

一种适于缝隙等表面缺陷类目标的评估方法

赵京城^① 付鑫如^① 杨涛^{*①} 高旭^② 艾俊强^②

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

^②(航空工业第一飞机设计研究院 西安 710089)

摘要: 缝隙等表面缺陷类目标对飞行器的隐身性能具有重要影响。根据缝隙等表面缺陷类目标的散射机理, 该文提出一种载体背景对消方法, 用于评估表面缺陷类目标散射。该方法将载体作为目标背景的一部分, 通过矢量场相减的方式对消掉载体的自身散射影响, 特别是载体强散射角域的散射影响, 从而获得了全角域范围内表面缺陷类目标的散射特性数据, 解决了使用常规方法目标受载体影响无法获得完整散射特性的问题。通过数值计算和实验测量的结果对比表明: 该方法可以对缺陷类目标的电磁散射特性进行有效评估。对消后载体散射得到了极大程度的降低, 有效提高了缺陷类目标的计算或测量精度; 同时由于排除载体自身散射的影响, 避免了对载体尺寸、超低散射特性的要求, 有效降低了载体的加工设计成本。

关键词: 雷达散射截面; 矢量对消; 电磁缺陷; 数值计算; 实验测量

中图分类号: V218

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0302-07

DOI: 10.11999/JEIT180378

Assessment Method for Gaps and Other Surface Defects

ZHAO Jingcheng^① FU Xinru^① YANG Tao^① GAO Xu^② AI Junqiang^②

^①(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

^②(Avic The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Surface defects such as gaps have a significant impact on the stealth performance of the aircraft. According to the scattering mechanism of surface defects such as gaps, a method of evaluating the surface defect targets based on vector cancellation is proposed. The carrier is regarded as the target background and is subtracted the scattering effect of the carrier, especially the strong scattering angle of the carrier, and then the scattering characteristic data of the surface defect class target in the whole angle range are obtained, which solves the problem that the complete scattering characteristic can not be obtained using the conventional method. The comparison between the numerical calculation and the experimental results shows that the vector cancellation method can effectively evaluate the electromagnetic scattering characteristics of defective targets. After vector cancellation, the scattering of the carrier is greatly reduced, and the calculation or measurement accuracy of the defective target is effectively improved. At the same time, due to reducing the influence of the scattering of the carrier itself, this method avoids the requirement of the carrier size and ultra-low scattering characteristics, and reduces effectively the processing cost of the carrier.

Key words: Radar Cross Section (RCS); Vector cancellation; Electromagnetic defect; Numerical calculation; Experimental measurement

1 引言

随着雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS) 减缩技术的不断发展, 缝隙、台阶等弱量级散射源的散射贡献日益突出^[1,2], 已成为高隐身飞行器设计中的重点研究对象, 与此对应的缺陷类目标的 RCS 评估方法是关键点。

表面缺陷类目标 RCS 的评估必须依托于载体进行, 包括数值计算和实验测量两种方法^[3-7]。数值计算法包括高频算法^[8,9](物理光学法、几何光学法等)和矩量法^[10-12]等。由于缺陷类目标具有几何上的不连续性, 因此高频计算方法不再适用^[9]。缝隙、台阶等散射源电磁散射较弱, 所以计算模型选取的重点是要尽可能降低载体自身散射和边缘电磁散射的影响, 因此要求载体尺寸相对较大, 此时矩量法受到计算时间和内存的限制^[12]。

收稿日期: 2018-04-25; 改回日期: 2018-11-13; 网络出版: 2018-11-19

*通信作者: 杨涛 buaaviptao@163.com

实验测量法通常选用平板、水滴形或杏仁形、钻石体载体作为缺陷类目标的依托背景^[1]。它们在一定条件下具有低散射特性，例如：在一定频率下，垂直放置的平板在 $30^\circ\sim 90^\circ$ 方位角内的RCS均值可达 -35 dBsm，水滴形载体和杏仁体在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 方位角内的RCS均值可达 -40 dBsm^[13]。在载体RCS值达到 -35 dBsm的情况下，若缝隙的RCS值为 -15 dBsm，则测量不确定度为 ± 1 dB，若缝隙的RCS值为 -25 dBsm，则测量不确定度为 ± 3 dB^[14]。在高频测量条件下，载体的RCS一般随着频率的降低而增加，从而导致目标测量的不确定度增加。低频测量条件则需要较大尺寸的载体，目标测量会受到电尺寸的约束。同时，特殊形状的超低散射载体存在制作时间过长、成本过高的问题，现有技术的实际应用受到一定限制。

