

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.021

基于 FEKO 计算的内嵌式三面角反射器 RCS 特性分析

葛 尧, 王 硕

(中国人民解放军 92941 部队 44 分队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 针对常规角反射器固有特性无法满足特殊场合使用要求, 在研究大尺度 RCS 分布特性的基础上, 通过对内嵌式角反射器进行区域划分设计, 采用 FEKO 软件对新型角反射器进行建模仿真, 获得内嵌式三面角反射器的 RCS 幅值变化规律。分析结果证明: 采用组合方式的内嵌式角反射器, 其 RCS 起伏特性在一定程度上更逼近真实目标 RCS 特性, 满足特殊场合的实践应用, 具有实际工程价值。

关键词: RCS; 三面角反射器; 内嵌; 建模

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Analysis of RCS Characteristics of Embedded Trihedral Corner Reflector Based on FEKO Calculation

Ge Yao, Wang Shuo

(No. 44 Team, No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: In view of the fact that the inherent characteristics of conventional corner reflectors can not meet the requirements of special occasions, based on the study of large-scale RCS distribution characteristics, through the regional division design of embedded corner reflectors, FEKO software is used to model and simulate the new corner reflectors, and the RCS amplitude variation law of embedded trihedral corner reflectors is obtained. The analysis results show that the RCS fluctuation characteristics of the embedded corner reflector are closer to the real target RCS characteristics to a certain extent, which meets the practical application of special occasions and has practical engineering value.

Keywords: RCS; TTCR; embedded; modeling

0 引言

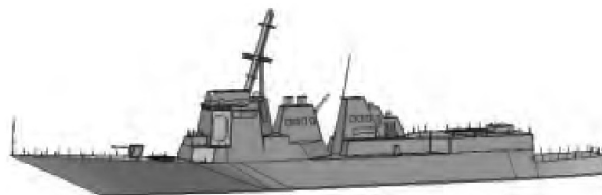
在进行典型目标雷达特性模拟时, 考虑到经济性, 通常采用在简易平台上加装金属三角形角反射器的方式, 一般以单个角反射器(有效区域为最大值方向为基准的 3 dB 理论范围内^[1])为基本单元进行组合配置设计, 实现典型目标全空域角度 RCS 等效模拟。常规角反射器在有效范围内 RCS 变化连贯平滑, 没有剧烈起伏特性, 在不同方位俯仰均能为被试产品提供可靠稳定的 RCS, 满足被试产品雷达跟踪能力的单项指标检测, 但由于目标属于大尺寸目标, 其 RCS 通常会由数个 RCS 强点叠加组成, 起伏特性明显; 因此, 在进行特殊场合模拟时, 常规角反射器的模拟逼真度较低, 无法严格考核被试产品相关指标。

通过对常规三角形角反射器进行优化改进设计, 在原有特性的基础上进行改造, 形成新的内嵌式组合角反射器, 此类角反射器进行了多个强点的组合叠加, 起伏特性明显, 逼真度更高, 满足特殊场合的典型目标模拟; 同时, 可以根据模拟目标特

性与常规角反射器配合使用, 实现更加高逼真度的模拟, 对实际建设具有重要的工程应用价值。

1 典型目标反射机理分析

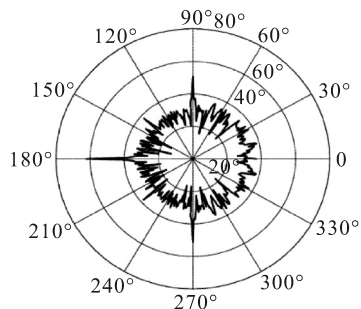
大尺度目标体积庞大, 外形结构复杂, 具有分层式甲板和指挥室、烟囱、桅杆等上层建筑, 装备了大量设备, 属于超大尺度复杂目标, 如图 1 所示。目标雷达散射特性不是由单一散射点源产生, 也不可能是一个单一的值, 而是由多个散射中心相互叠加产生, 并随被试产品的方位、俯仰不断变化, 通常的散射点叠加组合方式为强点主散射点加独立的弱点式差异性量级组合、同级别幅度相似散射点叠加式近似等量级组合为主, 散射点的多少决定了起伏的快慢和幅值的大小。



