

# 基于改进SBR的舰船SAR成像快速仿真计算方法

章琪琪<sup>1,2</sup>, 张寅<sup>1,2\*</sup>, 范君杰<sup>3</sup>, 夏翀翔<sup>1,2</sup>, 闫钧华<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学空间光电探测与感知工业和信息化部重点实验室, 江苏南京 211106;  
2. 南京航空航天大学航天学院, 江苏南京 211106; 3. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

**摘要:** 针对SAR(Synthetic Aperture Radar)舰船成像仿真应用中电磁散射特性计算效率低下的问题,在现有SBR(Shooting and Bouncing Rays)算法的基础上,本文提出两方面改进. 一是基于叶节点空间邻域编码搜索的射线管相交面元检测算法,通过只追踪射线管中心射线并搜索叶节点空间周围潜在相交面元,在有效提升相交检测速度的同时避免遗漏相交面元;二是射线管三角剖分快速分裂算法,将射线管和相交面元投影至射线管虚拟孔径面,利用Delaunay三角剖分算法自适应地将射线管快速分裂成连续的子射线管. 对典型舰船目标进行RCS(Radar Cross Section)计算及SAR成像仿真实验,结果表明,在保证计算精度的前提下,本文方法计算效率比Kd树(K-dimension tree)加速SBR方法提升14倍以上,比经典自适应射线管分裂SBR方法提升3倍以上,计算效率显著提高.

**关键词:** SAR成像仿真; SAR回波仿真; 舰船RCS计算; 弹跳射线法; 自适应射线管分裂

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费(No.NJ2022025)

**中图分类号:** O441.4; O451; TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)02-0602-12

**电子学报URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20221046

## A Fast SAR Imaging Simulation Method of Ship Targets Based on Improved SBR

ZHANG Qi-qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yin<sup>1,2\*</sup>, FAN Jun-jie<sup>3</sup>, XIA Chong-xiang<sup>1,2</sup>, YAN Jun-hua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China;  
2. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China;  
3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low efficiency of electromagnetic scattering characteristics calculation in synthetic aperture radar (SAR) ship imaging simulation applications, two points of improvement based on the existing shooting and bouncing rays (SBR) technique are proposed in this work. Firstly, a ray tube intersecting surface panel detection algorithm with leaf node spatial neighborhood coding search is constructed, which effectively improves the intersection detection speed while avoiding missing intersecting panels by tracing only the center ray of the ray tube and searching for potential intersecting panels around the leaf node space. Secondly, a fast splitting technique for ray tube triangulation is introduced to project the ray tube and the intersecting panels to the ray tube's virtual aperture surface, and adaptively split the ray tube into consecutive sub-ray tubes by using the Delaunay triangulation algorithm. Finally, the radar cross section (RCS) calculation and SAR imaging simulation experiments are carried out on typical ship targets. The experimental results show that under the premise of ensuring the accuracy, the efficiency of the proposed method is improved by more than 14 times than that of the Kd (K-dimension) tree accelerated SBR and by more than 3 times compared with the classical adaptive ray tube splitting SBR, showing that the computational efficiency is significantly promoted.

**Key words:** synthetic aperture radar (SAR) imaging simulation; SAR echo simulation; radar cross section (RCS) calculation of ship targets; shooting and bouncing rays (SBR); adaptive ray tube splitting

**Foundation Item(s):** Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.NJ2022025)

## 1 引言

开展舰船合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像仿真是获取海上高价值目标电磁散射特性的高效低成本手段,在支撑载荷指标论证、目标识别算法设计等方面具有重要的应用价值.舰船目标表面一般具有复杂结构,且舰船姿态随海浪不断变化,舰船自身的散射场以及舰船和海面的耦合散射场也在快速变化.因此,在仿真海面舰船目标时需要对目标表面结构和目标与海面之间的多次散射进行快速计算.

对于舰船等复杂目标,国内外学者提出了许多电磁仿真算法.一些学者引入光学领域的概念来进行电磁散射的计算.2016年德国宇航局的Auer等人<sup>[1]</sup>开发RaySAR软件,采用镜面反射和漫反射模型来仿真目标对雷达信号的反射,此方法难以设置合适的目标表面仿真参数.2021年,中国科学院大学的牛胜仁<sup>[2]</sup>利用深度神经网络从真实图像中提取仿真参数以用于RaySAR的仿真,该方法需要从目标真实图像采样,且随着目标材质的增多,数据集中的样本数成本也会增加.在传统低频算法方面,矩量法(Method of Moments, MoM)<sup>[3]</sup>、多层快速多极子法(MultiLevel Fast Multipole Method, MLFMM)<sup>[4,5]</sup>、有限元法(Finite Element Method, FEM)<sup>[6]</sup>等算法精度较高,但会耗费大量的内存和时间.相较于低频算法,几何光学法(Geometrical Optics, GO)和物理光学法(Physical Optics, PO)等高频近似算法效率较高.然而,GO只能计算镜面反射场,PO未考虑电磁波在目标表面的多次反射.以弹跳射线法(Shooting and Bouncing Rays, SBR)<sup>[7-9]</sup>为代表的GO-PO混合方法<sup>[10-12]</sup>结合了GO和PO的优点,被广泛应用于电大尺寸复杂目标的电磁散射计算.

为满足计算精度要求,SBR划分矩形射线管的横截面边长通常小于十分之一波长,所以对于舰船这类目标而言,SBR方法生成射线管的数目巨大,限制了计算速度.目前,提高SBR方法计算效率的思路主要分为两种.第一种是利用空间数据结构进行加速计算.利用数据结构加速的方法<sup>[13-17]</sup>对目标表面划分的面元建立Kd树(K-dimension tree)或八叉树的空间数据结构,为每一个面元分配一个用于快速索引的空间地址,从而在进行射线管与面元相交检测时剔除大量不必要的相交检测,实现对相交面元的快速检索.这类方法适用于舰船这类面元数量较多的电大尺寸目标,能有效提高SBR方法的计算效率;但是对面元建立八叉树结构时,可能会出现面元跨越两个叶节点空间(以下简称叶空间)的情况,由于面元的归属问题导致相交面元的遗漏.第二种是减少射线管的数量.该方法主要利用射线管分裂<sup>[18-22]</sup>的思想:首先在虚拟孔径面上均匀划分较大的射线管,当射线管打到目标上且需要分裂时再

将射线管进行分裂,生成若干较小的子射线管;在剔除与目标不相交的子射线管后,对剩下的射线管进行射线追踪并迭代,直到射线管离开目标或射线管横截面小于一定阈值.Asadi等人<sup>[20]</sup>提出的自适应射线管分裂方法根据目标面元的划分,自适应地将虚拟孔径分割成连续的子射线管,极大程度上减少了射线管的数量.然而基于矩形射线管的分裂算法,分裂出的子射线管仍然存在与目标面元边界不匹配的问题.Asadi等人<sup>[20]</sup>的方法虽然能将射线管分裂为三角形,但该方法除需要多次计算边与边的交点外,还需要多次判定裁剪边两个端点的位置来确定裁剪多边形顶点的保留或剔除,增大了计算量.

为提高舰船SAR成像仿真中SBR计算效率,本文提出两个改进算法:一是基于叶空间邻域编码搜索的射线管相交面元检测算法,该算法通过只追踪射线管中心射线并搜索叶空间周围潜在相交面元,在有效提升相交检测速度的同时避免遗漏相交面元;二是射线管三角剖分快速分裂算法,该算法将射线管和相交面元投影至射线管虚拟孔径面,利用Delaunay三角剖分算法<sup>[23]</sup>自适应地将射线管快速分裂成与目标面元边界相匹配的连续子三角射线管.

## 2 舰船SAR成像仿真中SBR的计算效率与改进

### 2.1 SBR在舰船SAR成像仿真中的计算效率问题

SBR<sup>[7-9]</sup>通过模拟射线管的传播和反射来计算目标的电磁散射特性,具有计算精度高、易实现等优点.然而,由于以下两方面原因,SBR在舰船SAR成像仿真中存在严重的计算效率问题.

