

【引用格式】宋广. 非完整表面角反射器的 RCS 特性研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5 (6): 567-571.

# 非完整表面角反射器的 RCS 特性研究

宋 广

(中国人民解放军 92785 部队, 辽宁 葫芦岛 125208)

**摘 要** 角反射器对雷达电磁波有极强的反射回波特性, 可模拟舰船、装甲车等军事目标。金属角反射器在使用过程中因锈蚀、油污等原因造成角反射器表面破损, 造成其性能严重下降。分别研究了角反射器反射面不同的破损面积和破损数量条件下雷达散射截面积 (RCS) 特性, 金属角反射器 RCS 值随反射面破损数量增多和面积增大快速降低, 可有效量化评估角反射器电磁波反射能力。

**关键词** 角反射器; 非完整表面; RCS 特性; 仿真分析

中图分类号 TN974

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)06-0567-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.06.012

## Research on RCS Characteristics of Corner Reflector with Incomplete Surface

SONG Guang

(No. 92785 Unit of PLA, Huludao 125208, China)

**Abstract** Corner reflectors have strong reflection echo characteristics for radar electromagnetic waves, and can simulate military targets such as ships and armored vehicles. The surface of the metal corner reflector gets damaged due to rust, oil pollution and other reasons during the operation process, resulting in a serious decline in its performance. The Radar Cross Section (RCS) characteristics of the corner reflector with different damage areas and damage numbers are respectively studied. The RCS value of the metal corner reflector decreases rapidly with the increase of damage number and areas, which can effectively and quantitatively evaluate the electromagnetic wave reflection capability of the corner reflector.

**Key words** corner reflector; incomplete surface; RCS characteristic; simulation analysis

## 0 引言

随着现代反舰导弹的快速发展, 雷达制导导弹速度迅猛增加和抗干扰能力增强, 对水面装备的威胁越来越大, 单一的光电对抗手段已无法满足战场需要, 必须采用其他有效的手段共同完成末端防御任务。多面体角反射器是一类由三角板角反射通过调整尺寸、组合方式形成的, 三角板角反射器反射原理图及实物图如图 1 所示。其可以产生很大的雷

达散射截面积, 模拟舰船的雷达反射信号特征, 对来自各个方向上的不同频率的雷达制导武器形成有效干扰, 破坏敌方雷达对目标的搜索和跟踪, 是无源干扰体系的有效补充。其具备价格便宜、制造和使用方法简单等优点。罗亚松等<sup>[1]</sup>通过 FEKO 和 MATLAB 软件分别对单个和整个炮射随机角反射器的 RCS 进行仿真计算, 验证了该算法可以有效模拟舰船的 RCS 特性, 保护己方目标安全。范学满等<sup>[2]</sup>对电大尺寸目标单站雷达散射截面积 (RCS) 预

估的高频混合算法进行了研究,验证了改进 GO/AP 算法计算不同入射方向下三角形三面角反射器 RCS 的可行性,拓宽了 GO/AP 算法对观察角的适用范围。张俊等<sup>[3]</sup>针对浮空式角反射体新型无源干扰器材的末制导雷达目标识别问题,采用基于深度神经网络构建浮空式角反射体类目标识别模型,表明多个浮空式角反射器阵列能够在一定程度上改变单个角反射体固有的雷达截面积方向。孟凯等<sup>[4]</sup>对不同频率雷达波照射下标准二十面海面漂浮角反射器和存在角度误差状态的二十面角反射器雷达散射特性进行了仿真计算,分析表明:角度误差对二十面角反射器的散射特性影响巨大,大幅度降低了角反射器的性能。吴林罡等<sup>[5]</sup>通过改进基于几何光学和区域投影的高频混合算法,实现了对浮空式双棱锥型角反射器 RCS 的快速预估,与弹跳射线法仿真结果进行了对比,该算法可以为空式角反射器阵列的快速 RCS 预估以及快速布放决策提供重要帮助。葛尧等<sup>[6]</sup>采用 FEKO 软件对角反射器的顶角、原点、斜边等不同部位进行仿真并优化设计,获得了优化后异形结构三面角反射器的 RCS 及方位覆盖角度的变化规律。赵俊娟等<sup>[7]</sup>基于 FEKO 平台的物理光学算法模拟人工角反射器等电大尺寸目标,根据物理光学算法模拟三锥体角反射器的 RCS 曲线,与理论最大值具有良好的一致性。

