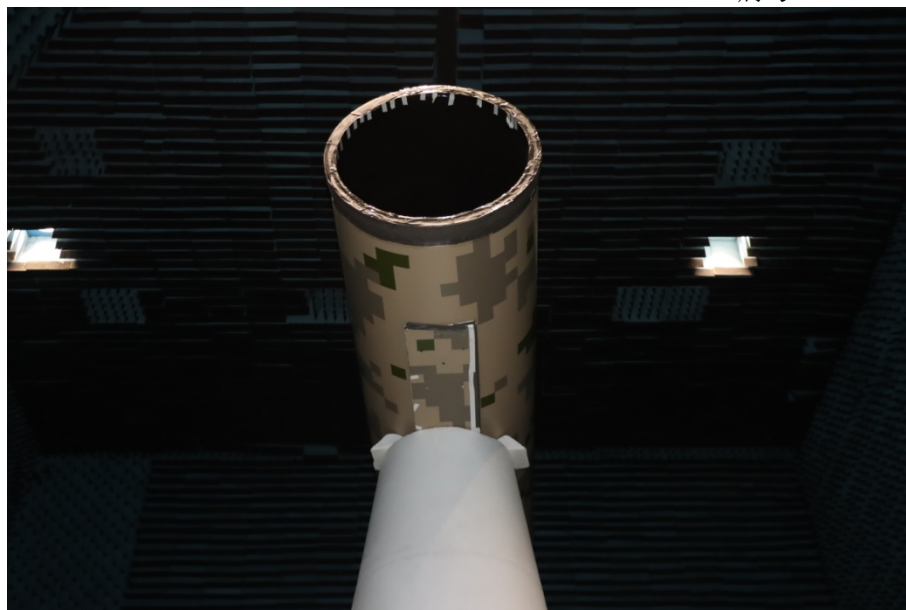


图2 发射筒隐身状态侧向

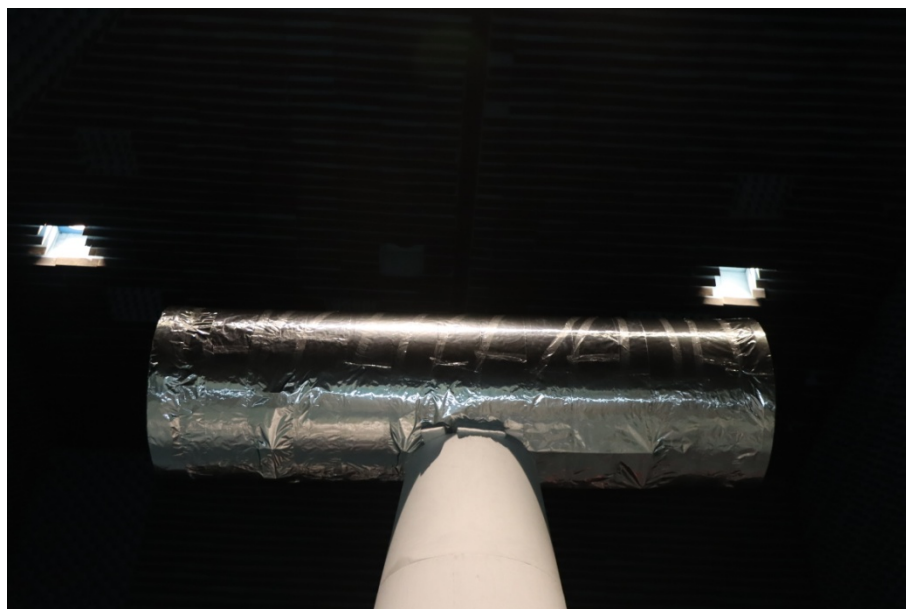


图3 发射筒金属状态前向

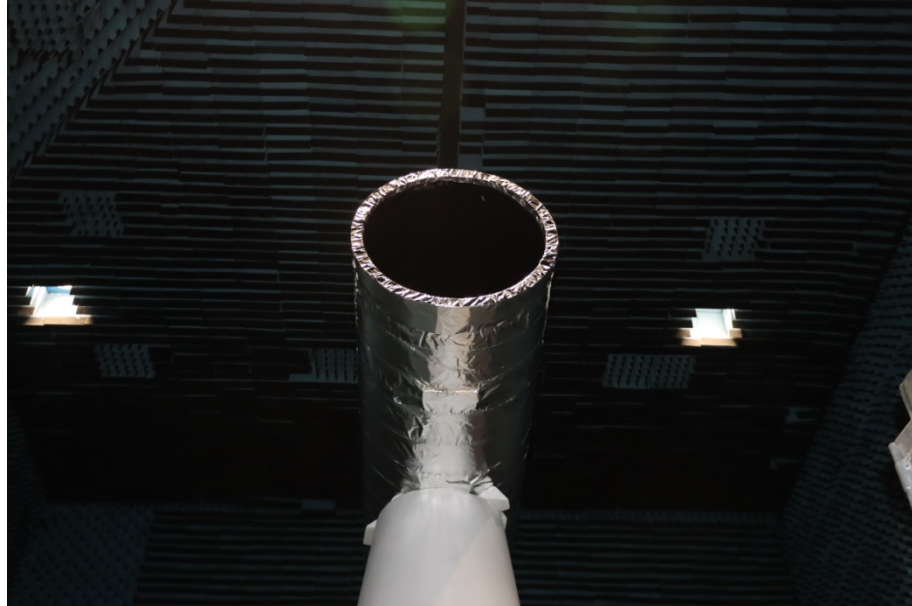


图4 发射筒金属状态侧向

转台上方俯视逆时针方向旋转为方位角正方向。

应客户要求，数据统计保留 2 位小数，按四舍五入法取得，目标状态及均值统计参见表 3。

表3 目标状态表(φ 方位角、 α 俯仰角、 γ 横滚角)

序号	目标名称	频率 (GHz)	均值 (dBm ²)						极化	目标姿态		
			$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 75^\circ$	$\pm 90^\circ$		方位角	俯仰角	横滚角
1	SDDZ-001-FST	10	-2.42	-5.28	-6.94	-8.09	-8.90	-2.54	HH	$\varphi =$ $(-180^\circ \sim +180^\circ)$ $/0.2^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\gamma = 0^\circ$
2		10	-1.85	-4.72	-6.38	-7.57	-8.37	-2.19	VV			
3		15	3.23	0.28	-1.46	-2.68	-3.61	-1.28	HH			
4		15	3.13	0.19	-1.54	-2.76	-3.68	-1.12	VV			
5		35	1.88	-1.03	-2.74	-3.94	-4.80	0.92	HH			
6		35	2.99	0.05	-1.68	-2.90	-3.79	0.90	VV			
7	SDDZ-001-FST-JS	10	11.17	8.24	6.53	5.33	4.45	5.82	HH			
8		10	11.16	8.23	6.50	5.28	4.40	5.87	VV			
9		15	10.86	7.92	6.21	5.02	4.20	4.99	HH			
10		15	11.94	8.99	7.26	6.04	5.20	5.95	VV			
11		35	7.58	4.66	2.95	1.76	0.98	1.78	HH			
12		35	8.21	5.29	3.57	2.38	1.57	2.16	VV			