(1)射线数量多.图1为不同尺寸的射线管与面元相交示意图.射线管若尺寸较大,则与面元边界不匹配,难以模拟面元边界的反射射线,而较小的射线管可以较好地匹配面元边界.此外,在远场散射问题中,射线的传播可视为由垂直于入射方向的等相面发射并沿入射方向辐射的过程.为满足匹配面元边界和射线管截面内近似等相位的要求,通常射线管的截面尺寸需小于波长的十分之一<sup>[24]</sup>.目前,广泛应用于海面观测的C波段雷达<sup>[25]</sup>,其工作波长在3.75~7.5 cm.而以图2(b)中的驱逐舰为例,其长度可达155 m,宽度可达20 m.若计算目标高度角90°处的雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS),理论上需发射射线管数量 $N_{\text{ray}}$ 约为(取波长为5 cm)

$$N_{\text{ray}} = \frac{155 \text{ m}}{5 \text{ cm}/10} \cdot \frac{20 \text{ m}}{5 \text{ cm}/10} = 1.24 \times 10^8 \quad (1)$$

因此,SBR应用于舰船的RCS计算时需要发射并追踪大量的射线管.

(2)面元数量多. 为保证建模精度,尺寸越大、越复杂的目标,其面元数量就越多. 而舰船体型较大,且一般拥有多个塔台、天线等复杂结构,因此舰船模型的面元数量一般较多.

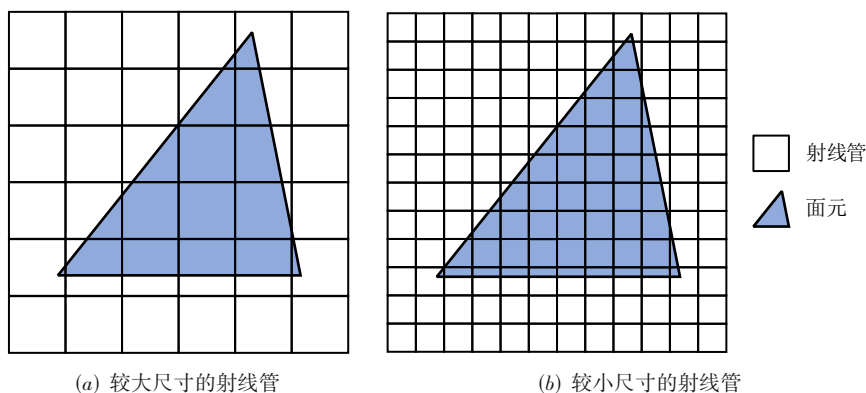


图1 不同尺寸的射线管与面元相交示意图

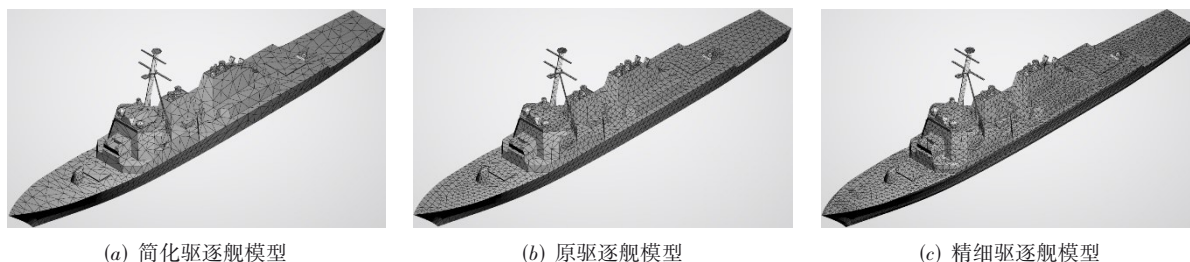


图2 不同面元数量的某驱逐舰模型

常见的面元相交检测算法,如计算机图形学中经典的 Möller-Trumbore 射线三角相交算法<sup>[26]</sup>,求解每条射线的相交面元时都需要遍历所有面元,判断它们是否与射线有交点,然后求出并比较所有相交面元的交点至射线源的距离,最后以最短距离的交点所对应的面元为该射线的相交面元. 图2为某驱逐舰模型及其简化模型和精细模型,3种模型的面元数分别为3 592, 7 184, 14 350. 在距离驱逐舰 10 km、方位角 $0^\circ$ 、高度角 $45^\circ$ 处向驱逐舰所在区域发射不同数量的射线,记录不同面元数量和射线数量条件下,使用 Möller-Trumbore 算法进行一次、三次反射相交检测的耗时,结果如图3所示. 由图3可知,模型面元数和发射的射线数越多,相交检测所耗费的时间越长. 综上所述,尺寸大、结构复杂、面元数多的舰船极大地限制了SBR中射线相交检测的效率.

## 2.2 基于叶空间邻域编码搜索的射线管相交面元检测

针对SBR中相交检测效率的问题,目前广泛使用的加速策略是对目标面元建立空间树状结构<sup>[13-17]</sup>,通过对包围盒逐级做射线相交检测,快速排除与射线不相交的包围盒中的面元,而无需对所有面元进行遍历. 尤其是对于舰船这种面元数量多的大型目标,建立空

间树状结构能有效提高相交检测的效率.

八叉树是射线追踪算法中常用的一种空间数据结构<sup>[14-16]</sup>,以物体最小面元作为叶空间划分依据,每个叶空间至多包含1个面元中心. 如图4(a)所示, $A, B, C$ 三个面元中心分别隶属于叶空间 $V_3, V_1$ 和 $V_0$ . 但在舰船SAR成像仿真的实际应用中,存在某个面元部分超出当前叶空间的情况,如图4(b)中的 $C$ 面元.  $C$ 面元的中心属于 $V_0$ 叶空间,因此 $C$ 面元被判定归属于 $V_0$ 叶空间,即 $J(C \in V_0) = \text{True}$ , $J(\cdot)$ 表示算法判断的结果. 但 $C$ 面元仍有部分位于红色 $V_3$ 叶空间: $C \cap V_3 \neq \emptyset$ . 且 $C$ 面元和紫色面元的部分反射射线 $R_2$ 在 $V_3$ 叶空间中相交: $C \cap R_2 = V_3$ . 紫色面元的反射射线 $R$ 只与 $V_3$ 叶空间相交,而不与 $V_0$ 叶空间相交: $R \cap V_0 = \emptyset$ . 因此,八叉树相交检测的结果排除了其他叶空间面元,只保留了 $V_3$ 叶空间中的红色 $A$ 面元: $R \cap V_0 = \emptyset \Rightarrow J(R \cap C = \emptyset) = \text{True}$ ,出现了相交面元遗漏的情况. 对于舰船等结构复杂且面元数量多的目标,容易出现这种面元跨越多个叶空间的现象,进而引起相交检测精度的下降.

针对八叉树加速相交检测算法用于舰船等目标出现的精度下降问题,本文提出一种基于叶空间邻域编码搜索的射线管相交面元检测方法,要求建立的叶空间尺度与面元尺寸接近,但不限制只包含1个面元中

