

双棱锥型角反射器 RCS 快速预估方法

吴林罡, 胡生亮, 张俊, 吴兆东
(海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033)

摘要: 为实现浮空式角反射器 RCS 快速预估, 通过改进基于几何光学和区域投影的高频混合算法, 推导出双棱锥型角反射器的全向 RCS 表达式; 通过分析平面波在双棱锥型角反射器内表面的反射情况, 推导建立了双棱锥型角反射器全极化 RCS 的快速预估流程; 将 RCS 快速预估方法计算结果与弹跳射线法仿真结果进行了对比, 证明了全极化 RCS 快速预估的可行性, 为进一步实现浮空式角反射器阵列的快速 RCS 预估以及快速布放决策提供了重要帮助。

关键词: 角反射器; RCS 预估; 全极化; 几何光学; 区域投影; 弹跳射线法

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-1300(2021)05-0029-07

DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.108

Fast RCS Estimation Method for Bipyramid Corner Reflector

Wu Lingang, Hu Shengliang, Zhang Jun, Wu Zhaodong
(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To realize the fast RCS estimation of the air-floating corner reflector, the omni-directional RCS expression of the bipyramid corner reflector is calculated by improving the high-frequency hybrid method based on geometrical optics and area projection; By analyzing the reflection of plane wave on the inner surface of bipyramid corner reflector, the full-polarized RCS fast estimation process of it is established. The calculation results of the fast RCS estimation method are compared with the simulation results of shooting-and-bouncing-ray method, which proves the feasibility of the full-polarized RCS fast estimation. This method provides an important help for the fast RCS estimation and fast deployment decision of the air-floating corner reflector array.

Key words: corner reflector; RCS estimation; full-polarized; geometrical optic; area projections; shooting-and-bouncing-ray method

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61401493); 国家部委基金资助项目 (9140A01010415JB11002)

作者简介: 吴林罡, 硕士研究生, 主要研究方向为电子对抗无源干扰。

通讯作者: 胡生亮, 教授, 主要研究方向为精确制导与对抗。

引用格式: 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. (Wu Lingang, Hu Shengliang, Zhang Jun, et al. Fast RCS Estimation Method for Bipyramid Corner Reflector[J]. Tactical Missile Technology, 2021, (5): 29-35.)

1 引言

浮空式角反射器作为一种新型无源干扰器材,在反导对抗领域具有重要的应用前景,其作用高度较高,干扰范围较大,通常采用双棱锥型结构设计。多枚角反射器共同作用时,不仅能够模拟与遇袭目标相当的雷达截面积(Radar Cross-section, RCS),并且可以根据遇袭目标的散射中心分布情况,在发射前进行不同阵型的布放决策,使展开后角反射器阵列提供与遇袭目标相似的高分辨率距离像,对于干扰目标形成较好的欺骗干扰能力^[1-3]。浮空式角反射器一般采用伞降方式或充气方式延长滞空时间^[4],然而滞空时间依然有限,难以预先布放,因此其使用情景具有紧急性前提,往往要求快速决策、快速布放。在攻防双方信息已知时,提高角反射器阵列RCS的预估速度对快速决策具有重要意义。

角反射器作为电大尺寸目标,其RCS计算一般使用高频近似算法,主要包括几何光学法、物理光学法、弹跳射线法等,或利用FEKO、CST等专业电磁仿真软件进行解算^[5-6]。文献[7-8]利用几何光学/区域投影(Geometrical Optics/Area Projection, GO/AP)法对三角形三面角反射器进行RCS预估,该方法预估效率高,但会造成极化信息的丢失;文献[9]利用物理光学和区域投影的混合算法对三面角反射器进行RCS分析,该方法能够有效保证计算精度,但确定有效反射面积的过程复杂,效率不高;文献[10]利用弹跳射线法对腔体目标进行RCS计算,但该方法射线管数量多,计算耗时较长;文献[11]通过FEKO仿真建立了角反射器的全向全频段RCS数据库,然而前期需要存储大量的仿真数据,并且其最终的预估精度也受限于仿真时所设置的变量步长。

为实现浮空式角反射器RCS的快速预估,以满足角反射器阵列布放阵型快速决策的需要,本文以双棱锥型角反射器为主要研究对象,通过对三角形三面角反射器的GO/AP预估法进行改进,以获得计算过程简洁、结果较为准确的双棱锥型角反射器全向全极化RCS预估方法。本文首先分析平面极化波在角反射器内表面的反射情况,以

