面向共形FDTD网格的多尺度几何特征表征框架

关振山[1]　冯健[1]　方明[1]

[1]安徽大学，安徽合肥 230601

安徽大学智能计算与信号处理教育部重点实验室

一、研究背景与方法

复杂目标的曲面、倾斜面与细小结构难以在笛卡尔网格上准确表示。本文在保持Yee网格拓扑的条件下，以边占据长度和面开放面积描述局部边界，建立面向共形FDTD的几何表征框架。

边界求交与开放区域重构

利用三角面片坐标范围筛选候选面片，结合投影判定与平面方程求解三方向网格边交点。对占据区间进行带符号累加，并处理共享顶点与共享边上的重复交点。进一步依据边占据量及角点状态重构开放区域，以小面积下限约束场更新系数。

$$\ell_{\mathrm{out}} = \Delta u - \ell_{\mathrm{occ}} \qquad \alpha = \frac{A_{\mathrm{open}}}{A_{\mathrm{full}}}$$

$$A_{\mathrm{eff}} = \max\left(A_{\mathrm{open}}, \alpha_{\min} A_{\mathrm{full}}\right)$$

Δu为网格边长，ℓ_{occ}/ℓ_{out}为占据/有效长度。
A_{open}/A_{full}为开放/完整面积，α_{min}为下限阈值，A_{eff}为稳定化面积。

共形几何参数生成流程



二、均匀与共形网格剖分

在相同笛卡尔网格上对比均匀与共形剖分。均匀网格将边界单元表示为完整体素；共形网格用边占据长度和面开放面积描述边界，保留曲面与斜面轮廓。

(a) 均匀网格

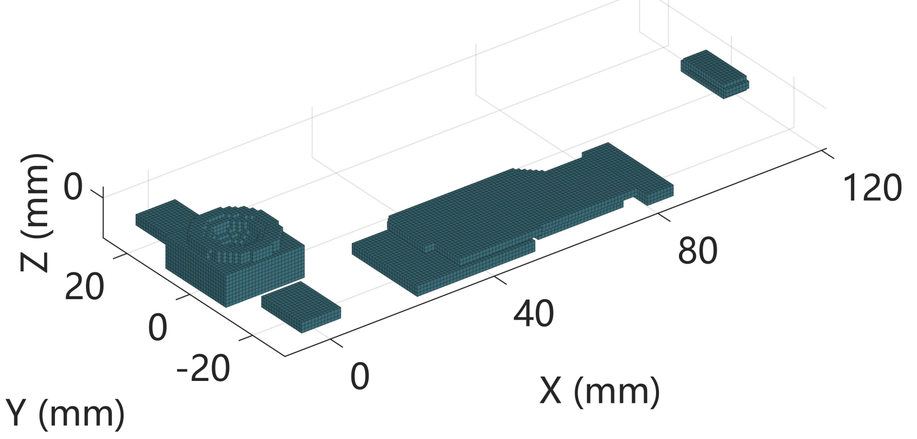


图1(a) 均匀网格剖分。边界单元补成完整立方体，显示阶梯状轮廓。

(b) 共形网格

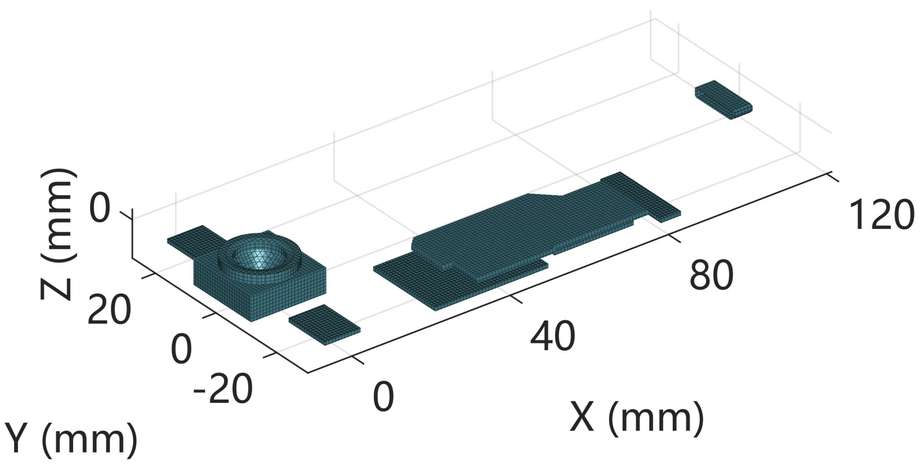
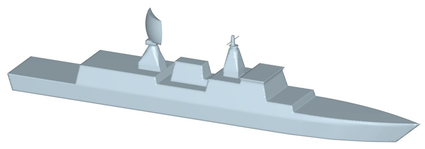