以上方法受到限制的根本原因在于没有消除载体对缺陷类目标散射结果的影响。为了得到目标的完整散射特性，本文提出了一种改进的RCS评估方法。该方法将载体作为背景看待，通过矢量对消的方式对消掉载体自身的散射影响。此方法可涵盖但不限于现有的通过低散射、超低散射载体辅助的测量与计算。通过数值计算与实验测量的结果对比充分验证了该方法的有效性，避免了对超低散射载体的依赖。在实际评估时无需过度考虑载体散射影响，通过截取小面积模型便可获得缺陷目标的完整散射特性。

2 表面缺陷类目标评估方法原理

2.1 表面缺陷类目标的散射机理

缝隙、台阶等表面缺陷类目标对隐身飞行器的散射影响主要分为两个方面^[2]：一方面表现为缺陷类目标对入射雷达波的反射、绕射等的直接响应；另一方面当雷达波以掠入射角照射缺陷类目标时，飞行器表面会产生爬行波，当其传播路径上存在缺陷类目标时，在缺陷边界会产生2次散射场。

在理想计算中，可以假定载体尺寸为无限大，并以此来排除载体对缺陷类目标的影响。但是实际建模时，载体的尺寸是有限的，并且受到计算资源的限制，载体尺寸不能过大，载体对缺陷类目标的计算结果的影响难以去除。在实验测量时，采用的载体通常为低散射的平板、杏仁体等，测量结果也会受到载体散射的影响，并且无法模拟真实的缺陷载体状态。

此时采用常规方法获得的缺陷类目标的总体散射可以视为3个部分^[15-17]：(1)缺陷类目标自身的散射；(2)载体自身的散射；(3)载体边缘与目标之间的耦合，三者满足叠加原理，即

$$T(f) = T_G(f) + T_{ZT}(f) + T_{EC}(f) \quad (1)$$

式中， $T(f)$ 为目标的总回波； $T_G(f)$ ， $T_{ZT}(f)$ 和 $T_{EC}(f)$ 分别表示缺陷类目标的自身回波、载体本身回波以及载体与目标之间的耦合回波。

由于载体边缘与目标之间的耦合属于一种超低散射源^[13,18]，并且真实飞行器表面缺陷目标与载体之间也存在耦合作用，故研究工作的重点在于降低载体自身散射的影响。

2.2 载体背景对消方法

本文提出的载体背景对消方法是将载体散射作为目标的背景，通过矢量场相减的方式对消掉载体自身散射，其公式为

$$\mathbf{E}_{\text{far},\theta} = \mathbf{E}_\theta - \mathbf{E}_{\theta 1} \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_{\text{far},\varphi} = \mathbf{E}_\varphi - \mathbf{E}_{\varphi 1} \quad (3)$$

式中， \mathbf{E}_θ ， \mathbf{E}_φ 表示含有缺陷类目标载体的电场分量； $\mathbf{E}_{\theta 1}$ ， $\mathbf{E}_{\varphi 1}$ 表示不含缺陷类目标的载体电场分量。

通过两组方程矢量相减，得到不包含载体的散射分量 $\mathbf{E}_{\text{far},\theta}$ 和 $\mathbf{E}_{\text{far},\varphi}$ 。使用RCS计算公式^[19]得到缺陷类目标的RCS散射值。

$$\begin{aligned} \sigma &= \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi \frac{|R\mathbf{E}_\theta|^2 + |R\mathbf{E}_\varphi|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \\ &= 4\pi \frac{|\mathbf{E}_{\text{far},\theta}|^2 + |\mathbf{E}_{\text{far},\varphi}|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中， σ 表示雷达散射截面， \mathbf{E}_i 表示入射雷达波在目标处的电磁场强度， R 表示雷达到目标的距离。通过式(4)可以看出，载体背景对消方法不受极化方式的限制。

3 缺陷类目标仿真建模与方法验证

3.1 数值计算建模

首先，选择计算模型。模拟飞机上真实缝隙状态截取一小部分建立图1所示的计算模型，该模型在掠入射角度下具有低散射特性^[20]。设置金属板横向距离为200 mm，宽度为100 mm，高度为38.5 mm。缝隙为穿透型缝隙，横向距离150 mm，宽度为5 mm。