及平面波入射方向对反射波极化方向的影响;基于GO/AP法,通过改进沿腔体边缘入射时的有效反射面积计算公式,实现任意平面波入射方向下双棱锥型角反射器的RCS预估;利用旋转矩阵进行矢量变换,求解双棱锥型角反射器在任意姿态及任意入射方向下的RCS预估值并分析反射波极化方向,最后根据反射波极化方向区分RCS预估值的不同极化分量,实现双棱锥型角反射器的全向全极化RCS快速预估。

2 平面极化波在角反射器内表面的反射

典型双棱锥型角反射器三维模型如图1所示,其结构可视为8个三角形三面角反射器的组合,以其质心为原点,建立XYZ直角坐标系,Z轴与中心纵轴重合,X轴、Y轴均与底面中垂线重合。假设入射波为线极化均匀平面波,可沿任意方向入射,其与Z轴的夹角 θ 为入射俯仰角,在XOY平面的投影与X轴的夹角 φ 为入射方位角,则入射方向矢量可表示为:

$$\vec{r} = \sin\theta \cos\varphi \vec{x} + \sin\theta \sin\varphi \vec{y} + \cos\theta \vec{z} \quad (1)$$

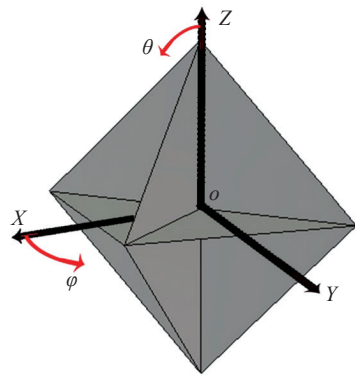


图1 双棱锥型角反射器

双棱锥型角反射器各腔体内三个面相互垂直,入射波到达腔体后可能发生多次反射,根据不同的入射方向,双棱锥型角反射器回波能量主要由1、2或3次反射分量贡献。下面分别对平面波在腔体内表面的1~3次反射情况进行分析:

(1) 如图2所示,一次反射主要发生在入射波垂直入射腔体内表面的情况下。入射波方向矢量与内表面法线构成的平面通常称为入射面,任

任意极化方向的入射波到达内表面时都可以分解为与入射面垂直的垂直极化分量 E_V 以及与入射面平行的水平极化分量 E_H 。假设双棱锥型角反射器内表面是理想导体, 导体内部电场和磁场均为0, 根据电场的切向分量连续性要求, 无论入射波极化方向如何, 导体表面必定产生与入射波同极化且相位相差 180° 的反射波。

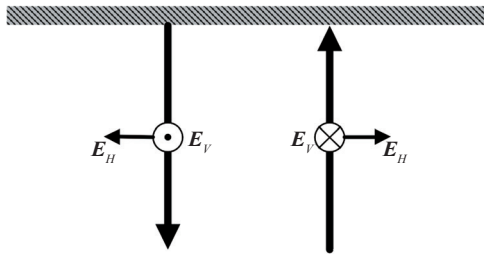


图2 入射波一次反射情形

(2) 如图3所示, 二次反射主要发生在平面波平行于某一腔体内表面入射时, 入射波将在腔体另两面发生两次反射。根据斯涅尔反射定律, 入射角均等于反射角, 反射波必沿原入射方向返回, 反射波的特性此时取决于入射波的极化。根据切向分量连续性要求, 经过两次反射后, E_V 将保持不变, E_H 相位改变 180° 。因此, 若 E_V 与 E_H 皆不为0, 反射波极化方向必定与原极化方向不同, 此时该观测角度下的单站 RCS 必定存在明显的交叉极化分量。