目前文献主要针对各种理想状态角反射器进行特性分析,较少考虑表面破损引起角反射体的 RCS 特性变化。角反射器在搬运、装配、作战使用等过程中,会经历摩擦、碰撞、环境腐蚀等外力,造成表面变形、锈蚀、污染等多种形式的破损,会降低其 RCS 特性,严重影响角反射器的使用效能。针对此情况,本文对不同表面破损条件下的金属角反射器 RCS 特性进行仿真计算。

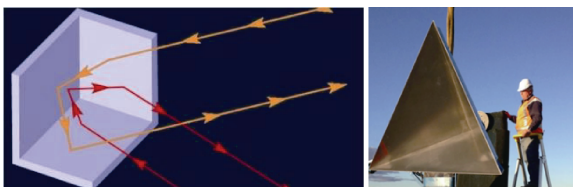


图 1 角反射器反射原理(左)及实物图(右)  
Fig. 1 Reflection principle (left) and real picture (right) of corner reflector

## 1 RCS 仿真计算方法

角反射器是凹形空腔结构,在腔体口径处电磁波进入腔体内部后经过多次内壁反射,最终电磁波的能量从空腔口处再次辐射至远区。目标雷达的散射截面常用来衡量目标对入射电磁波的散射能力<sup>[8]</sup>。目前 RCS 数值计算常用方法可分为低频方法和高频方法,低频方法包括有限元法(FEM)、矩量法(MOM)、时域有限差分法(FDTD)、有限积分法(Fit)等,高频方法包括物理光学法(PO)、几何光学法(GO)、一致性几何绕射理论(UTD)、弹跳射线法(SBR)等。由于受到计算机内存和效率影响,选择计算方法主要由目标尺寸  $L$  和计算波长  $\lambda$  比值决定。当  $\frac{L}{\lambda} \ll 1$  时,应选择高频方法,否则建议选择合适低频方法。本文分析三角形角反射体直角边尺寸 1 000 mm,分析频段 8 GHz 以上,目标尺寸与波长比值远大于 1,因此选择高频计算方法。采用 SBR 高频近似算法,可高效计算上百个波长电大目标 RCS,满足大尺寸角反射体 RCS 计算,因此本文将采用此方法对角反表面破损进行仿真分析。德国 CST 公司拥有专业三维电磁仿真软件,其 CST 微波工作室已集成 SBR 高频近似算法,可高效计算上百个波长电大目标 RCS,满足大尺寸角反射体 RCS 计算,因此本文将采用 CST 软件对角反射器表面破损进行仿真分析。

## 2 角反射器仿真模型

### 2.1 建模

角反射器由 3 个相同且相互垂直的三角形面组成,为了有效分析表面破损对角反射器散射性能的影响,研究在反射面不同的破损数量、破损面数等条件下,角反射器 RCS 特性,建立完整角反射器模型、单反射面破损模型、两反射面破损模型、三反射面破损模型 4 种状况模型。如图 2 所示。其中,完整角反射器模型的所有反射面表面均未破损,作为破损角反射器 RCS 特性研究的基础。