其次，选择入射角度。如图2所示，电磁波平行于缝隙板转动入射，角度范围为 $-90^\circ\sim 90^\circ$ ，角

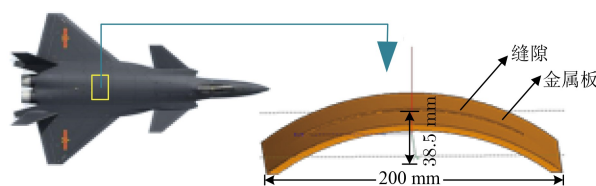


图1 单缝隙计算模型

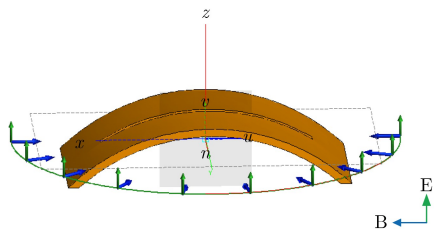


图2 入射角度示意图

度间隔为 1° ，点频计算频率设置为10 GHz。计算结果如图3所示，曲线1是缝隙板随入射角度变化的RCS计算曲线，曲线2是光滑金属板随角度变化的RCS计算曲线。

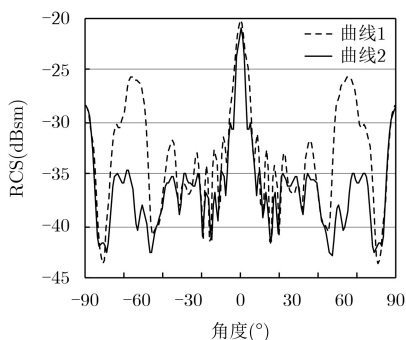


图3 缝隙板和光滑板RCS随角度变化曲线

由图3可以看出：在小角度范围内缝隙板和光滑金属板散射接近，此时缝隙散射淹没在载体散射之中，采用常规方法无法对缝隙散射进行有效评估。由此选择1维像计算角度为 22° ，在此角度下成像更能说明载体背景对消方法的有效性和必要性。定义电磁波入射方向与地面平行时为水平极化(HH)，电磁波入射方向与地面垂直时为垂直极化(VV)，本文选择HH极化方式，设置计算频率为8~18 GHz。考虑2维像横向纵向分辨率一致，选择2维成像中心角度为 22° ，孔径角 44° ，对应的角度范围为 $0^\circ \sim 44^\circ$ 。此外，在电场入射角度为 60° 时缝隙板和光板散射差别较大，为验证该角度缝隙板散射较强是否由缝隙产生，本文又以 60° 为中心角度，计算对消前后缝隙的2维像。

最后，给出具体计算步骤如下：

步骤1 使用快速多极子算法(MLFMA)，按照常规方式在FEKO软件中计算含缝隙金属板的回波电场数据 $T(f)$ ；

步骤2 同上述方法，计算光滑金属板的回波电场数据 $T_{ZT}(f)$ ；

步骤3 将上述两组数据对消，得到缝隙的回波点成数据为

$$T_G(f) = T(f) - T_{ZT}(f) \quad (5)$$

步骤4 对对消后的数据进行1维和2维成像。

3.2 数值方法验证

图4给出了HH极化下，当入射角度为 22° 时，使用常规计算方法及载体背景对消方法缝隙的1维成像结果。曲线3是常规测量方法获得的含缝隙载体散射的1维RCS曲线，曲线4是光板的1维RCS曲线，曲线5是采用载体背景对消方法后获得的缝隙RCS曲线。由图4可以看出，缝隙板1维像的最大值和次大值与光板基本吻合，相应位置距离差正好对应于金属板载体的对角线长度在入射方向上的投影。对消后得到缝隙1维像上最大值和次大值之间的距离差为58 mm，与缝隙沿入射方向上的投影长度相对应。由此证明可以通过载体背景对消的方式计算完整的缝隙散射特性。

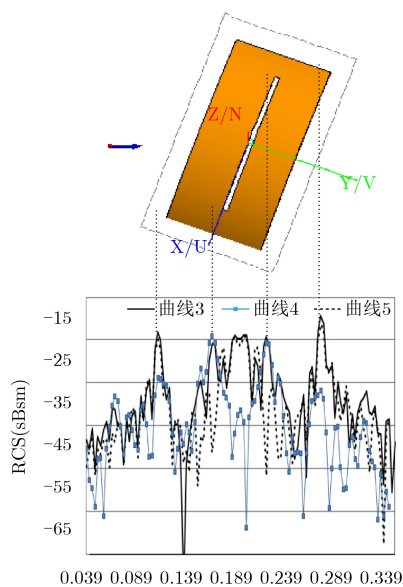
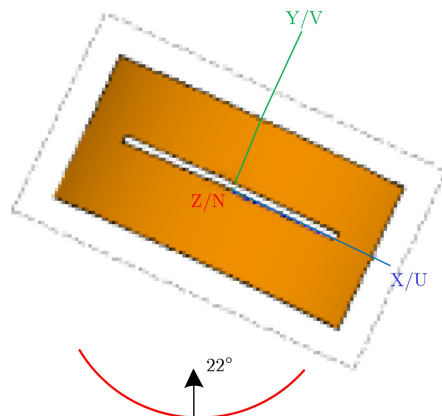