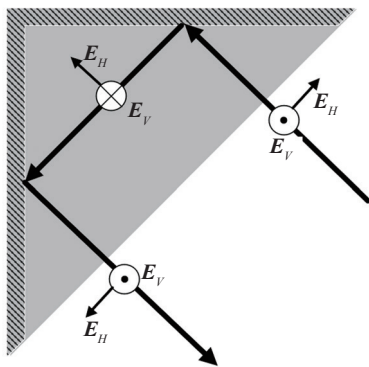


图3 入射波二次反射情形

(3) 三次反射主要发生在腔体内三面均被入射波照亮的情况下, 由于双棱锥型角反射器具有8个腔体不同孔径朝向的特殊结构, 单一入射源不

能同时完全照亮不同腔体, 因此三次反射在不同腔体内不可能同时发生, 如图4所示, 当发生三次反射时, 反射波必沿原入射方向返回, 并保持原极化方向。

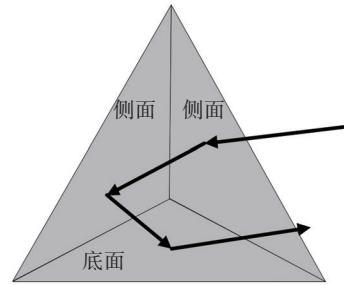


图4 入射波三次反射情形

3 基于GO/AP法的全向RCS快速预估

双棱锥型角反射器一般为电大尺寸目标, 可采用高频近似技术进行分析, 其中一类高频近似技术从GO出发, 其基本思想是: 高频电磁波的传播与光的传播类似, 且服从斯涅尔反射定律, 因而波的传播问题可以采用经典射线寻迹方法进行处理。用GO法预估角反射器RCS时, 一般将其等效为过原点 O 垂直于入射方向的平面, 该平面面积被视为角反射器在该视角下的有效反射面积, 记作 A_e , 则RCS可通过平面雷达截面积公式预估:

$$\sigma = \frac{4\pi \cdot A_e^2}{\lambda^2} \quad (2)$$

其中, λ 为入射波波长。由式(2)可知, 当入射波波长已知时, 只需得到双棱锥型角反射器的有效反射面积, 即可计算其RCS幅值。由于双棱锥型角反射器结构高度对称, 本文在分析其有效反射面积时, 只须考虑入射波方向角范围在 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \cap -45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ 的情况, 其它情况下通过简单坐标变换推理可得。

当入射波满足 $2^\circ \leq \theta \leq 88^\circ \cap -43^\circ \leq \varphi \leq 43^\circ$ 时, 双棱锥型角反射器雷达截面积主要由单一孔径产生的三次反射回波贡献。此时双棱锥型角反射器有效反射面积计算问题转化为单一三角形三面角反射器有效反射面积计算问题, 而这一问题已在文献 [7] 中利用GO/AP法得到解决。GO/AP法主要将散射体投影到过顶点 O 垂直于入射方向

的平面上, 所得投影称为实孔径, 将实孔径绕顶点 O 旋转 180° 得到虚孔径, 实、虚孔径的重叠区域面积即为 A_e 。当 θ 从 2° 到 88° 变化时, 重叠区域形状经历了由四边形到六边形再到四边形的三段变化过程, 各阶段面积计算公式不同, 不同阶段临界俯仰角主要由入射波方位角决定:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccot\left[\sqrt{2} \sin(\varphi + 90^\circ)\right] \\ \theta_2 = \arccot\left[\sqrt{2} \cos(\varphi + 90^\circ)\right] \end{cases} \quad (3)$$

有效反射面积 A_e 在三个阶段的计算公式分别为:

$$A_e = L^2 \cdot \begin{cases} 2 \sin^2 \theta \cdot \sin(2\varphi + 90^\circ) / f(\theta, \varphi) & \theta < \theta_1 \\ f(\theta, \varphi) - 2 / f(\theta, \varphi) & \theta_1 < \theta < \theta_2 \\ 2 \sin(\varphi + 45^\circ) \cdot \sin(2\theta) / f(\theta, \varphi) & \theta > \theta_2 \end{cases}$$

$$f(\theta, \varphi) \equiv \sin \theta \cdot \left[\cos(\varphi + 45^\circ) + \sin(\varphi + 45^\circ) \right] + \cos \theta \quad (4)$$

其中, L 为双棱锥型角反射器的直角边长。式 (3) 和 (4) 只在 $-43^\circ \leq \varphi \leq 0^\circ$ 的范围内有效, 由对称性可知当 $0^\circ \leq \varphi \leq 43^\circ$ 时只需将 φ 替换为 $-\varphi$ 即可。

当平面波趋近于沿腔体边缘入射时, 双棱锥型角反射器的散射能量贡献主要来自于多个腔体的一次或二次反射分量, 若用文献[7]中的 GO/AP 法进行 RCS 预估会产生较大的误差, 因此必须加以改进。本文分三种情况讨论并计算边缘入射时双棱锥型角反射器的有效反射面积:

$$(1) \theta = 0^\circ \text{ 或 } \theta = 90^\circ \cap \varphi = -45^\circ + 90^\circ n$$