(a) 典型目标 3 维模型

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2024-10-22

第一作者: 葛 尧(1979—), 男, 河北人。



(b) 典型目标 RCS 幅值特性

图 1 典型目标模型及 RCS 幅值特性

文献[2-6]中通过 SolidWorks 3 维制图软件建立目标 3 维模型，采用 CST 3 维电磁场仿真软件进行计算得到 RCS 的幅值特性。通过对 RCS 幅值特性进行分析不难看出：与外形特性相似，RCS 幅值左右对称，幅值具有随着角度的变化不断起伏的特性，并且由于不同角度下，强散射点数量不同，其起伏特性不一样，主要分为幅度起伏较小型和起伏较快型，如图 0~30° 角度范围起伏较小，30°~90° 角度范围起伏较快。

2 内嵌式角反射器 RCS 仿真计算

对于棱长 1 m 的三角形角反射器，其在 10 GHz 频率下，俯仰角 54.74° 和方位角 45° 条件下 RCS 最大值理论约为 36.678 dB·m²。如图 2 所示，在 CADFEKO 中进行建模，角反射器棱边结合处为坐标系原点，3 个棱边分别对应 3 个轴向，Faces 的属性 Medium 采用 Default，Solution 采用 RL-GO(射线发射几何光学)，PlaneWaveSource 采用 54.74° 入射，进行水平 0~90° 步进 0.1° 计算，Polarisation 采用 Linear，计算结果最大值为 36.709 9 dB·m²，与理论计算非常接近。

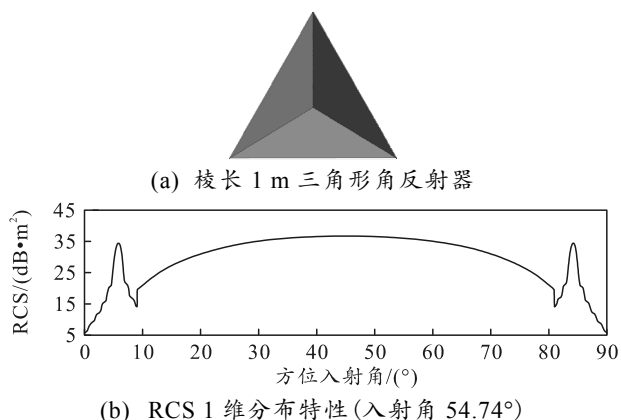


图 2 FEKO 中角反射器建模及 RCS 结果

2.1 内嵌式角反射器结构设计

对于单个常规角反射器，其 RCS 特性相对平

稳，难以进行多强点叠加，无法模拟起伏特性，通过对单个常规角反射器进行内部区域划分形成多个小的角反射器思路，采用等分法和偏离法划分方式，可以形成等量级和差异量级的组合方式，其划分如图 3 所示。划分后的各个小角反射器的法线方向与单个常规角反射器法线一致，这些散射点可能同相或反相，矢量叠加的结果将产生起伏特性^[7-8]。

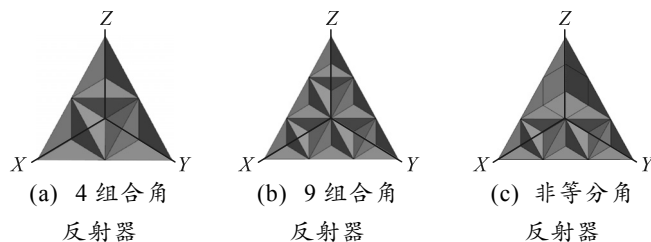


图 3 内嵌式角反射器结构

将单个内嵌小角反射器作为一个散射单元，进一步运用散射中心合成算法，得到内嵌式角反射器 RCS 模型：

$$\sigma_{\text{总}} = \left| \sum_{i=1}^n \sqrt{\sigma_i} e^{4\pi j r_i / \lambda} \right|^2 \quad (1)$$