图4 数值计算1维成像图

图5给出了HH极化方式下，入射中心角度为 22° 时缝隙板的俯视图。图6是两种方法获得的缝隙2维成像图，图6(a)是常规计算方法，图6(b)是采用载体背景对消方法。其中，S1~S3对应于缝隙板

图5 22° 下缝隙板的俯视图

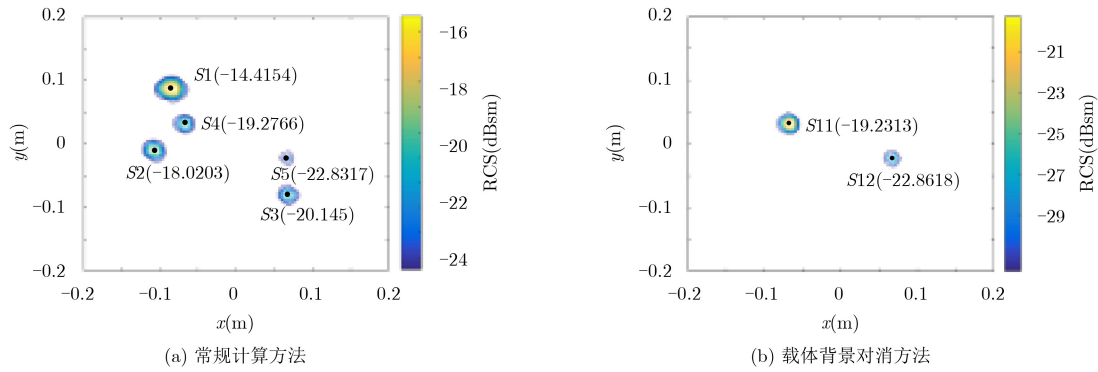


图6 两种方法获得的缝隙2维成像图

3个顶角区域的散射峰值点， $S4 \sim S5$ ， $S11 \sim S12$ 分表示缝隙散射较强区域的散射峰值点。从图中可以看出，采用载体背景对消方法后，载体电平可降低至 -27 dBsm以下，缝隙散射从载体散射中得到分离，进而获得完整的缝隙散射特性。

针对入射角度为 60° 时缝隙板和光板散射差别较大的问题，计算了HH极化方式下，入射中心角度为 60° 时缝隙板和光板的2维像。图7是用不同方

法获得的2维成像图。图7(a)是使用常规计算方法获得的缝隙板2维成像图，图7(b)是光板的2维成像图，图7(c)是采用载体背景对消方法获得的缝隙2维成像图。可以看出，当入射角度较大时，光板散射较弱，在 -24 dBsm以下，此时缝隙散射较强，可达 -9 dBsm，散射最强点对应缝隙的一端点。由此可知RCS曲线上方位角 60° 处的峰值确实是由缝隙产生。

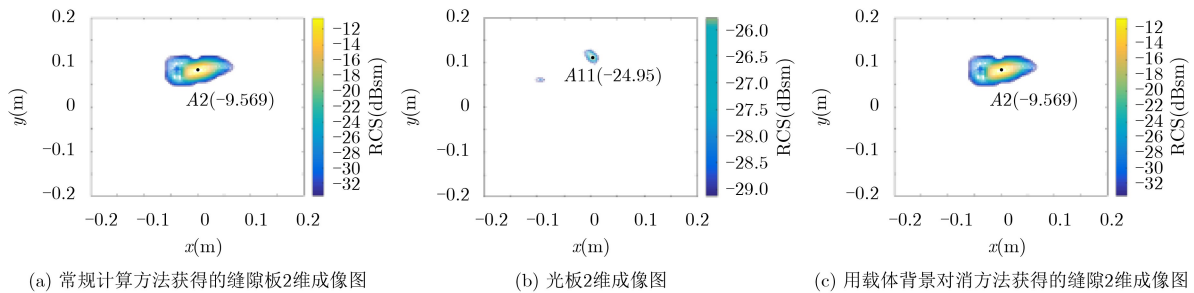


图7 不同方法获得的2维成像图

图8给出了HH极化方式下，点频为5 GHz计算得到的缝隙RCS曲线图。曲线6是采用常规方法计算得到的缝隙含载体的RCS曲线，曲线7是采用载体对消方法计算得到的缝隙RCS曲线。从图中可以看出，在小角度内由于缝隙散射较弱，如果不采取载体对消技术对消掉载体自身散射，则缝隙的散射将全部淹没在载体散射之中，无法获得缝隙的散射