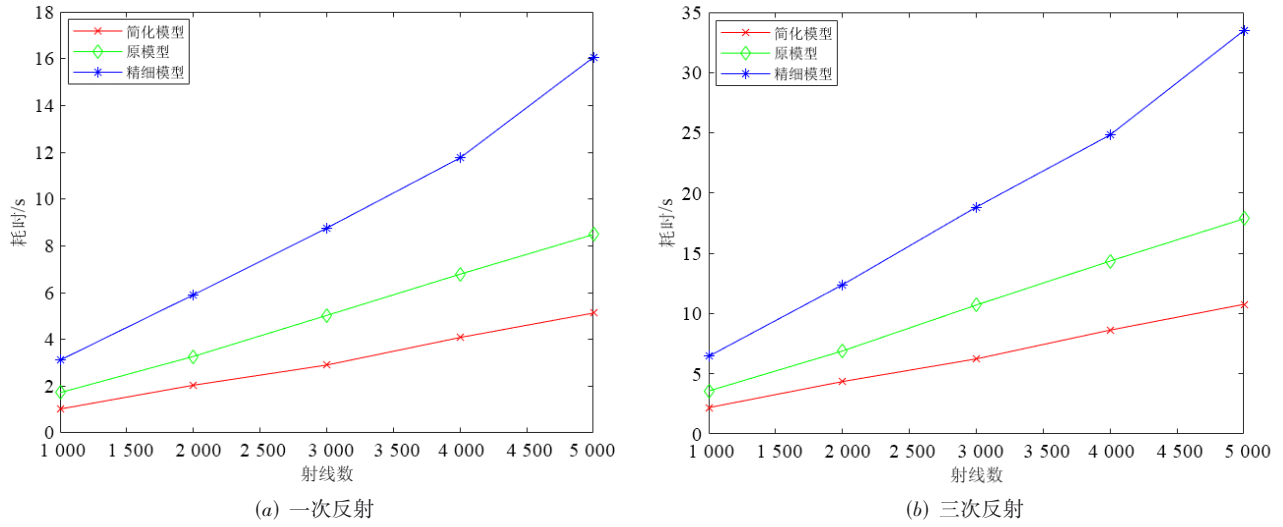


图3 不同面元数量和射线数量条件下的一次、三次反射相交检测耗时

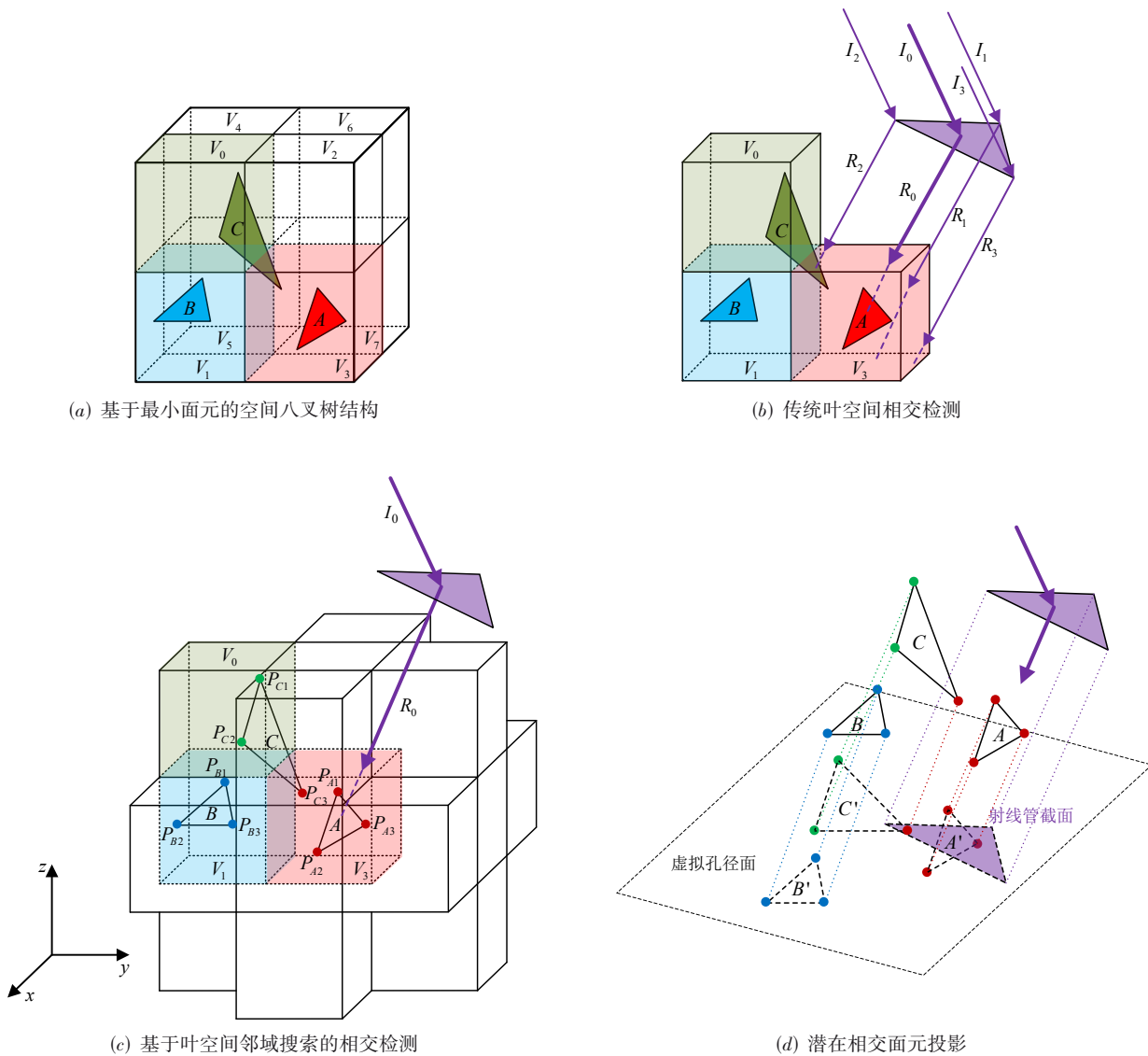


图4 传统基于面元的八叉树和本文基于顶点的八叉树示意图

心,有效减少八叉树冗余分支数量.图4(c)为 $V_3$ 叶空间及其十八邻域叶空间,进行射线管相交检测后,以相交面元中心及其反射射线 $R_0$ 作为下一轮射线追踪的起点和新射线管的中心射线,大幅减少追踪射线的数量,并通过后续的操作避免了面元相交检测的遗漏:检测到射线管与叶空间 $V_3$ 相交,即 $R_2 \cap V_3 \neq \emptyset$ ,然后检索相交叶空间 $V_3$ 及其十八邻域内顶点( $P_{Ai}, P_{Bi}, P_{Ci}, i=1, 2, 3$ )组成的潜在相交面元( $A, B, C$ ).然后,将这些潜在相交面元投影到与射线管垂直的虚拟孔径面上,进行射线管分裂并判断实际相交面元,如图4(d)所示.

为实现图4(c)中叶空间十八邻域的快速搜索,使用八进制 Morden 码对所有叶空间进行编码,通过编码转换运算大幅提高搜索效率.如图5所示,若八叉树层数为 $N_o$ ,则叶空间编码记为 $Q=q_1q_2q_3 \cdots q_{N_o-1}q_{N_o}$ ( $q_1, q_2, q_3, \cdots, q_{N_o-1}, q_{N_o}$ 均为0~7之间的整数),将叶空间编

码的末两位 $q_{N_o-1}$ 和 $q_{N_o}$ 转化为二进制 $f_x f_y f_z$ :

$$q_{n_o} = 4f_x + 2f_y + f_z, \quad n_o = N_o - 1 \text{ or } N_o \quad (2)$$

以图4(c)中的叶空间 $V_3$ 为例,设其编码为 $Q=225$ ,则 $N_o=3, q_{N_o-1}=2=(010)_2, q_{N_o}=5=(101)_2$ .首先计算 $V_3$ 的6个共面邻域叶空间(前后、左右、上下)的编码(即221,261,207,227,224,234):对 $q_{N_o-1}$ 和 $q_{N_o}$ 中的 $f_y$ 进行非运算,记为( $\sim f_y$ ),变换后的编码为 $q_{n_o,y} = 4f_x + 2(\sim f_y) + f_z$ ,即 $q_{N_o-1,y} = 4 \times 0 + 2 \times 0 + 0 = 0, q_{N_o,y} = 4 \times 1 + 2 \times 1 + 1 = 7$ .则编号为 $Q=q_1q_2q_3 \cdots q_{N_o}$ 的叶空间 $V_3$ 的左右相邻叶空间分别为 $Q'_y = q_1q_2q_3 \cdots q_{N_o-1,y}q_{N_o,y} = 207$ (即 $V_1$ 的编号)和 $Q''_y = q_1q_2q_3 \cdots q_{N_o-1}q_{N_o,y} = 227$ ;同理,其前后和上下相邻叶空间编号可分别对 $f_x$ 和 $f_z$ 进行(0-1)变换得到. $V_0$ 等共单边邻域叶空间编码则可以通过对共面邻域叶空间 $V_1$ 进行上述运算获得.