4 测试结果说明

提供的测试结果包括测量数据曲线图，文本格式的数据文件，共有 12 组点频 RCS 测试数据，12 张点频 RCS 曲线图。

RCS 曲线图为原始测量数据曲线图，图中标注了目标名称、姿态、频率、极化、测试时间等项目。

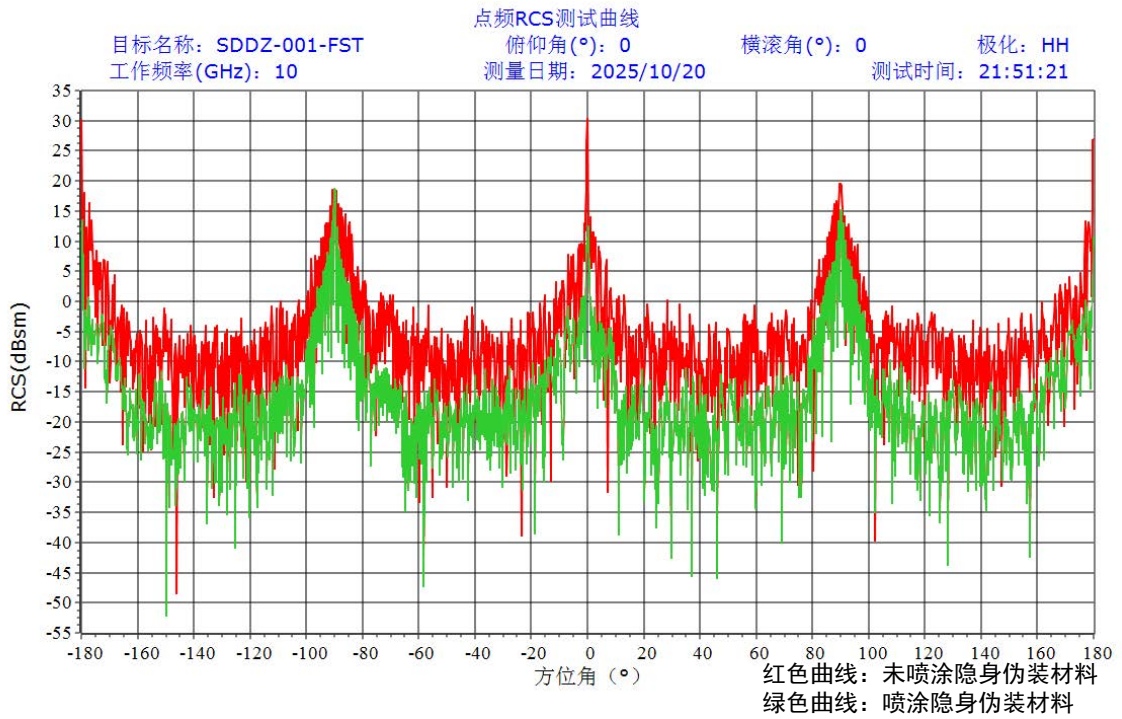
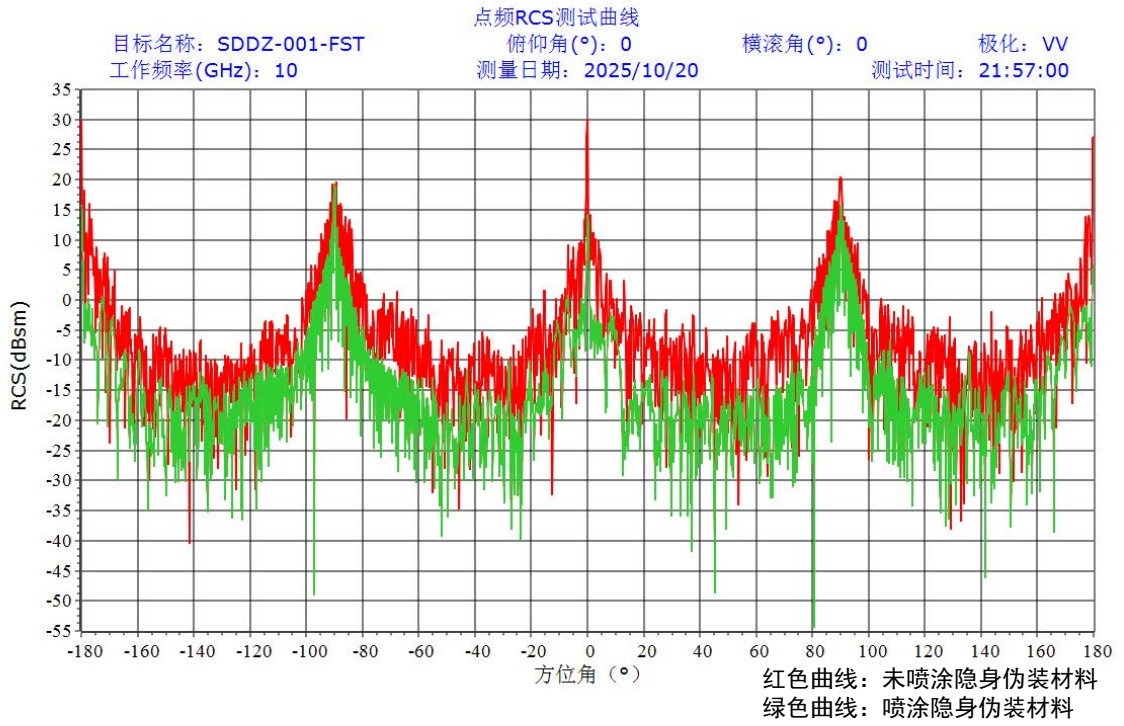
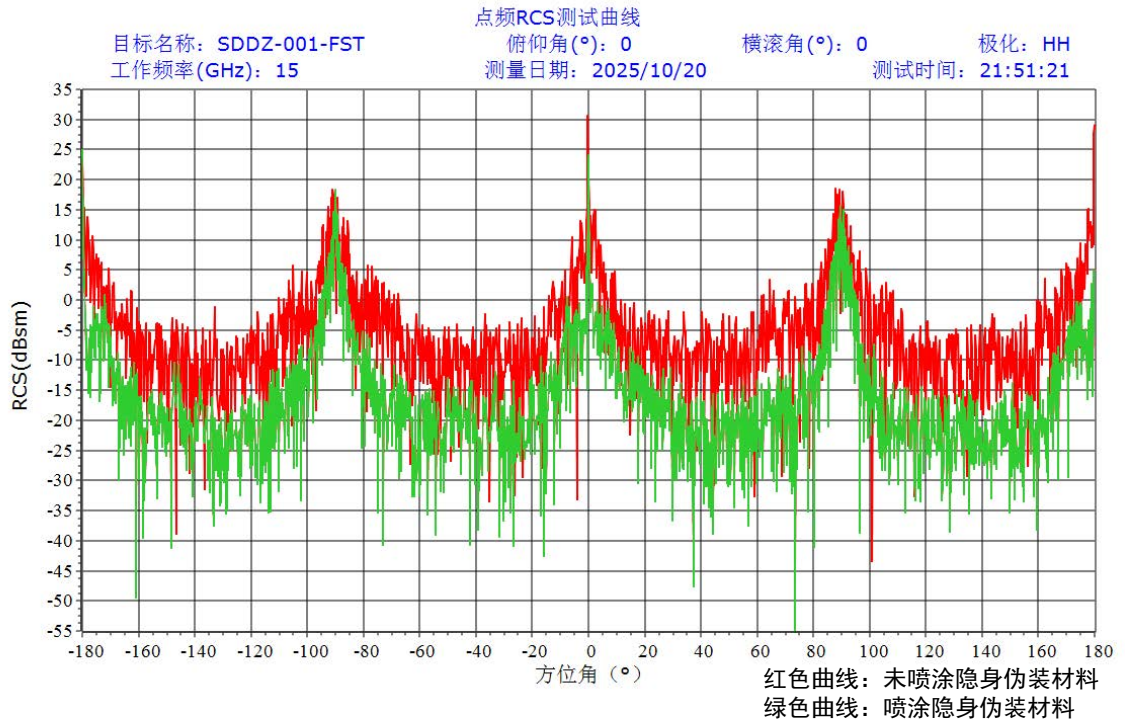