特性，因此载体对消技术尤其是在缝隙小角度散射计算中具有重要意义。

4 缺陷类目标实测模型与方法验证

4.1 实验测量模型

在紧缩场^[21]中进行目标RCS测量，如图9所示，被测目标通过低散射泡沫支架或低散射金属支架置于静区中。

实测目标包括两个模型：(1)含有4 mm宽锯齿缝隙的圆锥体，模型示意图如图10所示，实物图如图11所示；(2)同图10和图11的无缝隙圆锥体。

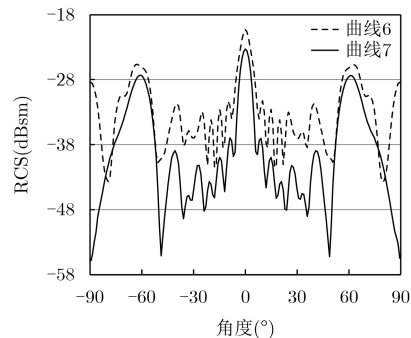


图8 常规方法及对消法获得的缝隙RCS曲线

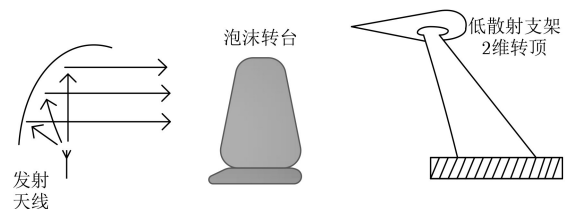


图9 紧缩场中目标RCS测量示意图

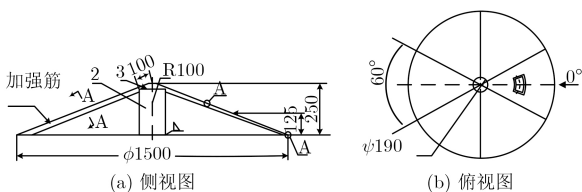


图10 圆锥载体上有锯齿缝的示意图

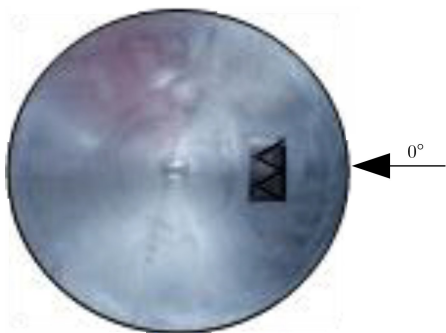


图11 圆锥载体上有锯齿缝的实物图

规定 0° 入射角对应锯齿缝隙的中心位置,入射角度示意图如图10(b)和图11所示。测量采用HH极化和VV极化两种方式,转台转动角度范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。点频测量频率为10 GHz,2维成像频段为8~12 GHz,方位角 0° ,成像孔径角 20° 。定标选用直径为400 mm的金属球,光学区RCS为 -10 dBsm。首先通过测试分别得到含有缝隙和不含缝隙的圆锥载体的回波电场数据,然后通过矢量对消方法获得缝隙的散射特性。

测量步骤为:

步骤1 使用常规方法测量暗室背景杂波信号 $B(f)$;

步骤2 将金属球放置于目标支架上进行定标测量,获得标准体的回波信号 $S_C(f)$;

步骤3 在支架上放置不含缝隙的光滑圆锥载体,测得载体的回波信号 $T_{ZT}(f)$,与暗室背景杂波信号共同构成目标背景信号如式(6)

$$B_T(f) = B(f) + T_{ZT}(f) \quad (6)$$

步骤4 保持测试姿态角不变,将光滑载体更换为含有缝隙的圆锥载体,测量缺陷类目标的总回波信号 $T(f)$,其表达式为

$$T(f) = T_I(f) + B_T(f) \quad (7)$$

步骤5 进行定标处理,通过载体背景对消后,得到缝隙的散射函数

$$\begin{aligned} \sigma_T(f) &= \frac{[S_T(f) - B(f)]^2}{[S_C(f) - B(f)]^2} \cdot \sigma_C(f) \\ &= \frac{[T_C(f) - T_{EC}(f)]^2}{C^2(f)} \cdot \sigma_C(f) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\sigma_T(f)$ 是目标散射函数, $\sigma_C(f)$ 是定标体的散