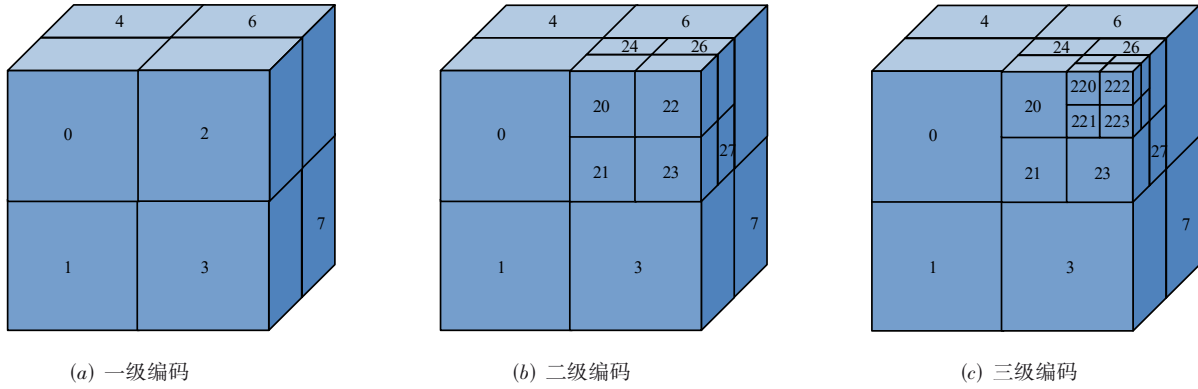


图5 叶空间编码示意图

### 2.3 虚拟孔径面射线管三角剖分快速分裂

由于舰船等目标模型一般使用三角形面元进行拟合,图6(a)所示的传统SBR方法生成矩形射线管数量过多且无法很好匹配目标面元边界. Asadi 等人<sup>[20]</sup>提出了一种自适应射线管分裂方法,如图6(b)所示.对于每一条射线管,将其截面和所有潜在相交面元投影到垂直于该射线管的虚拟孔径面上,使用 Sutherland-Hodegman(以下简称S-H)多边形裁剪算法<sup>[27]</sup>对射线管进行自适应分割. S-H算法的基本思想是用裁剪窗口(射线管截面)的每条边界(包括延长线)对面元进行裁剪.保留裁剪窗口边界内侧的面元顶点,删除外侧的顶点,适时地将交点和窗口顶点插入作为新的顶点,最终获得裁剪窗口与面元重叠部分的多边形区域.相较于传统SBR方法,自适应射线管分裂方法划分的射线管数量更少且更贴合目标面元的边界,但S-H算法在裁剪过程中,除了需要多次计算边与边的交点外,还需要多次判定裁剪边两个端点的位置来确定裁剪多边形顶点的保留或删除,增大了计算量.

本文使用 Delaunay 三角剖分算法<sup>[23]</sup>代替S-H算法来进行射线管快速分裂,如图7所示.其中, $B_1, B_2, B_3$ 为射线管横截面三角形的顶点,其在虚拟孔径面上的投影为 $B'_1, B'_2, B'_3$ ,点 $A_1 \sim A_7$ 为经过第2.2节提出的相交检测算法后得到的潜在相交面元顶点,其在虚拟孔径面上的投影为 $A'_1 \sim A'_7$ .在虚拟孔径面上计算面元和射线管边界投影的交点并记为点集 $P_1 = \{C'_1, C'_2, C'_3, C'_4, C'_5\}$ ,射线管投影边界内的面元顶点投影记为点集 $P_2 = \{A'_i\}$ ,射线管投影的三个顶点记为点集 $P_3 = [B'_1, B'_2, B'_3]$ .将点集 $P_1, P_2, P_3$ 组成二维点集 $P$ :

$$P = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \quad (3)$$

对 $P$ 使用Delaunay算法构造三角形网格,这些三角形网格即为分裂后射线管的横截面,结合射线方向即可得到分裂后的射线管.

若虚拟孔径面上存在 $N_f$ 个三角形面元、 $N_l$ 条面元边和 $N_v$ 个面元顶点.基于S-H算法的射线管分裂方法每次使用一个三角面元对射线管进行裁剪,每次裁剪时需要分别计算 $N_f$ 个三角形面元的3条边和射线管3

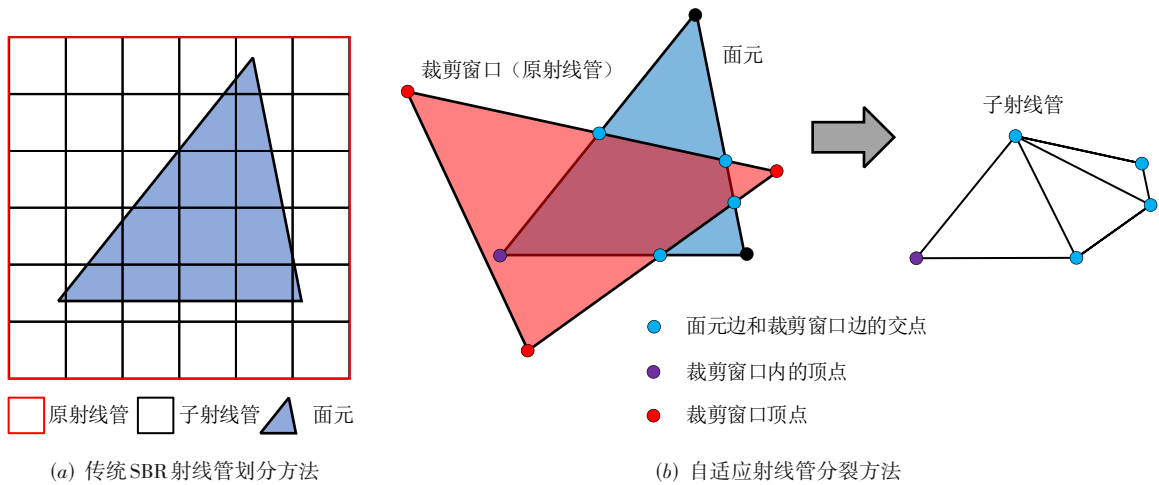


图6 传统SBR射线管划分方法和自适应射线管分裂方法比较

条边界之间的交点,并判断交点是否在射线管截面内,需  $3N_f \times 3 = 9N_f$  次相交运算和  $9N_f$  次位置判断运算;还需要分别判断  $N_f$  个三角形面元的3个顶点是否在射线管截面内,需  $3N_f$  次位置运算. 共需要  $9N_f$  次相交运算和  $12N_f$  次位置判断运算. 本文方法需要计算所有面元边与射线管的交点,需  $3N_l$  次相交运算;还需对  $3N_l$  个交点和  $N_v$  个面元顶点的位置进行一次判定,需要  $3N_l + N_v$  次位置判断计算.

通常情况下,虚拟孔径面上的面元存在边和顶点重合的情况,因此  $N_l < 3N_f, N_v < 3N_f$ , 则  $3N_l < 9N_f$  且  $3N_l + N_v < 12N_f$ . 以图7所示情况为例,虚拟孔径面上存在  $N_f = 6$  个三角形面元、 $N_l = 12$  条面元边和  $N_v = 7$  个面元顶点. S-H算法需要  $9N_f = 54$  次相交运算和  $12N_f = 72$  次位置判断运算;而本文方法只需要进行  $3N_l = 36$  次相交运算和  $3N_l + N_v = 43$  次位置判断运算,能够大幅提高SBR射线管分裂效率,从而实现舰船的快速电磁散射特性计算.