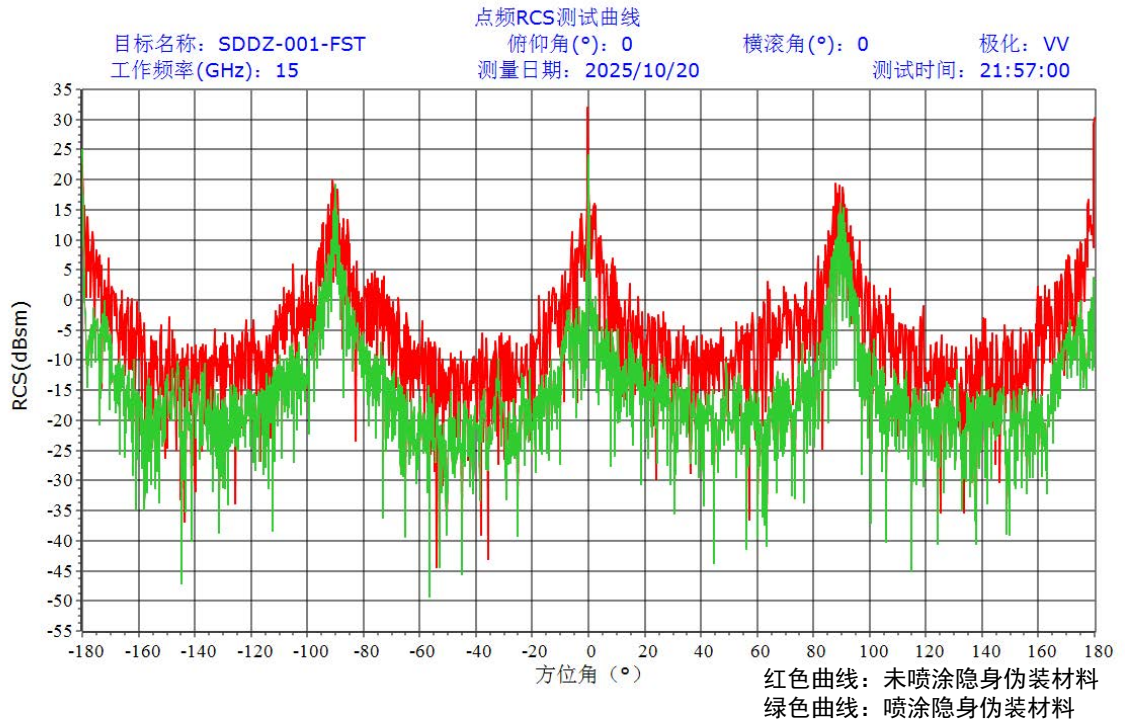
图 5 SDDZ-001-FST 点频 RCS 曲线 (10GHz, HH, 俯仰角 0°, 横滚角 0°)