式中： σ_i 为单个散射单元 RCS； r_i 为单个散射单元与被试产品距离； λ 为入射波长。 n 等分时，有单个小角反射器 RCS：

$$\sigma = \pi l^4 / 3\lambda^2 = 4\pi(b/\sqrt{n})^4 / 3\lambda^2 \quad (2)$$

当各个散射单元相位一致时 RCS 起伏幅度最大，有：

$$\sigma_{\text{总}} = (n\sqrt{\sigma_i})^2 = n^2 \sigma_i \quad (3)$$

即总的 RCS 与同棱长常规角反射器幅度值相等。同理，进行偏离法划分时，其最大值幅度值仍相等，其他非相位一致时 RCS 幅度总值将降低，于是产生了起伏特征。

2.2 内嵌式角反射器 RCS 分析

2.2.1 等分法内嵌式角反射器 RCS 分析

使用 CADFEKO 软件对等分法内嵌式角反射器进行建模仿真计算，俯仰 54.74° 入射 RCS 最大时，RCS 仿真结果如图 4 所示。

常规角反射器采用等分时，由于相对相位叠加效应，且每个小角反射器 RCS 基本相等，幅值产生了规律性的起伏特性，幅值包络与常规角反射器的幅值基本相等，9 等分比 4 等分的幅值起伏更大，相干角度间隔更宽。根据相对相位法对进行计算，相干间隔角度为：

$$(\sin\theta)^{-1} = (\lambda/4)/l \quad (4)$$

式中 l 为散射点的间隔距离, 4 等分的角度间隔约为 2.43° , 9 等分的角度间隔约为 3.65° , 计算值与仿真结果一致。

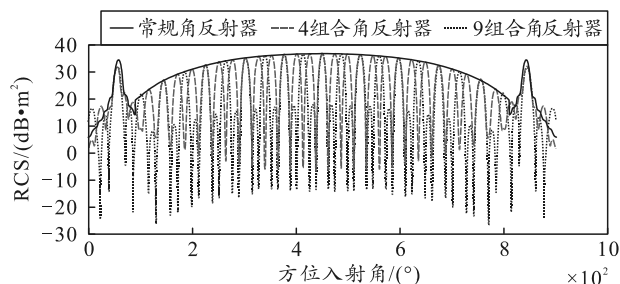
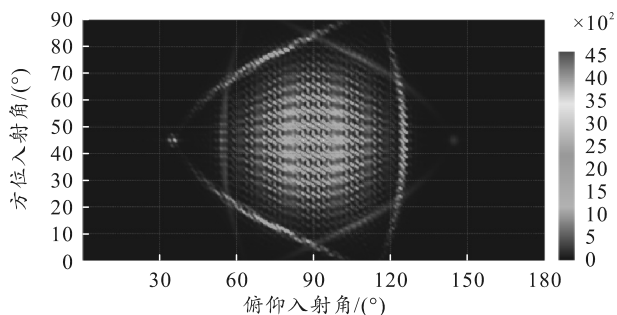
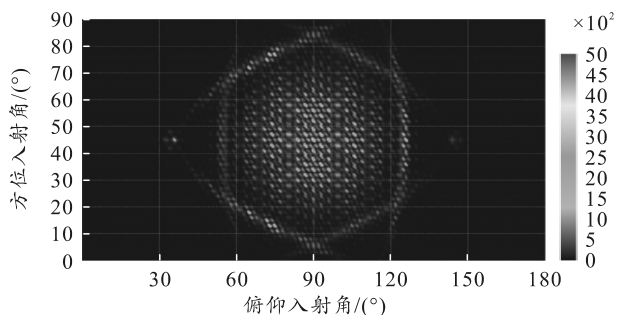


图 4 等分法内嵌角反射器 RCS 特性

同理, 通过 CADFEKO 软件计算方位 $0\sim 90^\circ$ 、俯仰 $0\sim 180^\circ$ 的 RCS 幅值, 如图 5 所示。从图中不难发现: 方位俯仰均产生了起伏特性, 且等分越多, 间隔角度越大, 幅值起伏越显著。