射函数,由此可以排除载体的干扰,获得缝隙完整散射数据。

4.2 实验方法验证

模型加工完成后,在紧缩场微波暗室中进行散射测量,实验场景如图12所示。



图12 紧缩场微波暗室中的缝隙模型图

图13分别是VV极化方式下,采用常规方法(a)和载体背景对消法(b)获得的锯齿缝隙的2维成像图。从图13(a)可以看出,除了锯齿缝隙所在区域散射较强外,在载体的前后缘都有明显的较强散射。从图13(b)可以看出,经过对消,载体前后缘的散射都获得了较大程度的降低,锯齿缝区域是主要散射源。

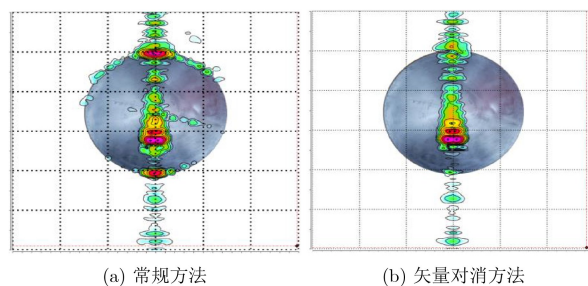


图13 两种方法获得的锯齿缝隙2维成像图

图14给出了VV极化方式下,常规测量方法及载体背景对消方法锯齿缝的RCS测试曲线,曲线8是常规测量方法获得的锯齿缝含载体散射的RCS曲线,曲线9是采用载体背景对消方法后获得的锯齿缝RCS曲线。从图中可以看出,由于锯齿缝散射较弱,如果不采取本文方法进行载体背景对消,则

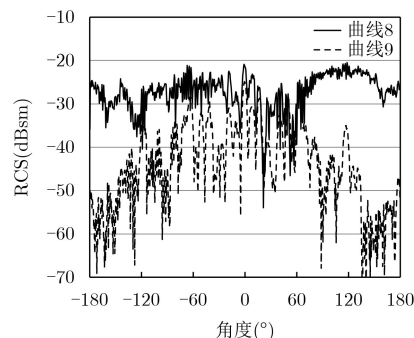


图14 对消前后锯齿缝的RCS测试曲线

锯齿缝的散射都淹没在载体散射之中，无法分析锯齿缝的散射特性。HH极化方式的测试结果趋势相同。

4.3 方法精度分析

图15给出了常规测量方法及载体背景对消方法载体本身的RCS测试曲线。曲线10是常规测量方法获得的载体RCS曲线，曲线11是载体两次测量相互抵消获得的RCS曲线，相当于采用载体背景对消方法情况下的等效背景电平。从图15中可以看出，对消效果可达20~30 dB，对消后，大部分角度上的背景电平在-50 dBsm以下，小部分角度范围上的背景电平在-40 dBsm左右，这与转台的转动稳定性有关。

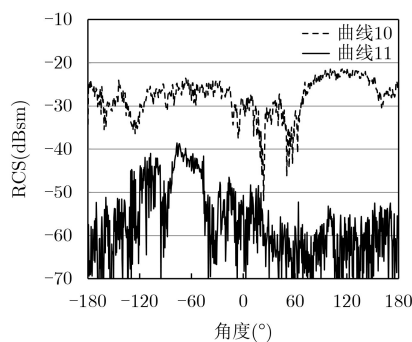


图 15 对消前后载体自身的RCS测试曲线

图16给出了载体背景对消方法锯齿缝与背景电平RCS测试曲线，曲线12是采用载体背景对消方法后获得的锯齿缝RCS曲线，曲线13是采用载体背景对消方法后的背景RCS曲线。从图16中可以看出，在关心的锯齿缝角度范围内，锯齿缝散射比背景电平高20 dB左右，由此引起的不确定度为 ± 1 dB，可以满足分析研究需求。

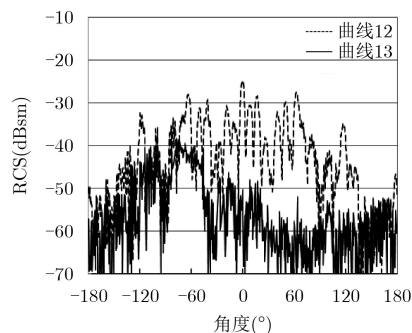


图 16 对消后锯齿缝及背景电平的RCS测试曲线

5 结束语

由上述分析可以得出以下结论：

(1) 计算和实验测量的验证表明：基于矢量对消的评估方法在用于表面缺陷类目标时，能正确有效地获得缺陷目标的全角域散射特性。

(2) 计算结果的对比表明：对消后载体散射得到有效降低，尤其是在小角度范围内，采用载体对消方法有效地避免了目标散射完全淹没于载体散射中的现象，此时缝隙区域是主体散射源。