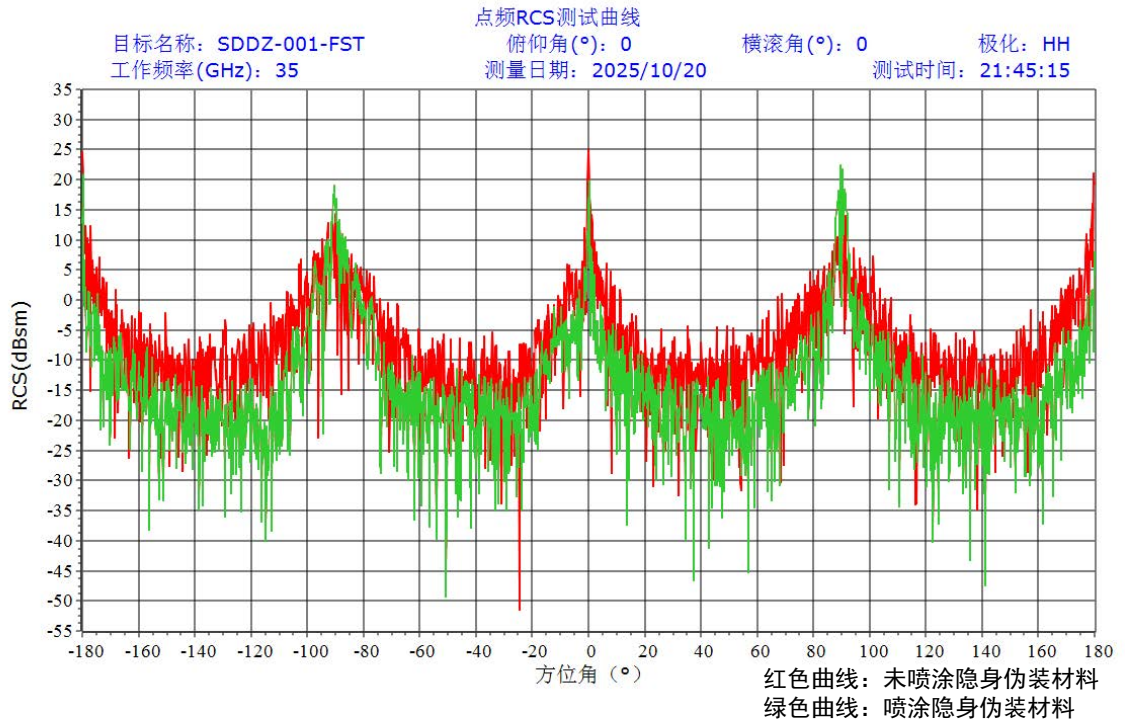
SDDZ-001-FST 点频 RCS 曲线 (10GHz, VV, 俯仰角 0°, 横滚角 0°)