(a) 4 等分 RCS 特性



(b) 9 等分 RCS 特性

图 5 等分法内嵌角反射器 2 维 RCS 特性

2.2.2 非等分法内嵌式角反射器 RCS 分析

使用 CADFEKO 软件对非等分法内嵌式角反射器进行建模仿真计算, 俯仰 54.74° 入射 RCS 最大时, RCS 仿真结果如图 6 所示。单个角反射器采用非等分时, 由 1 个内嵌大角反射器和 5 个内嵌小角反射器组成, 棱长比值为 2:1, 幅值包络围绕 $2/3\text{ m}$ 常规角反射器幅值跌宕起伏, 最大值比单个 1 m 角反射器的幅值略低, 强起伏点外幅值与 $2/3\text{ m}$ 角反射器基本一致, 起伏点的间隔变化规律与 9 等分变化规律有一定的相似性, 角度间隔约为 3.65° , 但部分起

伏点的起伏方向相反。

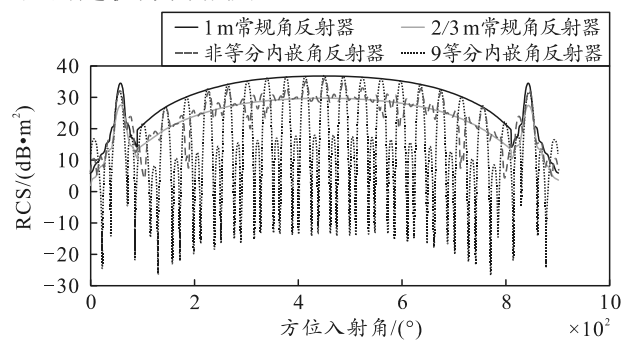
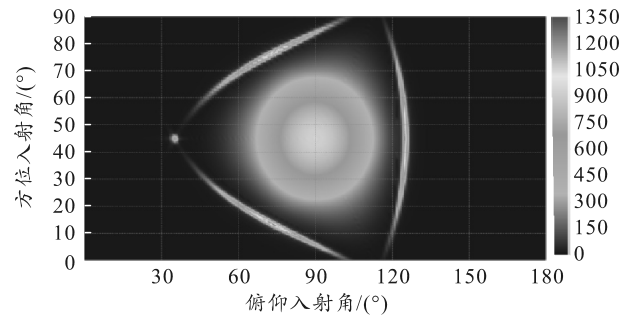
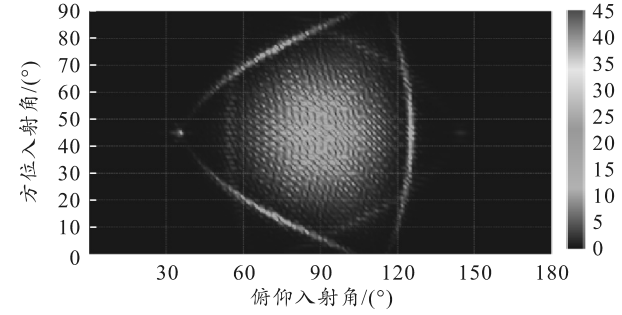


图 6 非等分法内嵌角反射器 RCS 特性

同理, 通过 CADFEKO 软件计算方位 $0\sim 90^\circ$ 、俯仰 $0\sim 180^\circ$ 的 RCS 幅值, 如图 7 所示。结合图 5 分析不难发现: 非等分式内嵌角反射器方位俯仰虽产生了起伏特性, 但比等分式内嵌角反射器相对变化缓慢, 起伏较小。