图1(b) 共形网格剖分。利用有效边长与开放面积表征边界，保留曲面与斜面轮廓。

三、舰船RCS计算结果

以舰船目标对比均匀FDTD、共形FDTD与FEKO的双站RCS。两种坐标图展示角向散射响应，采用MAE与RMS评价相对FEKO的偏差。



舰船几何模型

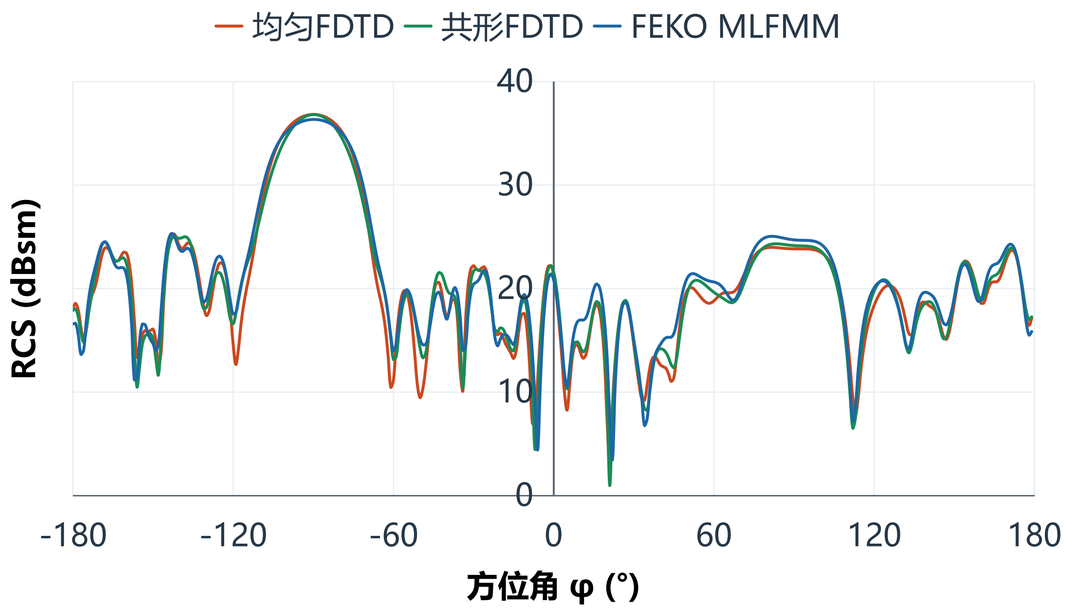


图2(a) 舰船双站RCS直角坐标对比。
均匀、共形与FEKO采用同组360个方位角。

相对FEKO的差值统计

相对FEKO的差值	均匀FDTD	共形FDTD
RCS平均绝对差 / dB	1.361	0.968
RCS差值均方根 / dB	1.842	1.282

舰船RCS计算结果（续）

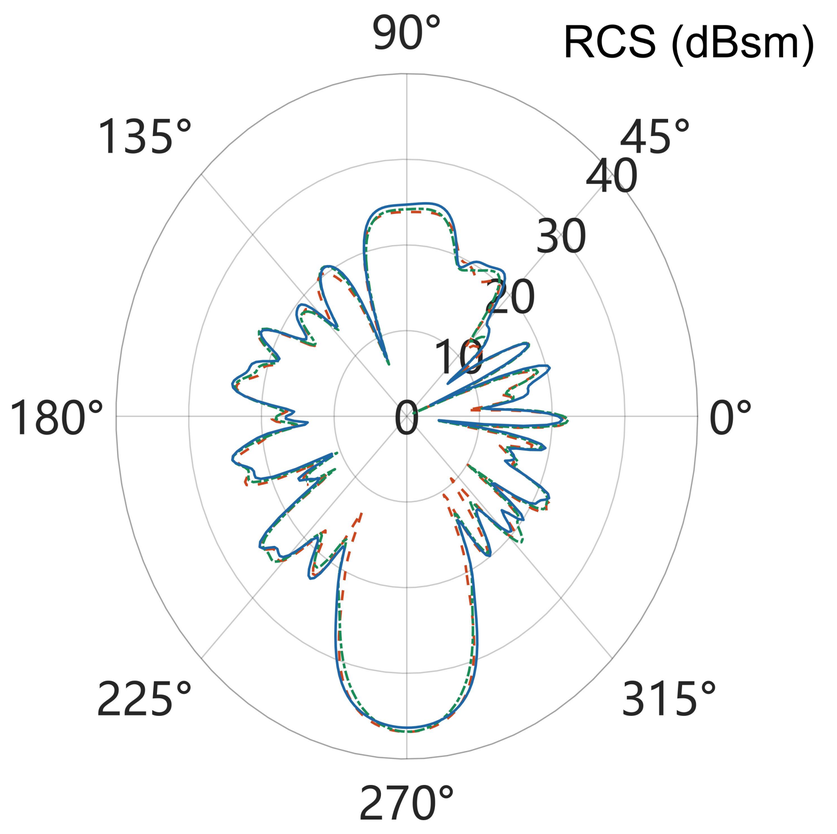


图2(b) 同组RCS结果的极坐标表示。
方位角、数值及三种方法的颜色与图(a)一致。

主要结论

共形剖分通过有效边长与开放面积表征局部边界，保留曲面与斜面轮廓。舰船算例中，相对FEKO的MAE由1.361降至0.968 dB，RMS由1.842降至1.282 dB。