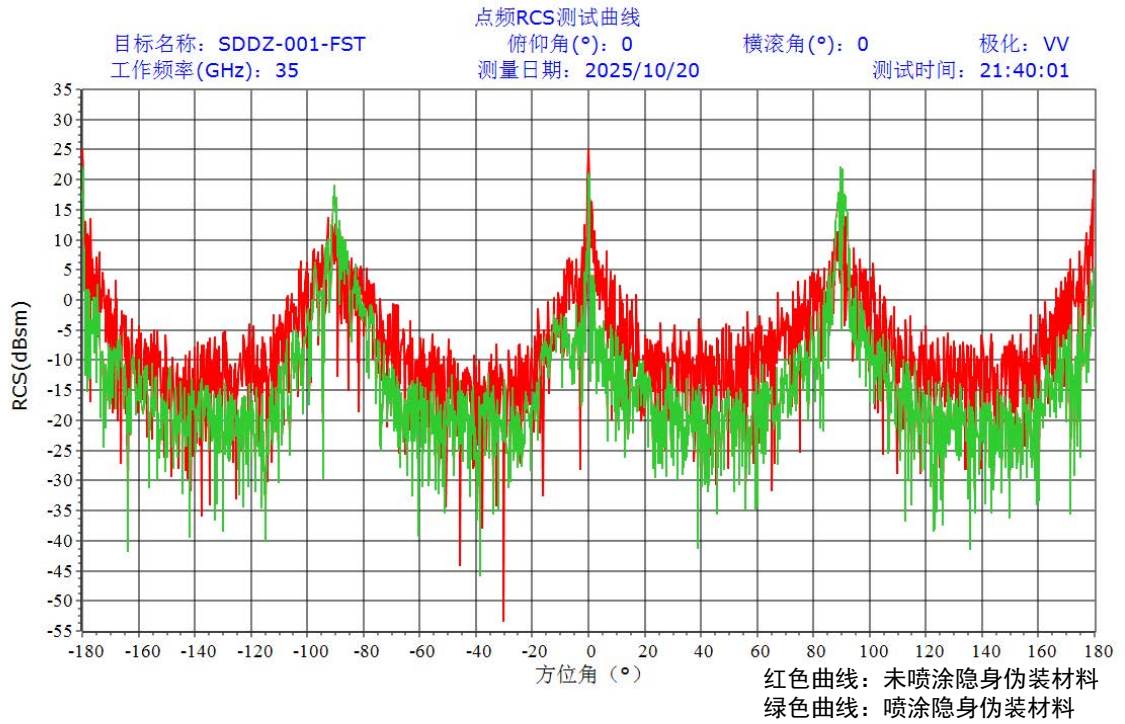
SDDZ-001-FST 点频 RCS 曲线 (15GHz, HH, 俯仰角 0°, 横滚角 0°)



SDDZ-001-FST 点频 RCS 曲线 (15GHz, VV, 俯仰角 0°, 横滚角 0°)



SDDZ-001-FST 点频 RCS 曲线 (35GHz, HH, 俯仰角 0°, 横滚角 0°)



SDDZ-001-FST 点频 RCS 曲线 (35GHz, VV, 俯仰角 0°, 横滚角 0°)

5 测量不确定度分析

依据测试方法及测量系统构成, 参照 IEEE Std 1502-2020 IEEE Recommended Practice for Radar Cross-Section Test Procedures(雷达散射截面面积试验程序的推荐实施规程)和 GJB 3756A-2015 《测量不确定度的表示及评定》进行测量的不确定度分析与评定。一般的 RCS 测量, 影响测量不确定度的因素包括:

- (1) 测试区的幅度照射均匀性
- (2) 背景与目标相互影响
- (3) 系统交叉极化影响
- (4) 信号漂移
- (5) 频率稳定性
- (6) 信号积累
- (7) I/Q 失衡误差
- (8) 近场
- (9) 测试场内的杂波及噪声
- (10) 系统线性度
- (11) 距离
- (12) 目标指向
- (13) 定标体测试

对上述影响不确定度的因素逐一进行分析、确定。

5.1 测试区的幅度照射均匀性

在紧缩场内, 测试区的幅度照射均匀性主要由紧缩场的静区性能指标确定。紧缩场的指标可以用起伏与锥削性能表示, 也可以给出直接测试的峰-峰值误差。

由于起伏的随机性，目标测试与定标测试所产生的不均匀性影响也是随机的。对于多散射中心构成的复杂目标，有些散射中心会被增强，有些会被减弱，所以适合按均匀分布的随机事件确定峰-峰值误差对测试不确定度的影响。