其中, n 为自然数, 此时双棱锥型角反射器有四个腔体被入射波照射, RCS 的主要成分为四个直角三角面的一次反射分量, 有效反射面积为:

$$A_e = 4 \cdot \frac{L^2}{2} = 2L^2 \quad (5)$$

$$(2) \theta = 90^\circ \cap -45^\circ < \varphi < 45^\circ$$

此时双棱锥型角反射器有两个腔体被入射波照射, 照亮区域为四个直角三角侧面, RCS 的主要成分为侧面间的两次反射分量, 有效反射面积为:

$$A_e = \begin{cases} 2L^2 \cdot \sin(\varphi + 45^\circ) & -45^\circ < \varphi \leq 0^\circ \\ 2L^2 \cdot \cos(\varphi + 45^\circ) & 0^\circ \leq \varphi < 45^\circ \end{cases} \quad (6)$$

$$(3) \varphi = -45^\circ + 90^\circ n \cap 0^\circ < \theta < 90^\circ$$

此时双棱锥型角反射器有两个腔体被入射波照射, 照亮区域为两个直角三角侧面和两个直角三角底面, RCS 的主要成分为侧面与底面间的两次反射分量, 有效反射面积为:

$$A_e = \begin{cases} 2L^2 \cdot \sin(\theta) & 0^\circ < \theta \leq 45^\circ \\ 2L^2 \cdot \cos(\theta) & 45^\circ \leq \theta < 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

综合式 (2)、(5)、(6)、(7) 可分别求出边缘入射时的 RCS 值, 并用过该值的直线拟合靠近腔体边缘 2° 范围内的 RCS。结合式 (3) 和 (4) 即可建立双棱锥型角反射器的全向 RCS 预估方法。当入射波频率为 10 GHz、双棱锥型角反射器直角边长 $L = 0.5 \text{ m}$ 时, 全向 RCS 预估结果如图 5 所示。

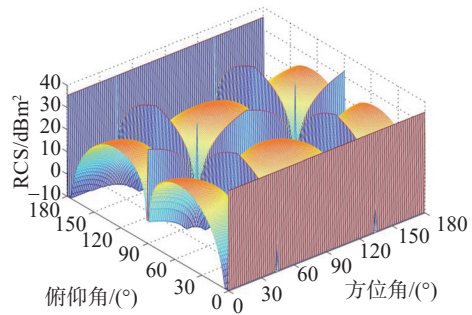


图5 双棱锥型角反射器全向 RCS 预估结果

为验证该预估方法的准确性, 将图 1 所示直角边长 $L = 0.5 \text{ m}$ 的双棱锥型角反射器模型导入 CST 仿真软件, 将入射波频率设为 10 GHz, 分别在 $\theta = 60^\circ \cap 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ 和 $\varphi = 45^\circ \cap 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 两种情况下, 以 1° 为步长, 利用弹跳射线法对该模型进行单站后向 RCS 测算, 将得到的 RCS 仿真结果与快速预估结果进行对比, 如图 6 所示。

图 6 (a) 中, 双棱锥型角反射器 RCS 随观测方位角不断变化, 并且当 $\varphi = 45^\circ \cup 135^\circ$ 时, 入射波满足第 3 类腔体边缘入射情况, RCS 达到最大值; 图 6 (b) 中, 双棱锥型角反射器 RCS 随观测俯仰角不断变化, 并且当 $\theta = 0^\circ \cup 90^\circ$ 时, 入射波满足第 1 类腔体边缘入射情况, RCS 达到最大值。将改进 GO/AP 算法得到的 RCS 预估结果与弹跳射线法得到的 CST 仿真结果进行对比, 两种计算结