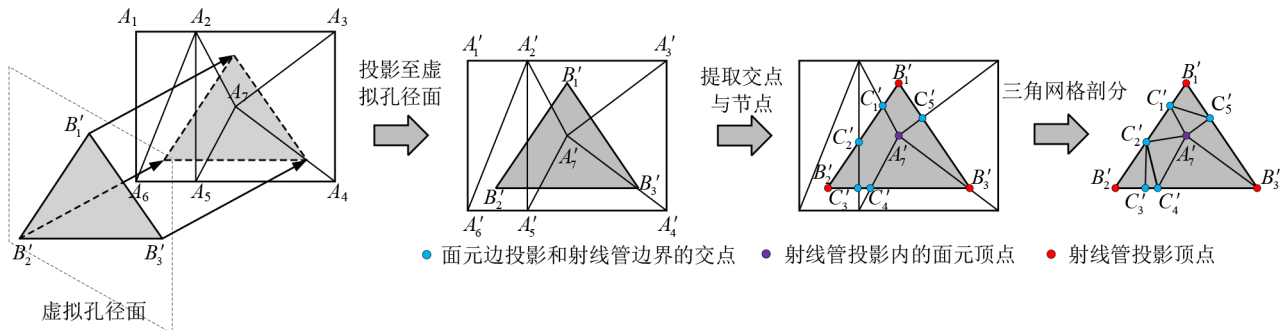


图7 基于三角剖分的自适应射线管分裂示意图

### 3 基于改进SBR的舰船SAR成像仿真方法

#### 3.1 基于改进SBR的舰船SAR成像仿真流程

基于改进SBR的舰船SAR成像仿真流程如图8所示. 首先,建立舰船目标的三维模型,设置仿真的载荷和平台参数. 然后,根据仿真分辨率的要求,将目标面元划分为合适的尺寸. 使用基于八叉树邻域搜索和三角剖分自适应射线管分裂的改进SBR计算目标面元的回波,具体流程为:根据仿真参数生成初始射线管,并对目标面元顶点建立八叉树结构,利用第2.2节的方法进行射线管和面元的快速相交检测;若

射线管与面元相交,则利用第2.3节的方法进行射线管分裂,生成新的子射线管;追踪子射线管的反射和传播路径,进行新一轮的相交检测和分裂运算,若无射线管与面元相交或反射次数达到算法设定上限,则退出循环;根据面元可见性分析的结果判断哪些射线管能返回SAR传感器,并根据这些射线管最后一次反射时的强度、方向等数据计算散射场,得到回波数据;最后,使用经典的距离多普勒(Range Doppler, RD)成像算法<sup>[27,28]</sup>处理回波,得到舰船目标SAR仿真图像.

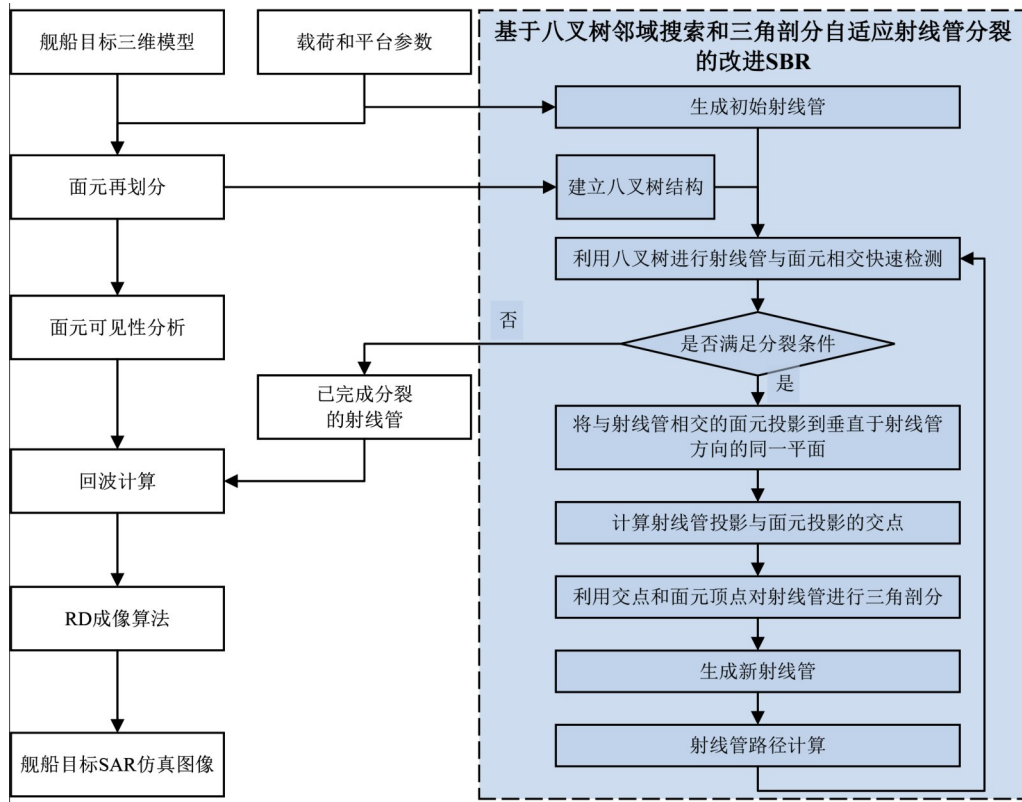


图8 舰船目标SAR成像仿真流程

### 3.2 舰船目标SAR原始回波数据仿真

进行目标回波计算时,基于自适应射线管分裂和面元可见性分析的结果,利用GO法计算舰船目标各面元的多次散射路径和场强,利用PO法计算可见面元的远场电磁散射. PO法计算射线管口径面远场散射  $E_s$  的积分公式为

$$E_s(\mathbf{r}) = \frac{jk}{4\pi r} e^{-jkr} \int_S \left[ \mathbf{a} \times (\mathbf{M}_s(\mathbf{r}) + Z_0 \mathbf{a} \times \mathbf{J}_s(\mathbf{r})) \right] e^{jkr \cdot \mathbf{a}} dS \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{r}) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{n} \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}) = \mathbf{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{r}$  为口径面上点到观测点的矢量;  $\mathbf{M}_s(\mathbf{r})$  和  $\mathbf{J}_s(\mathbf{r})$  分别表示口径面上出射场的等效电磁流;  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  和  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$  分别表示口径面处的电场和磁场;  $\mathbf{a}$  是观测方向的单位矢量;  $Z_0$  是自由空间波阻抗;  $S$  是口径面的面积.

目标单个面元的回波信号  $s_r(t)$  可以表示为

$$s_r(t) = \sigma w^2 s(t - \tau) = \sigma w^2 \sum_{n=0}^N p(t - n \cdot \text{PRT} - \tau_n) \quad (7)$$

$$\tau_n = \frac{2R_s}{c} \quad (8)$$

其中,  $w$  表示雷达天线方向强度的加权系数;  $\tau_n$  表示第  $n$  个脉冲信号的回波延时; PRT(Pulse Repetition Time) 为雷达发射的线性调频脉冲信号的脉冲重复时间;  $R_s$  为

雷达与目标面元间的距离;  $\sigma$  为面元的 RCS, 表示为

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{r \rightarrow \infty} 2 \sqrt{\pi r} \frac{\mathbf{E}_s \cdot \mathbf{r}}{E} \quad (9)$$

将所有可见面元的回波信号  $s_r(t)$  叠加, 即可得到原始回波信号数据.

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验样本及参数设置

为验证算法对于各种尺寸和结构的舰船的适用性, 分别使用简易船(小型舰船)、某型号驱逐舰(中型舰船)和某型号航母(大型舰船)等典型舰船模型作为实验样本, 对其进行几何建模并对几何模型表面进行有限元划分. 舰船模型如图9所示.

简易船模型几何尺寸为  $100 \text{ m} \times 17.6 \text{ m} \times 17.8 \text{ m}$ , 面元数量为 4 472; 驱逐舰模型几何尺寸为  $153.4 \text{ m} \times 21.7 \text{ m} \times 38.8 \text{ m}$ , 面元数量为 7 195; 航母模型几何尺寸为  $333.2 \text{ m} \times 81.7 \text{ m} \times 74.1 \text{ m}$ , 面元数量为 5 998. 3种舰船模型表面均采用钢合金、铝合金、钛合金等良导体, 在 L~X 波段下趋肤深度约为  $1 \mu\text{m}$ , 且其表面的灰漆对电磁散射影响较小, 所以舰船表面所有的面元可以视为厚度为 0 的理想导体三角面.

进行仿真成像实验时, SAR 载荷和平台的参数设置参考文献<sup>[29]</sup>和哨兵一号 A 星(Sentinel-1A)<sup>[30]</sup>进行设置, 主要参数如表1所示.