对于给出误差限的随机事件，其标准不确定度按下式计算：

$$u_b = a / k_j$$

其中， a 为测量值可能区间的半宽度值， k_j 为所要求的置信水平对应的置信因子。在不知道随机分布的情况下，可以按均匀分布处理，取 $k_j = \sqrt{3}$ 。

根据准动态散射辐射实验室紧缩场检测报告，在测试频率范围内，被测目标所在区域幅度照射均匀性如下表所示。

表2 准动态散射辐射实验室 5m 静区照射均匀性不确定度

序号	频率范围 (GHz)	幅度锥削值(dB)	幅度起伏(dB)	峰-峰值(dB)	标准不确定度(dB)
1	4~18	0.60	±0.40	0.73	0.21
2	18~40	0.90	±0.50	1.12	0.32

5.2 背景与目标相互影响

目标与背景的相互影响主要是目标散射信号打到支架上再反射回到接收天线的多路径散射。为了消除这种影响，主要是通过加硬件门和软件门的方式，尽可能消除目标区外的多路径影响。对于目标与支架顶面或上部的耦合无法完全消除，并且难以定量估计，这里参照大量实验的估计值，取 0.1dB 作为标准不确定度。

5.3 系统交叉极化影响

交叉极化影响的大小，与紧缩场系统的极化隔离度有关，对于高度去极化目标可能产生的最大测试误差计算方法依照公式：

$$\Delta\sigma = -20\log(1 - 2 \times 10^{-\varepsilon_p/20})$$

依据检测报告，测试误差可按均匀分布考虑，取 $k_j = \sqrt{3}$ ，紧缩场的交叉极化影响造成的标准不确定度如表 5 所列。

表3 交叉极化影响造成不确定度

序号	频率范围 (GHz)	交叉极化分量 (dB)	最大误差 (dB)	标准不确定度 (dB)
1	4~18	-47.70	0.07	0.04
2	18~40	-33.50	0.38	0.22

对于金属球或金属圆柱类定标体，系统交叉极化的影响可以忽略不计。

5.4 信号功率漂移

信号飘移的影响主要考察系统信号功率不稳定对测量产生的影响，室内测量来说，环境的不稳定影响可以忽略不计。为获取信号飘移的影响量，需要用一个大反射值（高于背景散射 40dB 以上）的目标观察回波信号变化。

此不确定度需要在实验通过对立方体目标回波信号的每 30 分钟一次观测得到，共记录 6 个以上的数据。根据测试的结果，该项漂移误差约为 (0~0.1) dB，按均匀分布处理，取各频段的最大漂移值，标准不确定度误差可表示为为测量值的 $1/\sqrt{3}$ 。

表4 信号功率漂移不确定度

序号	频率范围 (GHz)	信号漂移(dB)	标准不确定度(dB)
1	4~18	0.2	0.12
2	18~40	0.2	0.12

5.5 频率稳定性

系统频率不稳定性对 RCS 测量不确定度的影响可以由下式估算：

$$\Delta\sigma = -20\log\left(1 - \frac{\Delta f}{f}\right)$$

在微波暗室内测量时，测量系统的频率稳定度达到 10^{-9} 以上，所以该项影响可以忽略不计。

5.6 信号积累

信号积累是由于测试过程中目标运动产生的误差，对室内场静态测量来说，该项误差也可以忽略不计。

5.7 I-Q 失衡误差

室内场测量使用的幅相接收机具有很好的 I-Q 正交特性，该项失衡误差可以忽略不计。

5.8 近场

近场特性是由于目标与天线间的距离不符合远场条件产生的。对于紧缩场天线系统而言，已通过前期设计达到了模拟远场照射的目的，与理想远场平面波前的差异以测试区幅度照射均匀性指标体现，类比于点源天线的近场效应不具有单独可表征性，其影响已在 5.1 中同时考虑，此处不再单列。

5.9 系统噪声与环境背景

假定 RCS 测量系统有足够的动态范围接收目标及背景回波信号，则目标 RCS 测量的环境背景影响主要由目标回波与背景回波的比值 ε_n 确定，产生的最大差可表示为：

$$\Delta\sigma = -20\log(1 - 10^{-\varepsilon_n/20})$$

因为不同频段，测量系统的背景电平不同，本测试采用 300mm 金属球定标，为 -10dBm² 量级的定标体，其标准不确定度也不相同（按正态分布处理），具体值如下表所示：