(a) 1 m 常规角反射器



(b) 非等分内嵌角反射器

图 7 非等分法内嵌角反射器 2 维 RCS 特性

3 结论

通过对常规角反射器进行内嵌式划分, 由 CADFEKO 软件建模仿真计算, 内嵌式角反射器的 RCS 幅值包络与常规角反射器变化不大, 但由于内嵌式角反射器相位叠加, 产生了起伏特性, 幅值变化具有明显的规律性, 起伏幅度、间隔变化明显, 具有散射点越多, 起伏越剧烈的特性。在实际工程应用时, 可与常规角反射器进行组合配置, 形成的典型目标模拟比全部用常规角反射器组合配置的模拟逼真度更高, 满足高要求的特殊应用场合。

参考文献:

- [1] 王永庆, 张澎, 戴春亮. 雷达散射截面测量[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 67-73.
- [2] 张俊, 胡生亮, 刘泰邑. 基于探索性分析的浮空式角反射体质心干扰使用研究[J]. 战术导弹技术, 2019, 4(4): 13-19.
- [3] 张俊, 胡生亮, 杨庆. 浮空式角反射体 RCS 统计特性及识别模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 4(41): 780-785.
- [4] 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, 2016: 98-106.
- *****
- [5] 范学满, 胡生亮, 贺静波. 一种角反射体 RCS 的高频混合预估算法[J]. 电波科学学报, 2016, 4(31): 331-335.
- [6] 郝炎祯, 褚德放, 陈朋, 等. GO/AP 法角反射器可变 RCS 模拟技术[J]. 现代防御技术, 2017, 45(6): 138-144.
- [7] 胡生亮, 范学满, 贺静波. 基于改进 GO/AP 法的三面角反射体 RCS 预估[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(2): 185-190.
- [8] 张俊, 胡生亮, 王聘, 等. 基于 PO/AP 的角反射体 RCS 模型构建及分析[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(7): 1478-1485.
- *****
- [9] 王婉婷. 基于高精度辨识的复合轴控制策略研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [10] KRISTAN M, MATAS J, LEONARDIS A, et al. A novel performance evaluation methodology for single-target trackers[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2016, 38(11): 2137-2155.
- [11] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 24-31.
- [12] 孙彪, 孙秀霞. 离散系统最速控制综合函数[J]. 控制与决策, 2010(3): 5.
- [13] 张和洪, 谢晏清, 王娟, 等. 新型跟踪微分器在航空发动机磁悬浮轴承中的应用[J]. 航空发动机, 2022, 48(4): 13-19.
- [14] 周宏仁. 机动目标“当前”统计模型与自适应跟踪算法[J]. 航空学报, 1983(1): 73.
- [15] 刁联旺, 杨静宇. 一种改进的机动目标“当前”统计模型的描述[J]. 兵工学报, 2005, 26(6): 825-828.
- [16] 欧能杰, 于雪莲, 汪学刚. 修正的当前统计模型及自适应跟踪算法[J]. 现代雷达, 2018, 40(9): 50-54.
- [17] 孙福明. 机动目标跟踪状态估计与数据关联技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [18] CHEN D, YI Y, SHUAI P, et al. A New Modified Adaptive Algorithm for Time Delay Compensation of Optoelectronic Tracker[C]//2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. IEEE, 2016: 30-33.
- [19] 姜仁华, 谢洋, 刘闯, 等. 基于改进“当前”统计模型的机动目标 IMM 跟踪算法[J]. 现代雷达, 2019(2): 39-42.
- [20] 王黛后. 稳定平台跟踪瞄准系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [21] ZHAO W, LIN J Q, CHAN S C, et al. A Division-Free and Variable-Regularized LMS-Based Generalized Sidelobe Canceller for Adaptive Beamforming and Its Efficient Hardware Realization[J]. IEEE Access, 2018, 6: 64470-64485.
- [22] ZHAO H, ZHANG H, ZENG X. An Improved Variable Step Size LMS Harmonic Current Detection Method for Active Power Filter[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(24): 304-307.
- [23] CHENG J, HONG Z, ZHONG S, et al. Finite-time H_{∞} control for a class of Markovian jump systems with mode-dependent time-varying delays via new Lyapunovfunctionals[J]. ISA Transactions, 2013, 52(6): 768-774.

(上接第 101 页)