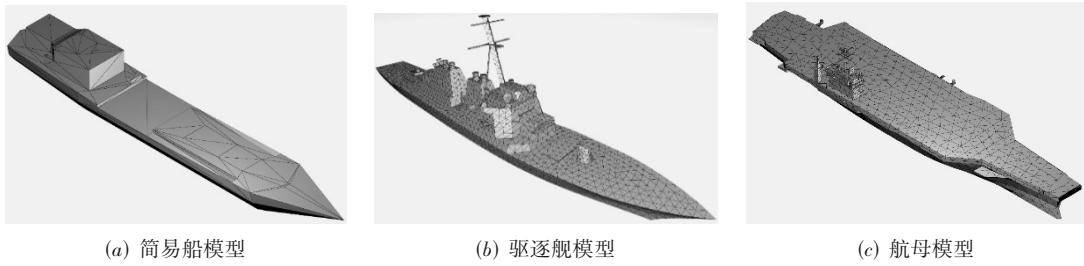


图9 舰船样本模型

表1 SAR载荷和平台参数设置

SAR平台速度	7 533 m/s
飞行高度	693 km
观测俯角	50°
中心频率	5.405 GHz
分辨率	2 m×2 m
脉冲时宽	5 μs

实验的计算平台参数: CPU为 Intel Core i7-9750H @ 2.60 GHz; GPU为 NVIDIA GeForce GTX 1650; 可用内存空间为 8 GB; 可用存储空间为 1 TB 固态硬盘; 操作系统为 win10 64位系统.

#### 4.2 精度对比实验

使用 Kd 树加速的经典 SBR (Kd-SBR) 方法<sup>[31]</sup> 和 Asadi 等人<sup>[20]</sup> 提出的自适应射线管分裂 (Adaptive Partition SBR, AP-SBR) 方法作为对比算法, 对本文方法进行评估验证. 其中, Kd-SBR 方法是经典的应用数据结构进行加速的 SBR 方法, 计算结果可作为对照标准. AP-SBR 方法采用基于 S-H 多边形裁剪算法的自适应射线管分裂技术, 划分的射线管数量少且与目标边界匹配, 具有良好的计算精度和效率, 是目前主流应用的 SBR 类方法.

##### (1) RCS 计算

以船头指向为  $x$  轴正方向建立直角坐标系, 定义如图 10 所示的观测方位角  $\theta$  和观测高度角  $\phi$ .

在  $f=5\text{ GHz}$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\phi=0\sim 180^\circ$  (每隔  $1^\circ$  采样) 条件下, 分别使用本文方法、Kd-SBR 方法和 AP-SBR 方法计

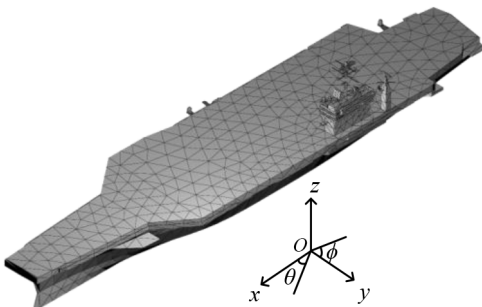
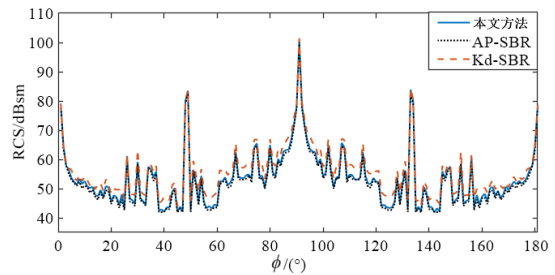
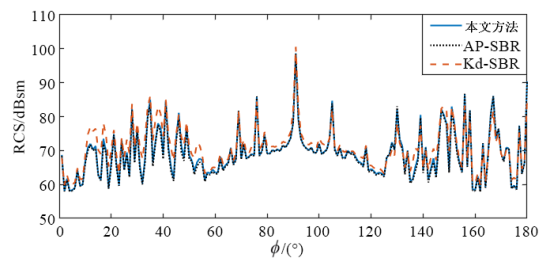


图10 坐标系及角度定义

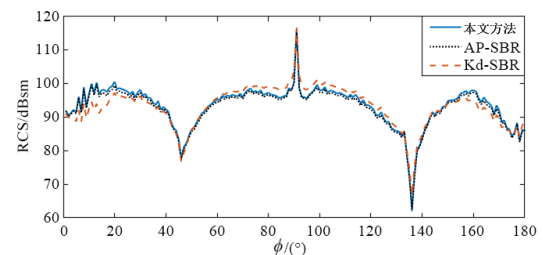
算 3 种舰船目标的 RCS 曲线, 计算结果如图 11 所示. 可以看出 3 种方法的计算精度相近, 计算结果十分吻合.



(a) 简易船模型



(b) 驱逐舰模型



(c) 航母模型

图11 3种模型 RCS 计算结果对比

以 Kd-SBR 方法作为基准, 对本文方法和 AP-SBR 方法计算精度进行比较, 以均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和相对均方根误差 (Relative Root Mean Square Error, RRMSE) 作为评价指标, 结果如表 2 所示. 其中, RMSE 可以表征 RCS 计算结果的绝对误

差,RRMSE可以表征RCS计算结果的相对误差,计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - H'_i)^2} \quad (10)$$

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(H_i - H'_i)^2}{H'_i}} \quad (11)$$

其中, $N$ 为数据样本点数, $H_i$ 为本文方法或AP-SBR方法的计算结果, $H'_i$ 为Kd-SBR方法的计算结果.

从表2可以看出,本文方法计算精度略优于AP-SBR方法,相对误差小于3%,能够保证舰船目标散射特性计算结果的有效性.

### (2) SAR 成像仿真

基于表1的SAR载荷和平台参数,分别对静止条件下的3种舰船模型进行SAR成像仿真,SAR回波和成像

表2 AP-SBR与本文方法RCS计算精度对比

方法	指标	简易船	驱逐舰	航母
AP-SBR方法	RMSE/dB	1.92	1.97	1.08
	RRMSE/%	3.15	2.90	1.16
本文方法	RMSE/dB	1.78	1.82	1.04
	RRMSE/%	2.92	2.68	1.12

仿真结果如图12和图13所示.可以看出,本文方法计算的舰船目标散射结果可以应用于舰船目标的SAR成像仿真,仿真结果与另外两种方法基本一致.仿真图像中高亮点为舰船目标表面散射较强处,主要分布于舰船目标面向探测器一侧的复杂结构处,如舰桥与甲板连接处等.使用RRMSE作为评价指标对本文方法和AP-SBR方法的仿真结果精度进行评估,结果如表3所示.本文方法计算精度略优于AP-SBR方法,相对误差小于3%,能够保证舰船目标仿真成像的有效性.