表5 对于-10dBm²的目标，背景电平影响的标准不确定度

序号	暗室背景(dBm ²)	半宽度误差(dB)	标准不确定度(dB)
1	-40	0.28	0.14
2	-45	0.16	0.08
3	-50	0.088	0.044

序号	暗室背景(dBm ²)	半宽度误差(dB)	标准不确定度(dB)
4	-55	0.049	0.025
5	<-60	< 0.02	<0.01

5.10 非线性

实验室采用 ZVA40 矢量网络分析仪作为信号接收机，该设备的线性度指标为 0.1dB，加入前置放大器的影响，实测为 0.2dB，所以非线性的标准不确定度可表示为 $0.2/\sqrt{3}=0.12\text{dB}$ 。

5.11 距离

在室内测量时，中心距离是固定的，目标所在测试区域内，距离引起的照射不均匀性已经在紧缩场静区性能指标中体现，所以该项产生的不确定度可以忽略，对定标球来说，误差为零。

5.12 目标指向

目标的指向误差主要与目标类型和转台定位精度相关，本次测试目标 $-180^\circ\sim+180^\circ$ 数据，根据目标侧向特征峰值调整方位误差，对本次产生的不确定度可以忽略；由于使用标准球定标，所以定标时的指向误差为零。

5.13 定标体测量的不确定度

目标 RCS 的测量不确定度需要考虑定标测量的不确定度影响，其不确定度也可以从上述 12 个因素进行分析，背景噪声不确定度都按 0.1dB 计算。

把上述每个单项的不确定度综合分析，得到的合成不确定度如下：

$$u = \sqrt{\sum_i u_i^2}$$

表6 定标体（-10dBm²量级）的测量不确定度

序号	不确定度分量	不确定度值（dB）	
		（4~18）GHz	（18~40）GHz
1	照射不均匀性	可忽略	可忽略
2	背景耦合	0.10	0.10
3	交叉极化	可忽略	可忽略
4	信号漂移	可忽略	可忽略
5	频率稳定性	可忽略	可忽略
6	信号累积	-	-
7	I/Q 失衡	-	-
8	近场	-	-
9	系统噪声与环境背景	0.10	0.10
10	非线性	可忽略	可忽略
11	距离	0	0
12	目标指向	0	0
13	定标球（误差 <0.1mm）	0.01	0.01
合成标准不确定度 u		0.13	0.13

5.14 目标测量不确定度

目标 RCS 测试过程中，背景噪声是一个变化的量，其它不确定度来源基本处于相对稳定的状态或者变化很小（由系统确定的不确定度分量相对固定）。而针对不同的目标 RCS 量级，背景噪声影响的程度也不同，不考虑背景电平影响时，则此次测量的不确定度为：

表7 目标 RCS 测量不确定度来源及合成（不含背景影响）

序号	不确定度分量	不确定度值（dB）	
		（4~18）GHz	（18~40）GHz
1	照射不均匀性	0.21	0.32
2	背景耦合	0.10	0.10

序号	不确定度分量	不确定度值 (dB)	
		(4~18) GHz	(18~40) GHz
3	交叉极化	0.04	0.22
4	信号漂移	0.12	0.12
5	频率稳定性	可忽略	可忽略
6	信号累积	可忽略	可忽略
7	I/Q 失衡	可忽略	可忽略
8	近场	-	-
9	非线性	0.10	0.10
10	系统噪声与环境背景	此表中不考虑	此表中不考虑
11	距离	可忽略	可忽略
12	目标指向	可忽略	可忽略
13	定标测量	0.13	0.13
合成标准不确定度 u		0.31	0.44
扩展不确定度 $U = ku$ ($k=2$, 置信度 95%)		0.62	0.88

考虑背景电平的影响时，目标 RCS 与背景散射的比值与测试不确定度的关系如下表所示。

表8 准动态实验室随目标与背景散射比值变化的测量不确定度 (dB)

目标 RCS 高于背景散射(dB)	扩展不确定度值 ($k=2$, 置信度 95%)	
	(4~18) GHz	(18~40) GHz
≥ 40	0.62	0.88
35	0.64	0.91
30	0.68	0.94
25	0.79	1.02
20	1.11	1.28
15	1.81	1.92
10	3.36	3.42
5	7.21	7.24

以下空白