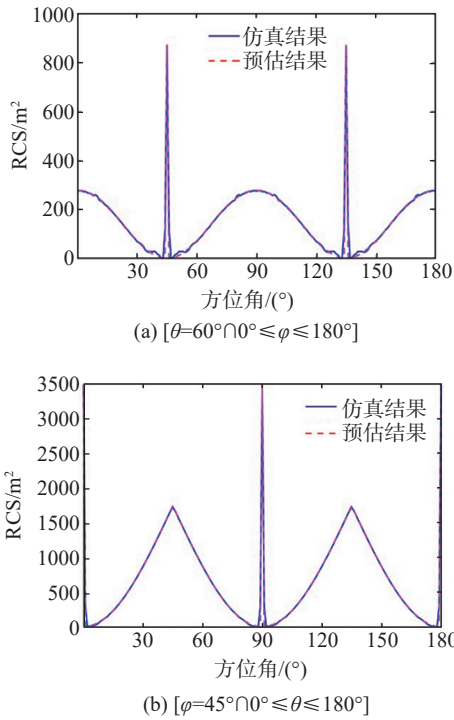


图6 CST仿真与GO/AP算法预估结果对比图

果十分接近, 平均误差仅 11.92 m^2 , 这证明了改进后的GO/AP法对于双棱锥型角反射器的全向RCS预估是切实有效的。

GO法在电磁波的高频极限情况下进行分析, 忽略了电磁波的偏振, 利用该方法进行RCS预估会造成极化信息的丢失。根据第2节分析可知, 只有在平面波入射方向满足二次反射条件时, 才会改变入射波的极化方向, 因此当平面波入射方向与极化方向已知时, 只需进一步判断反射波的极化方向即可区分RCS预估中的同极化部分以及交叉极化部分。

4 全极化RCS快速预估方法

为建立完整的双棱锥型角反射器RCS预估流程, 除了综合考虑角反射器尺寸及入射波信息外, 在实际环境中还必须考虑其自身姿态的变化对有效反射面积及反射波极化方向的影响。假设入射波仅有垂直极化及水平极化两种发射方式, 且雷达接收机仅有垂直极化及水平极化两种接收方式, 入射波极化方向可表示为:

$$\mathbf{e} \in \{\mathbf{e}_v, \mathbf{e}_h\} \quad (8)$$

将图1所示状态视为双棱锥型角反射器原始姿态, 投放后角反射器在稠密大气的复杂环境中姿态不断变化, 依据双棱锥型角反射器的实际姿态建立本地坐标系 $X'Y'Z'$, 本地坐标系可看作观察坐标系 XYZ 绕坐标轴旋转一定欧拉角得到, 通过式(9)中的旋转矩阵可以实现两个坐标系间的矢量变换。

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, α 、 β 、 γ 为旋转欧拉角, 分别表示从观察坐标系 XYZ 转换到本地坐标系 $X'Y'Z'$ 过程中先绕 X 轴旋转、再绕 Y 轴旋转、最后绕 Z 轴旋转的角度。入射波在 $X'Y'Z'$ 坐标系中的相对入射方向可表示为:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \mathbf{r}^T \quad (10)$$

通过 \mathbf{r}' 可计算入射波在 $X'Y'Z'$ 坐标系中的相对俯仰角 θ' 及相对方位角 φ' , 将 θ' 与 φ' 代入第3节中提出的改进GO/AP算法, 即可得到双棱锥型角反射器总的后向散射RCS预估值 σ 。另一方面, 入射波相对极化方向又可表示为:

$$\mathbf{e}' = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \mathbf{e}^T = \mathbf{e}'_v + \mathbf{e}'_h \quad (11)$$

相对极化方向在本地坐标系 $X'Y'Z'$ 中可以分解为相对垂直极化分量 \mathbf{e}'_v 与相对水平极化分量 \mathbf{e}'_h 的矢量和。当相对入射角 θ' 及 φ' 满足条件: (1) $\theta' = 90^\circ \cap -45^\circ < \varphi' < 45^\circ$ 或者; (2) $\varphi' = -45^\circ + 90^\circ n \cap 0^\circ < \theta' < 90^\circ$ 。此时双棱锥型角反射器的RCS主要由二次反射分量贡献。由本文第2节分析可知, 当发生二次反射时, 水平极化分量相位将改变 180° , 而垂直极化分量不变, 因此回波极化方向等于相对垂直极化分量 \mathbf{e}'_v 与相对水平极化分量 \mathbf{e}'_h 的矢量差, 在观察坐标系 XYZ 下可表示为:

$$\mathbf{e}^R = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{R}_z^{-1} (\mathbf{e}'_V - \mathbf{e}'_H) \quad (12)$$