(3) 通过实验测量结果的对比表明：采用载体对消方法可以将大部分角度上的背景电平降低至-50 dBsm以下，小部分角度由于转台稳定性的干扰也可降低至-40 dBsm，对消效果达20 dB以上，此时缺陷类目标成为主要散射源，背景散射引起的不确定度满足研究需求。

(4) 载体对消方法的应用也存在限制条件。载体对消用于实验测量，因为实际测量总是受一些干扰因素影响，所以实际对消效果往往在30 dB左右，最多对消到系统噪声量级。所以，根据背景对目标RCS的影响曲线，要测量-30 dBsm量级的目标，要求不确定度 $< \pm 1$ dB，则对消后的残余背景电平应 < -50 dBsm，这就要求载体本身散射 < -20 dBsm。因此，在用载体对消方法进行载体设计时要考虑此要求。

本文在前人研究基础上应用载体对消的方法有效消除了载体自身散射对缝隙散射的影响，但是未详细研究缝隙和载体之间的耦合，降低缝隙和载体之间耦合的可能方法包括：通过特殊设计降低载体边缘散射、应用吸波涂料抑制爬行波等，但是这些研究内容相对比较复杂，尚有待后续进一步研究。

参考文献

- [1] 柴建忠, 高旭, 刘学强, 等. 几种载体表面缝隙对雷达目标特性的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(4): 567-572. doi: 10.16356/j.1005-2615.2014.04.022.
CHAI Jianzhong, GAO Xu, LIU Xueqiang, et al. Effect of gaps in different surfaces on radar target characteristic[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(4): 567-572. doi: 10.16356/j.1005-2615.2014.04.022.
- [2] 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. doi: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2012.03.008.
SANG Jianhua, ZHANG Zongbin, and WANG Shuo. Research on the radar cross section of weak scatters on stealth vehicle[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2012, 3(3): 257-262. doi: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2012.03.008.
- [3] 何国瑜, 卢才成, 洪家才, 等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 19-20.
HE Guoyu, LU Caicheng, HONG Jiakai, et al. *The Computation and Test for RCS*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 19-20.
- [4] 刘战合, 黄沛霖, 高旭. 表面不连续特征双站散射特性的试验研究[J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2322-2327. doi: 10.3321/j.issn:1000-6893.2009.12.013.