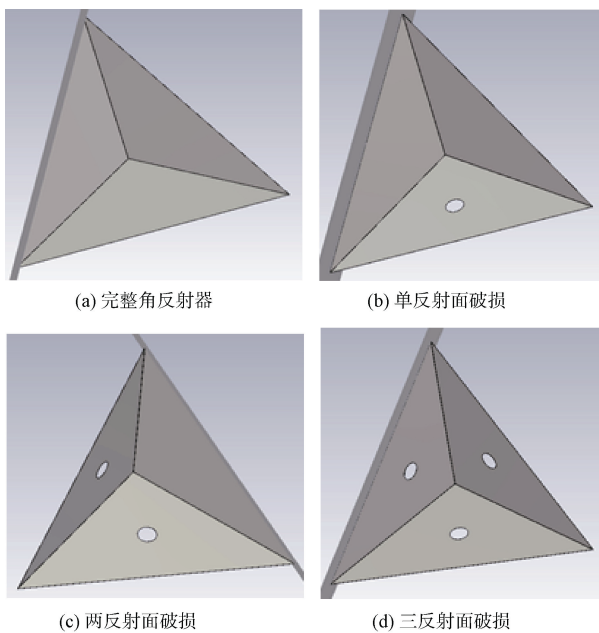


图 2 角反射器模型  
Fig. 2 Corner reflector model

本文采用角反射器直角边为 1 000 mm 的模型进行研究, 对角反射器破损面数和破损直径设置多种影响因素, 模拟角反射器在不同破损程度下的 RCS 特性。考虑到破损区域的位置随机性、面积随机性及形状随机性, 采用简化分析, 将破损区域位置设置在反射面能量反射中心位置, 破损区域可等效为圆形区域, 破损面积设置为直径 100 mm、150 mm、200 mm、250 mm、300 mm 等效圆形面, 圆形区为真空区, 不反射电磁波。由此实现对不同状态破损角反射器的模型简化和抽象。

## 2.2 仿真参数设置

仿真时主要考虑角反射器单站情况下表面破损对角反射器 RCS 特性影响, 需设置仿真频率、极化、入射波方向等参数, 具体如下:

- 1) 频率范围: 8~18 GHz, 间隔 1 GHz;
- 2) 极化: 水平极化;
- 3) 入射波方向: 选择角反射器口部端面法线方向。

## 3 RCS 特性仿真分析

角反射器表面出现破损, 将会影响角反射器对入射电磁波的散射能力。表面破损对角反射器 RCS

影响主要从角反射器破损区域尺寸、破损区数量等方面进行仿真分析。同一尺寸下不同破损数量角反射器 RCS 随频率变化曲线如图 3 所示。

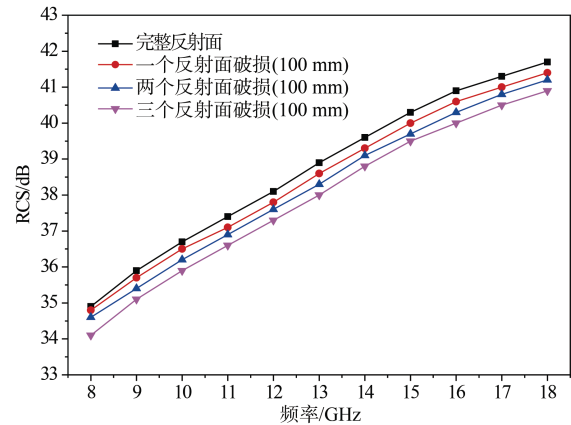


图 3 破损直径 100 mm 条件下不同破损数量角反射器 RCS 特性

Fig. 3 RCS characteristics of corner reflector with different damage numbers under condition of damage diameter being 100 mm

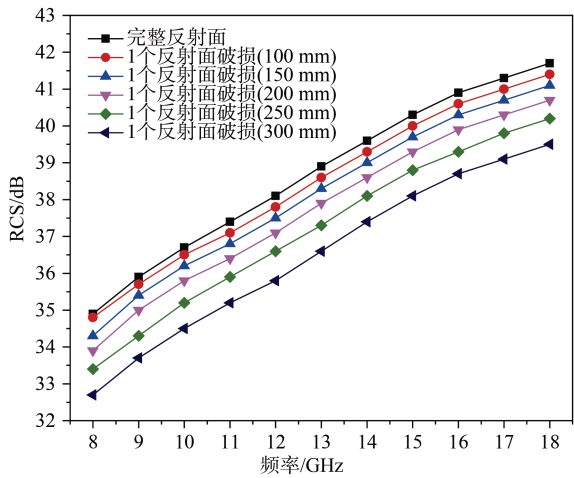
同一目标对雷达发射的不同频率的电磁波所表现的散射特性不同, 得到的 RCS 不同<sup>[9]</sup>。由图 3 可知, 在 8 GHz~18 GHz 频率范围内, 随着入射频率的升高, 角反射器的 RCS 呈上升趋势, 上升趋势随频率的增大呈放缓趋势。表面未破损时, 射入角反射器内不同频率的电磁波会完全反射, 与破损的角反射器相比, 在同一频率下 RCS 最大。当角反射器出现破损时, 电磁波在破损面处出现漫反射现象, 随着破损面数量增多, 漫反射现象愈严重, RCS 呈现降低趋势。