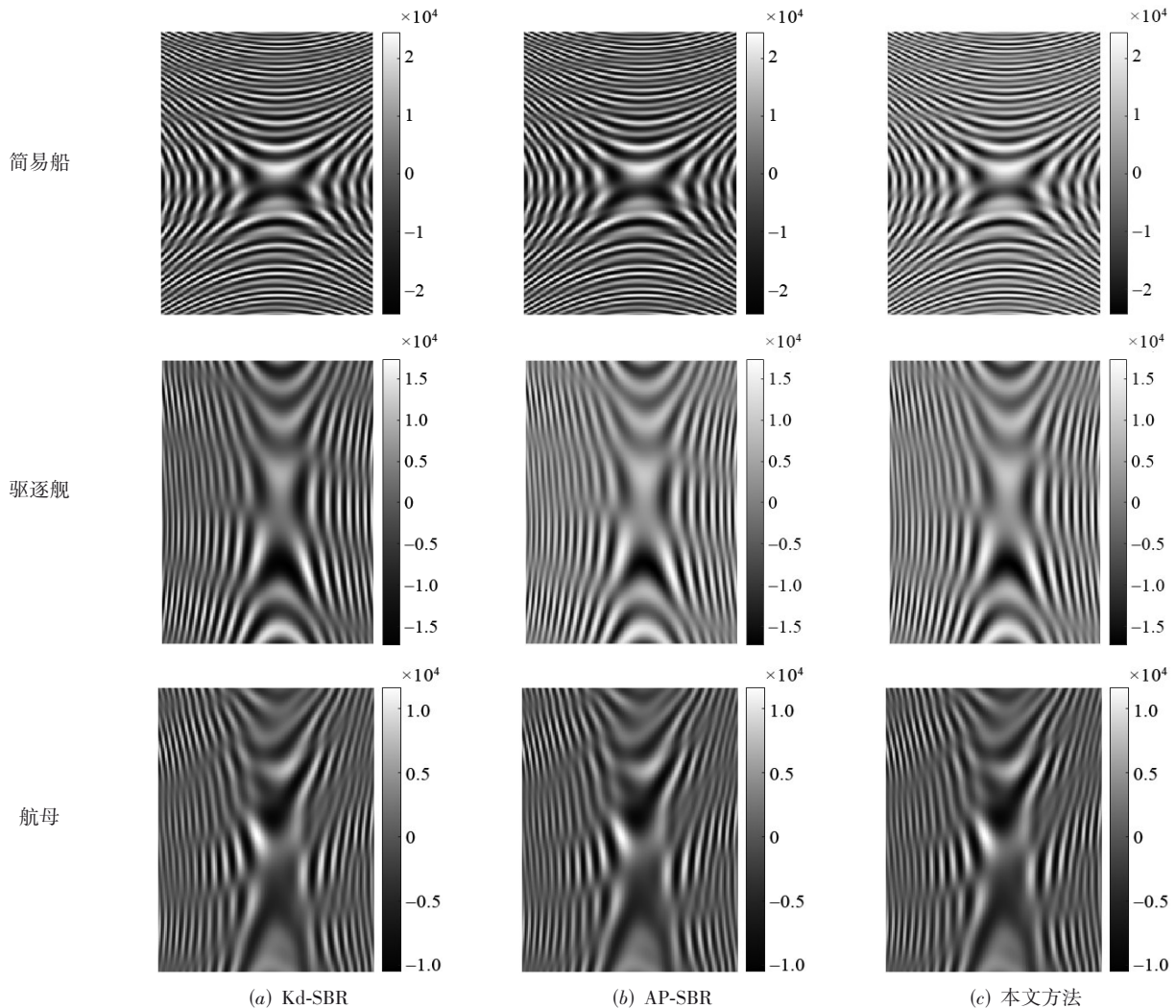


图12 SAR回波(幅度)仿真结果对比

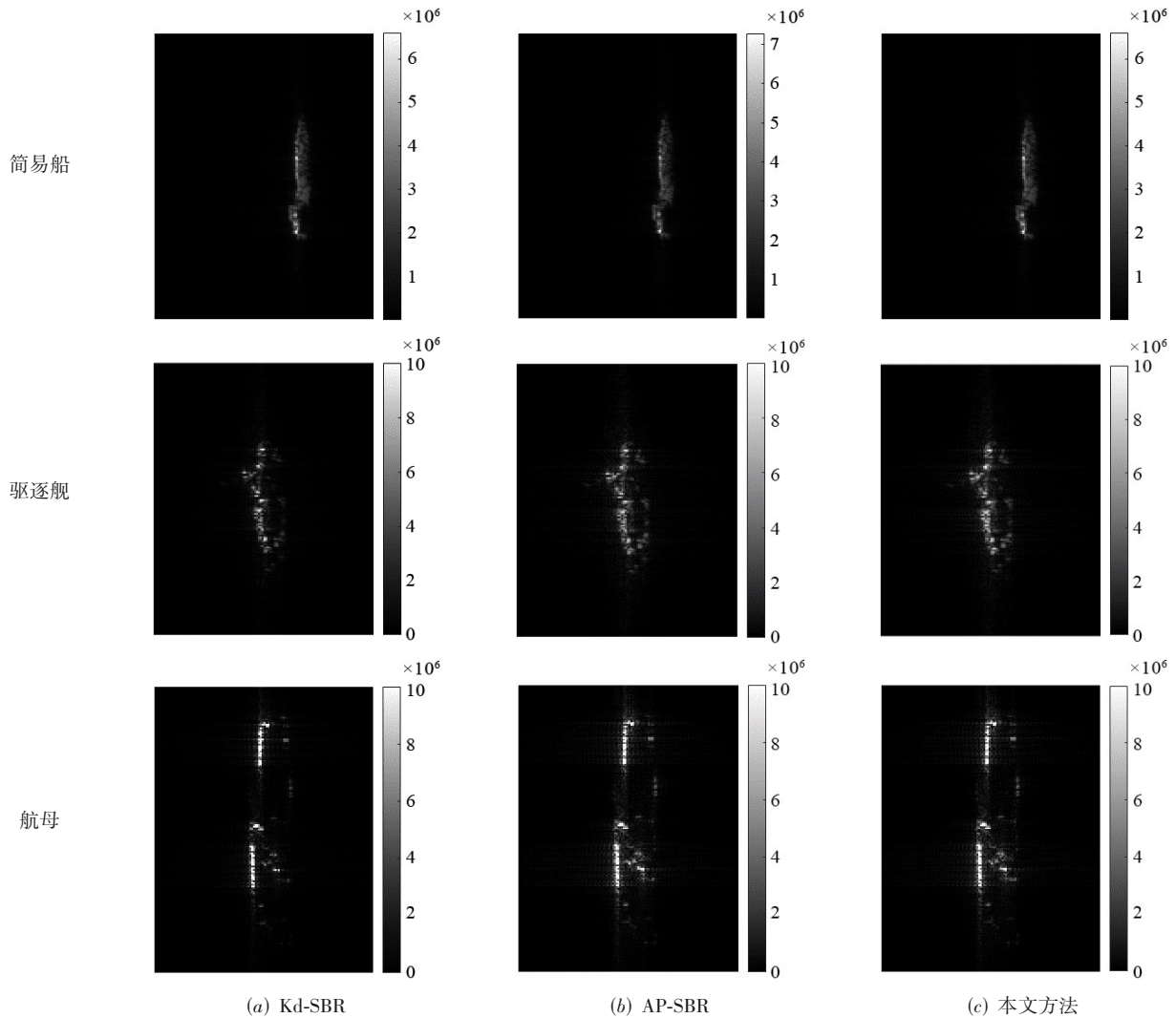


图 13 SAR 仿真成像结果对比

表 3 AP-SBR 与本文方法成像仿真精度对比 单位:%

方法	误差类型	模型		
		简易船	驱逐舰	航母
AP-SBR 方法	回波误差	3.07	3.20	1.74
	成像误差	2.86	2.97	1.51
本文方法	回波误差	2.99	2.95	1.60
	成像误差	2.53	2.74	1.38

表 4 Kd-SBR, AP-SBR 和本文方法计算效率对比

模型	面元数	方法	射线管数量/万	计算时间/h	时间加速倍数
简易船模型	4 472	Kd-SBR	530.51	1.84	20.44
		AP-SBR	0.76	0.28	3.11
		本文方法	0.78	0.09	1.00
驱逐舰	11 842	Kd-SBR	753.48	2.89	14.45
		AP-SBR	1.79	0.73	3.65
		本文方法	1.84	0.20	1.00
航母	18 598	Kd-SBR	1 496.16	4.13	16.52
		AP-SBR	2.20	0.77	3.08
		本文方法	2.21	0.25	1.00

### 4.3 效率对比实验

表 4 给出了 Kd-SBR 方法、AP-SBR 方法和本文方法的计算效率比较结果. 本文方法生成的射线管数量略多于 AP-SBR 方法. 因为当一根射线管只有部分与目标面元相交时, AP-SBR 只裁剪相交的部分, 不对剩余部分进行裁剪, 而本文方法通过三角剖分将整根射线管完全分裂, 使射线管总数略有增加. 但本文方法使用三角剖分算法代替 AP-SBR 方法中的 S-H 算法, 有效提高了裁剪效率. 同时, 本文方法在进行射线管与目标面元