- LIU Zhanhe, HUANG Peilin, and GAO Xu. Experimental research on biostatic scattering characteristics of surface discontinuous character[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(12): 2322–2327. doi: [10.3321/j.issn:1000-6893.2009.12.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6893.2009.12.013).
- [5] 刘战合, 蒋胜矩, 姬金祖, 等. 基于MLFMA的表面台阶多频散射特性[J]. *探测与控制学报*, 2009, 31(z1): 20–24. doi: [10.3969/j.issn.1008-1194.2009.z1.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1194.2009.z1.007).
- LIU Zhanhe, JIANG Shengju, JI Jinzu, *et al.* Multi-frequencies scattering characteristic of steps in surface based on MLFMA[J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(z1): 20–24. doi: [10.3969/j.issn.1008-1194.2009.z1.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1194.2009.z1.007).
- [6] 袁俊超, 张小宽, 孙铭, 等. 基于FEKO隐身飞机目标动态角闪烁特性实时仿真[J]. *现代雷达*, 2017, 39(8): 58–62. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.013](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.013).
- YUAN Junchao, ZHANG Xiaokuan, SUN Ming, *et al.* Analysis of stealth aircraft target's dynamic angular glint characteristics based on FEKO[J]. *Modern Radar*, 2017, 39(8): 58–62. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.013](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.013).
- [7] 赵京城, 杨涛, 付鑫如, 等. 基于载体对消方法的缝隙小角域散射特性研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(7): 1554–1561. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0498](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0498).
- ZHAO Jingcheng, YANG Tao, FU Xinru, *et al.* Research on small angle domain scattering characteristics based on carrier cancellation method[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(7): 1554–1561. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0498](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0498).
- [8] WU Taitson. High frequency scattering[J]. *Physics Review Journals*, 1956, 104(5): 1201–1212.
- [9] LAGER D L and LYTTLE R J. Determining a subsurface electromagnetic profile from high-frequency measurements by applying reconstruction-technique algorithms[J]. *Radio Science*, 2016, 12(2): 249–260.
- [10] HARRING Roger F. *Field Computation by Moment Methods*[M]. London, England: Macmillan, 1968: 120–148.
- [11] 张文, 胡俊, 张婕玲, 等. 一种新型的矩量法并行实现方法[J]. *微波学报*, 2017, 33(S1): 26–29.
- ZHANG Wen, HU Jun, ZHANG Jieliang, *et al.* A new parallel realization for MOM[J]. *Journal of Microwave*, 2017, 33(S1): 26–29.
- [12] CHEN K S, WU Tzongdar, TSANG Leung, *et al.* Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, 41(1): 90–101. doi: [10.1109/TGRS.2002.807587](https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.807587).
- [13] 高旭, 杨硕, 柴建忠, 等. 基于矢量对消的缺陷类目标散射试验改进方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(7): 1293–1299. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0517](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0517).
- GAO Xu, YANG Shuo, CHAI Jianzhong, *et al.* Improved measurement method based on vector cancellation for scattering characteristic of electromagnetic discontinuities targets[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(7): 1293–1299. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0517](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0517).
- [14] 赵京城, 田进军, 杨硕, 等. 一种弱散射目标的RCS测量方法[P]. 中国专利, CN106443611A. 2017.
- ZHAO Jingcheng, TIAN Jinjun, YANG Shuo, *et al.* A RCS measurement method for electromagnetic discontinuities tar-gets [P]. Patent, China, CN106443611A, 2017.
- [15] SENIOR T B A, SARABANDI K, and NATZKE J R. Natzke scattering by a narrow gap[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(7): 1102–1110. doi: [10.1109/8.55624](https://doi.org/10.1109/8.55624).
- [16] PARK T J, KANG S H, and EOM H J. TE scattering from a slit in a thick conducting screen: Revisited[J]. *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 1994, 42(1): 112–114. doi: [10.1109/8.272309](https://doi.org/10.1109/8.272309).
- [17] SHENG Xining, YUNG Edward K N, CHAN C H, *et al.* Scattering from a large body with cracks and cavities by the fast and accurate finite-element boundary-integral method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(8): 1153–1160. doi: [10.1109/8.884482](https://doi.org/10.1109/8.884482).
- [18] 袁宁, 聂小春, 梁昌洪. 有限厚导电平板上任意缝隙的耦合特性分析[J]. *电波科学学报*, 1999, 14(3): 261–267. doi: [10.13443/j.ejors.1999.03.004](https://doi.org/10.13443/j.ejors.1999.03.004).
- YUAN Ning, NIE Xiaochun, LIANG Changhong. Analysis of coupling properties of an arbitrary slit in a thick conducting plate[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1999, 14(3): 261–267. doi: [10.13443/j.ejors.1999.03.004](https://doi.org/10.13443/j.ejors.1999.03.004).
- [19] 曾学刚, 林为干, 阮成礼. 有耗目标的电磁相似性及矩形涂覆平板RCS的缩比关系[J]. *应用科学学报*, 1993, 11(3): 213–218.
- ZENG Xuegang, LIN Weigan, and RUAN Chengli. The electromagnetic similitude of the object containing lossy materials and the RCS scaled-down relationships of the coated plate[J]. *Journal of Applied Sciences*, 1993, 11(3): 213–218.
- [20] 黄沛霖, 刘战合. 飞行器表面缝隙电磁散射特性研究[J]. *航空学报*, 2008, 29(3): 675–680. doi: [10.3321/j.issn:1000-6893.2008.03.023](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6893.2008.03.023).
- HUANG Peilin and LIU Zhanhe. Research on electromagnetic scattering characteristics of slits on aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(3): 675–680. doi: [10.3321/j.issn:1000-6893.2008.03.023](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6893.2008.03.023).
- [21] 吕可, 郑威. 角反射体RCS微波暗室测量及分析[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(9): 28–31. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.09.008](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.09.008).
- LÜ Ke and ZHENG Wei. Measurement and analysis of corner reflector's RCS in microwave anechoic chamber[J]. *Computer Measurement and Control*, 2016, 24(9): 28–31. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.09.008](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.09.008).
- 赵京城: 男, 1979年生, 讲师, 主要研究方向为微波数字信号处理、微波毫米波成像、辐射散射测量。
- 付鑫如: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为微波毫米波成像。
- 杨涛: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为微波毫米波测量及成像、VxWorks系统嵌入式应用-雷达模拟器。
- 高旭: 女, 1983年生, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体及隐身设计。
- 艾俊强: 男, 1964年生, 研究员, 主要研究方向为飞机总体与气动设计。