由式(11)、(12)可知,回波极化方向 \mathbf{e}^R 主要与入射波极化方向 \mathbf{e} 以及角反射器姿态有关。由于本文假设入射波仅有垂直极化及水平极化两种发射方式,则当入射波为垂直极化波时,将回波极化方向记为 \mathbf{e}_V^R ,当入射波为水平极化波时,将回波极化方向记为 \mathbf{e}_H^R ,此时双棱锥型角反射器全极化RCS可表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{VV} = \sigma \cdot (\cos \langle \mathbf{e}_V^R, \mathbf{e}_V \rangle)^2 \\ \sigma_{HV} = \sigma \cdot (\cos \langle \mathbf{e}_H^R, \mathbf{e}_V \rangle)^2 \\ \sigma_{VH} = \sigma \cdot (\cos \langle \mathbf{e}_V^R, \mathbf{e}_H \rangle)^2 \\ \sigma_{HH} = \sigma \cdot (\cos \langle \mathbf{e}_H^R, \mathbf{e}_H \rangle)^2 \end{cases} \quad (13)$$

其中, σ_{VV} 表示垂直极化发射垂直极化接收RCS, σ_{HV} 表示垂直极化发射水平极化接收RCS, σ_{VH} 表示水平极化发射垂直极化接收RCS, σ_{HH} 表示水平极化发射水平极化接收RCS, σ 表示双棱锥型角反射器总的后向散射RCS预估值, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示矢量间夹角。而当实际入射角 θ' 及 φ' 不满足二次反射条件时,可近似认为回波中不存在交叉极化分量,则公式(13)可以修改为 $\sigma_{HV} = \sigma_{VH} = 0$ 且 $\sigma_{VV} = \sigma_{HH} = \sigma$ 。

综上所述,当双棱锥型角反射器姿态角及入射波信息已知时,全极化RCS可通过式(13)进行快速预估,为检验该预估方法的有效性,通过CST仿真手段对其进行验证,将图1中的双棱锥型角反射器模型绕Y轴旋转 45° ($\beta = 45^\circ$),得到新模型如图7所示。

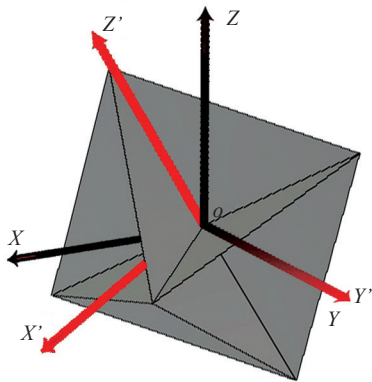


图7 双棱锥型角反射器旋转后新模型

将该模型重新导入CST仿真软件,设置计算方法为弹跳射线法,入射波为10 GHz的垂直极化波,入射俯仰角 $\theta = 90^\circ$,入射方位角 $\varphi = 1^\circ \sim 180^\circ$,步长 $\Delta\varphi = 1^\circ$,仿真完成后,通过RCS数据后处理,可分别得到垂直极化接收的同极化分量 σ_{VV} 以及水平极化接收的交叉极化分量 σ_{HV} 。将仿真结果与相同参数全极化RCS快速预估结果进行对比,如图8所示。

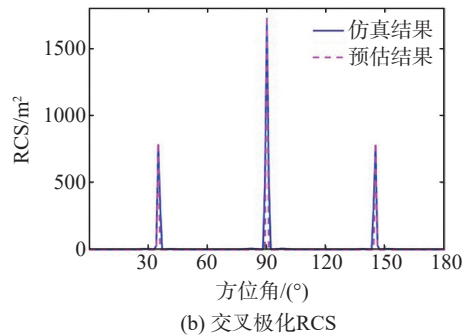
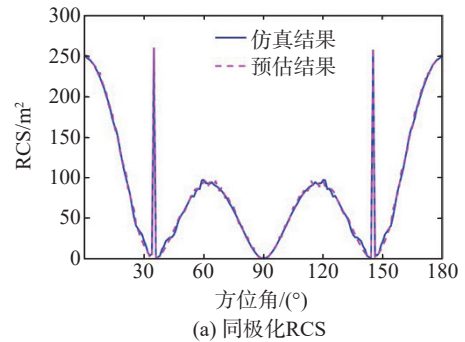