的相交检测时, 只需追踪每根射线管的中心射线, 而非 AP-SBR 方法的 4 条射线, 在保证精度的同时大幅提高相交检测的计算速度. 本文方法综合计算效率达到 AP-SBR 的 3 倍以上, Kd-SBR 的 14 倍以上. 在 3 种舰船

模型中,驱逐舰表面结构最为复杂,需要进行多次相交检测和射线管分裂操作,在计算其RCS时,本文方法计算效率相比AP-SBR方法提高了3.65倍,体现了在计算复杂表面多次散射时的效率优势。

## 5 结束语

为提高舰船目标SAR仿真应用中的雷达散射特性计算效率,本文对现有SBR方法提出两种改进:一是基于叶节点空间邻域编码搜索的射线管相交面元检测算法,该算法在有效提升相交检测速度的同时避免遗漏相交面元;二是射线管三角剖分快速分裂算法,该算法自适应地将射线管快速分裂成贴合面元形状的连续子射线管,大幅减少了所需射线管的数量。利用3种不同舰船模型进行了计算精度和效率对比实验,实验结果表明,本文方法精度与AP-SBR相当,与Kd-SBR相比RCS误差和成像仿真误差均保持在3%以下,能够保证散射特性计算与SAR成像仿真结果的有效性。在综合计算效率方面,本文方法优势显著,计算速度较AP-SBR提升3倍以上,较Kd-SBR提升14倍以上。且舰船表面多次散射过程越复杂,本文方法优势越明显。

本文算法只计算了目标表面面元的一次散射和多次散射,而未考虑目标边缘绕射和尖端绕射,所以对于边缘和尖端绕射场较强的目标,算法的精度还有待提升。今后将尝试引入物理绕射理论(Physical Theory of Diffraction,PTD)<sup>[32]</sup>等方法以计算绕射场。

## 参考文献

- [1] AUER S, BAMLER R, REINARTZ P. RaySAR—3D SAR simulator: Now open source[C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Piscataway: IEEE, 2016: 6730-6733.
- [2] 牛胜仁. 结合深度学习与电磁模型的SAR目标图像仿真方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.  
NIU S R. Research on SAR Target Image Simulation Method Combining Deep Learning and Electromagnetic Model[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [3] 周金霖, 陈锬山, 古琼昇, 等. 基于多次散射目标模型的雷达成像研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(S1): 132-140.  
ZHOU J L, CHEN K S, GU Q S, et al. Research on radar imaging based on multiple scattering target model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(S1): 132-140. (in Chinese)
- [4] HAO J W, SHENG X Q. Accurate and efficient simulation model for the scattering from a ship on a sea-like surface [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(12): 2375-2379.
- [5] HAO J W, SHENG X Q. Full-wave numerical simulation for scattering from a ship on a sea-like surface[C]//2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Piscataway: IEEE, 2018: 1-3.
- [6] 何红杰. 基于有限元方法的粗糙面与目标复合电磁散射快速混合算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.  
HE H J. Research on Fast Hybrid Algorithm for Composite Electromagnetic Scattering from Rough Surface and Target Based on FEM[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [7] LING H, LEE S W, CHOU R C. High-frequency RCS of open cavities with rectangular and circular cross sections [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(5): 648-654.
- [8] LING H, CHOU R C, LEE S W. Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(2): 194-205.
- [9] BILAL A, HAMZA S M, TAJ Z, et al. Comparison of SBR and MLFMM techniques for the computation of RCS of a fighter aircraft[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(10): 1805-1810.
- [10] LI J X, ZHANG M, JIANG W Q, et al. Improved FBAM and GO/PO method for EM scattering analyses of ship targets in a marine environment[J]. Sensors, 2020, 20 (17): 4735.
- [11] SHI F Y, LI Z Q, ZHANG M, et al. Analysis and simulation of the micro-doppler signature of a ship with a rotating shipborne radar at different observation angles[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1504405.
- [12] DONG C L, GUO L X, MENG X. An accelerated algorithm based on GO-PO/PTD and CWMFSM for EM scattering from the ship over a sea surface and SAR image formation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(5): 3934-3944.
- [13] FENG T T, GUO L X. An improved ray-tracing algorithm for SBR-based EM scattering computation of electrically large targets[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(5): 818-822.
- [14] JIN K S, SUH T I, SUK S H, et al. Fast ray tracing using A space-division algorithm for RCS prediction[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2006, 20(1): 119-126.

- [15] BURAL B, OZGUN O, YILMAZ A E, et al. GPU-accelerated shooting and bouncing ray method for inverse synthetic aperture radar imaging[C]//2022 32nd International Conference Radioelektronika. Piscataway: IEEE, 2022: 1-4.
- [16] LI J, MENG W, CHAI S R, et al. An accelerated hybrid method for electromagnetic scattering of a composite target-ground model and its spotlight SAR image[J]. Remote Sensing, 2022, 14(24): 6332.
- [17] HUANG Y, ZHAO Z Q, QI C H, et al. Fast point-based KD-tree construction method for hybrid high frequency method in electromagnetic scattering[J]. IEEE Access, 2018, 6: 38348-38355.
- [18] SUK S, SEO T I, PARK H S, et al. Multiresolution grid algorithm in the SBR and its application to the RCS calculation[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 29(6): 394-397.
- [19] TAO Y B, LIN H, BAO H J. Adaptive aperture partition in shooting and bouncing ray method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(9): 3347-3357.
- [20] ASADI Z, MOHTASHAMI V. Adaptive supersampling in shooting and bouncing ray method for efficient and accurate scattering prediction of electrically large objects [C]//2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Piscataway: IEEE, 2016: 1449-1453.
- [21] ZHAO G, SUN N W, SHEN S, et al. GPU-accelerated target strength prediction based on multiresolution shooting and bouncing ray method[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6119.
- [22] 董春雷. 基于SBR算法的海上目标复合电磁散射及SAR成像与识别研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.  
DONG C L. Investigation of Composite Electromagnetic Scattering from Targets on Sea Surface and SAR Imaging with Recognition Based on SBR[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [23] WATSON D F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes[J]. The Computer Journal, 1981, 24(2): 167-172.
- [24] 周礼来. 海面舰船近场电磁散射建模及GPU并行技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.  
Zhou Li-lai. Research on Near-field Scattering Modeling of Ship on the Sea and GPU Parallel Technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [25] ZHENG H L, KHENCHAF A, GHANMI H, et al. Normalized radar cross sections of sea surface estimated using asymptotic and semi-empirical methods in band[C]//IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE, 2018: 53-56.
- [26] MÖLLER T, TRUMBORE B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection[J]. Journal of Graphics Tools, 1997, 2(1): 21-28.
- [27] SUTHERLAND I E, HODGMAN G W. Reentrant polygon clipping[J]. Communications of the ACM, 1974, 17(1): 32-42.
- [28] WU C, LIU K Y, JIN M. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1982, AES-18(5): 563-575.
- [29] CUMMING I G, WONG F H. 合成孔径雷达成像算法与实现[M]. 洪文, 胡东辉, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [30] European Space Agency. User guides - Sentinel-1 SAR - stripmap - sentinel online - sentinel online[EB/OL]. [2023-02-13]. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/stripmap>.
- [31] 朱良, 曹鹏, 禹卫东. 基于移频干扰的成像算法抗干扰性能分析[J]. 电子学报, 2011, 39(S1): 47-51.  
ZHU L, CAO P, YU W D. Anti-jamming performance analysis of imaging algorithm based on frequency shift jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(S1): 47-51. (in Chinese)
- [32] UMUL Y Z. Modified theory of physical optics and the correction terms of the physical theory of diffraction[J]. Optik, 2018, 171: 421-430.

#### 作者简介



章琪琪 男, 1999 年出生, 浙江温州人. 2021 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生. 主要研究方向为图像仿真.

E-mail: 15167823385@163.com



张寅 男, 1986 年出生, 江苏镇江人. 2009 年于吉林大学获得学士学位, 2011 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2016 年于哈尔滨工业大学获得博士学位. 现为南京航空航天大学副教授. 主要研究方向为光电探测信息仿真与处理.

E-mail: zhangyin1986@nuaa.edu.cn