由图 4 可知, 在 8~18 GHz 入射频率范围内, 当反射面破损时, 反射面的 RCS 降低, 当反射面破损直径增大, 角反射器的 RCS 呈快速下降趋势, 且随着破损反射面数量增加, 角反射器 RCS 降低幅度增大。

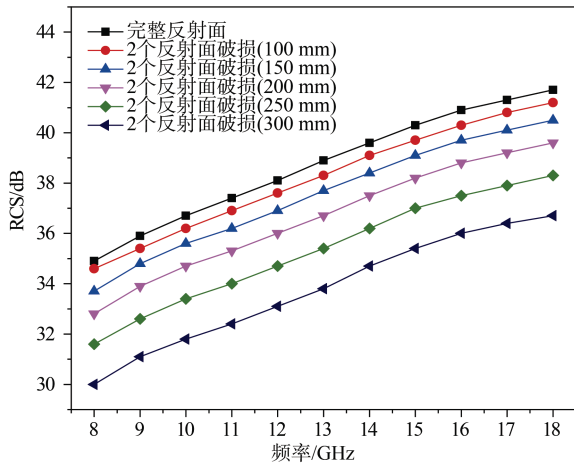
通过分析, 角反射器 RCS 特性随频率近似线性变化, 由此选择典型频段 13 GHz, 分析其随着破损面积增加时 RCS 变化趋势, 结果如表 1-3 所示。

由表 1-3 和图 5 可知, 角反射器未发生破损的情况下, RCS 最大, 随着角反射器破损反射面数量

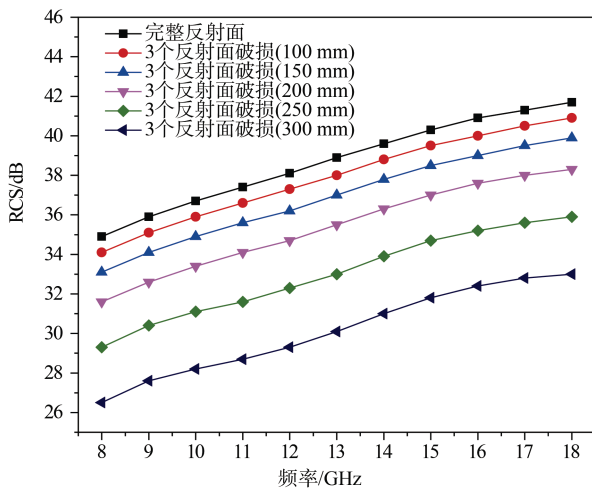
增多,角反射器反射电磁波能力急剧减少,且成加速降低趋势。



(a) 单个反射面破损直径



(b) 2个反射面破损直径



(c) 3个反射面破损直径

图 4 角反射器面破损直径对 RCS 影响曲线

Fig. 4 Impact curve of corner reflector surface damage diameter on RCS

表 1 13 GHz 时 1 个反射面破损 RCS 变化趋势

Table 1 RCS change trend of 1 damaged reflecting surface at 13 GHz

序号	破损/mm	RCS/m <sup>2</sup>	降幅/%
1	无破损	7 762.5	/
2	100	7 244.4	6.7
3	150	6 760.8	12.9
4	200	6 165.9	20.6
5	250	5 370.3	30.8
6	300	4 570.9	41.1