图8 预估结果与仿真结果RCS对比图

当入射波方位角 $\varphi = 35^\circ$ 时, $X'Y'Z'$ 坐标系中 $\theta' = 55^\circ$ 、 $\varphi' = 45^\circ$,此时满足第2种二次反射条件;当 $\varphi = 90^\circ$ 时, $\theta' = 90^\circ$ 、 $\varphi' = 90^\circ$,此时满足第1种二次反射条件;当 $\varphi = 145^\circ$ 时, $\theta' = 125^\circ$ 、 $\varphi' = 135^\circ$,此时满足第2种二次反射条件。由图8可知,以上三种情况下,出现了明显的交叉极化RCS,而在其它方位角下则只能观察到同极化RCS,这一结果与前文的分析相符。将仿真结果与预估结果进行对比,两种计算结果在数值上十分接近,同极化RCS平均误差仅 2.78 m^2 ,交叉极化RCS平均误差仅 10.72 m^2 ,这证明了上述方法对于双棱锥型角反射器的全极化RCS预估是切实

有效的。

5 结 论

本文针对双棱锥型角反射器的 RCS 预估问题,分析了入射波射线在腔体内表面的反射情况,发现只有当二次反射发生时,才存在明显的交叉极化回波分量。随后本文在传统三角形三面角反射器的 GO/AP 预估法基础上,对入射波沿腔体边缘入射时有效反射面积的计算进行了改进,建立了针对双棱锥型角反射器的全向 RCS 预估方法,并通过 CST 电磁仿真软件进行了同参数的仿真对比,两种方法得到的 RCS 数值结果平均误差仅 11.92 m^2 ,证明了该预估方法的有效性。本文最后重点考虑了角反射器姿态对入射波相对入射方向及相对极化方向的影响,给出了任意姿态下的双棱锥型角反射器全极化 RCS 预估方法。通过 CST 仿真对比,得到了同极化 RCS 平均误差仅 2.78 m^2 、交叉极化 RCS 平均误差仅 10.72 m^2 的结论,进一步证明了全极化 RCS 快速预估方法的有效性。

本文提出的全极化 RCS 预估方法,主要适用于双棱锥型角反射器的散射特性分析,重点借助旋转矩阵矢量变换公式以及有效反射面积计算公式完成 RCS 的预估工作,过程简单,计算效率高,并且将特殊入射情况下存在的交叉极化分量考虑在内,弥补了 GO/AP 法极化信息丢失的问题。该方法有助于实现浮空式角反射器阵列 RCS 的快速预估,当角反射器阵列内所有角反射器的姿态已知时,只需将该预估方法与散射中心合成法相结合,即可快速计算角反射器阵列整体的全向全极化 RCS。

[参 考 文 献]

- [1] 张俊,胡生亮,范学满,等.基于 HRRP 和 PA 的浮空式角反射器布放态势寻优[J].战术导弹技术,2018,(3):105-109.
- [2] Feng B, Chen B, Liu H. Radar HRRP target recognition with deep networks[J]. Pattern Recognition, 2017, 61: 379-393.
- [3] 张俊,胡生亮,刘泰邑,等.基于探索性分析的浮空式角反射器质心干扰使用研究[J].战术导弹技术,2019,(4):13-19.
- [4] 张林,胡生亮,胡海.舰载充气式角反射器装备现状与战术运用研究现状[J].兵器装备工程学报,2018,39(6):48-51.
- [5] Joon T H, Suk Y H, Jee H S, et al. Radar cross section analysis using physical optics and its applications to marine targets[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2015, 3(2):161-171.
- [6] Maxim S, Alexei S, Alexander K. Highly parallel fast KD-tree construction for interactive ray tracing of dynamic scenes[J]. Computer Graphics Forum, 2007, 26(3):395-404.
- [7] 范学满,胡生亮,贺静波.一种角反射器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.
- [8] 范学满,胡生亮,罗亚松,等.海上角反射器群的 RCS 快速混合预估算法[J].系统工程与电子技术,2016,38(11):2462-2467.
- [9] 张俊,胡生亮,王聘,等.基于 PO/AP 的角反射器 RCS 模型构建及分析[J].系统工程与电子技术,2018,40(7):1478-1485.
- [10] 吴志威,徐乐.腔体目标的 SBR 算法研究[C].全国微波毫米波会议,广州,2019-5-19.
- [11] 胡生亮,罗亚松,刘忠.海上多角反射器群雷达散射面积的快速预估算法[J].海军工程大学学报,2012,24(4):76-79.