表 2 13 GHz 时 2 个反射面破损 RCS 变化趋势

Table 2 RCS change trend of 2 damaged reflecting surfaces at 13 GHz

序号	破损/mm	RCS/m <sup>2</sup>	降幅/%
1	无破损	7 762.5	/
2	100	6 760.8	12.9
3	150	5 888.4	24.1
4	200	4 677.3	39.7
5	250	3 467.4	55.3
6	300	2 398.8	69.1

表 3 13 GHz 时 3 个反射面破损 RCS 变化趋势

Table 3 RCS change trend of 3 damaged reflecting surfaces at 13 GHz

序号	破损/mm	RCS/m <sup>2</sup>	降幅/%
1	无破损	7 762.5	/
2	100	6 309.6	18.7
3	150	5 011.9	35.4
4	200	3 548.1	54.3
5	250	1 995.3	74.3
6	300	1 023.2	86.8

角反射器 RCS 降幅如图 5 所示。

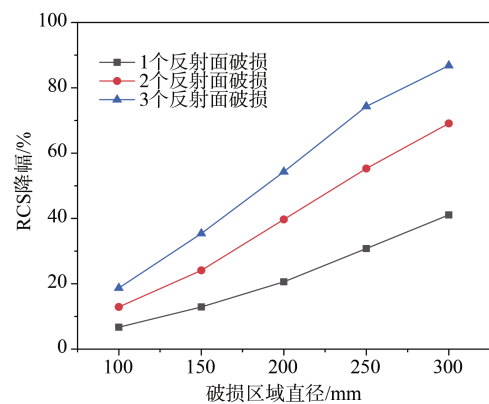


图 5 不同破损反射面数量时 RCS 变化趋势

Fig. 5 RCS change trend with different numbers of damaged reflecting surfaces

## 4 结束语

本文针对角反射器在使用过程中出现表面破损后, 影响其 RCS 特性, 采用 SBR 高频近似法对非完整表面角反射器 RCS 特性进行了仿真分析, 分别研究角反射器反射面不同的破损面积和破损数量条件下 RCS 特性, 结论如下:

1) 角反射器在表面破损后, 其 RCS 特性快速降低。

2) 反射面破损数量一定的情况下, 随着破损面积增大, RCS 快速降低; 随着反射面破损数量增多, 角反射器反射电磁波能力急剧减少, 且成加速降低趋势。

本文量化分析了金属角反射器的反射面表面破损后 RCS 特性变化趋势, 可有效评估角反射器在使用过程中电磁波反射能力。

## 参考文献

- [1] 罗亚松, 刘忠, 付学志. 炮射随机角反射器阵的 RCS 预估研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(7): 2077-2080.
- [2] 范学满, 胡生亮, 贺静波. 一种角反射体雷达散射截面积的高频预估算法[J]. 电波科学学报, 2016, 31(2): 331-335, 362.
- [3] 张俊, 胡生亮, 杨庆, 等. 浮空式角反射体 RCS 统计特征及识别模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 780-786.
- [4] 孟凯, 马武举. 海面漂浮二十面角反射器电磁散射特性研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(5): 437-442.
- [5] 吴林罡, 胡生亮, 张俊, 等. 双棱锥型角反射器 RCS 快速预估方法[J]. 战术导弹技术, 2021(5): 29-35.
- [6] 葛尧, 王硕, 郭京. 基于 FEKO 计算的异型结构三面角反射器 RCS 特性分析[J]. 战术导弹技术, 2021(1): 121-125.
- [7] 赵俊娟, 尹京苑, 李成范. 基于 FEKO 平台的人工角反射器 RCS 模拟[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(8): 79-81, 85.
- [8] 黄小红, 马云, 陈曾平. 利用 RCS 序列估计空间目标尺寸的方法研究[J]. 信号处理, 2005(6): 639-641.
- [9] 敖腾. 船舶导航雷达传感器建模技术动态高品质图像仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.

(责任编辑: 肖楚楚)