

吴安雯, 吴语茂, 杨杨, 等. 矩量法-物理光学混合算法计算多尺度复合目标电磁散射场[J]. 电波科学学报, 2019, 34(1): 83-90. DOI: 10.13443/j.cjors.2018083101

WU A W, WU Y M, YANG Y, et al. The MoM-PO hybrid method for calculating the scattered field of multi-scale composite targets[J]. Chinese journal of radio science, 2019, 34(1): 83-90. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2018083101

矩量法-物理光学混合算法计算多尺度复合目标 电磁散射场

吴安雯 吴语茂 杨杨 张楠

(复旦大学信息科学与工程学院 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要 基于电流的矩量法(method of moments, MoM)和物理光学法(physical optics, PO)的混合算法是目前求解电中尺度和多尺度目标电磁散射和辐射的主要方法,在计算 MoM 区和 PO 区的耦合作用时需要 PO 区域进行亮区判断. 传统纯 CPU 亮区判断方法时间复杂度为 $O(N^2)$, 时间消耗随着面片数量 N 增加而急剧增大. 文中通过 GPU 渲染功能及对深度缓冲区(zbuffer)的利用,对 PO 亮区判断过程进行加速,亮区消耗时间与面片数量无直接联系,在面片数量达到 10^5 数量级以上加速优势明显. 将加速的 MoM-PO 混合方法应用于复杂目标与粗糙面的组合情况,对比多层快速多极子(multi level fastmultipole method, MLFMA)方法,相比于纯 PO 方法,获得较高的精度. 相比于单一算法,混合算法有明显优势.

关键词 物理光学;矩量法;图形渲染;亮区判断;粗糙面

中图分类号 TN914.42

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2019)01-0083-08

DOI 10.13443/j.cjors.2018083101

The MoM-PO hybrid method for calculating the scattered field of multi-scale composite targets

WU Anwen WU Yumao YANG Yang ZHANG Nan

(Key lab for Information Science of Electromagnetic Waves, School of Information Science and Technology,
Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Method of moments (MoM) and physical optics (PO) hybrid algorithm is the main method for calculating scattered field of electrically mid-scale and multi-scale target. When calculating the coupling effect between MoM region and PO region, we have to judge whether the PO elements is illuminated. Time complexity of shadowing algorithm based merely on CPU is $O(N^2)$ where N represents to the patch number of the target, which increases sharply with the increase of patch number. In this paper, we use GPU rendering and zbuffer to accelerate the process of lit judge. The time consuming of shadowing process has no relation with increasing patch number and has a better performance especially when the patch number reaches 10^5 magnitude. We apply MoM-PO method to the scattered field calculation from the complex target combined with rough surface. Compared with the multilevel fast multipole algorithm (MLFMA) and PO method, this hybrid method achieves high precision. The hybrid algorithm has obvious advantage over single method algorithm.

收稿日期: 2018-08-31

资助项目: 国家自然科学基金(11571196);科学挑战计划(JCKY2016212A502)

联系人: 吴语茂 E-mail: yumaowu@fudan.edu.cn

Keywords physical optics; method of moments; graphic rendering; lit judgment; rough surface

引言

基于电流的矩量法 (method of moments, MoM)^[1] 和物理光学法 (physical optics, PO)^[2] 的混合算法是目前求解电中尺度和多尺度目标电磁散射和辐射的主要方法. MoM 由于其精度高的特点, 被广泛用于分析各种复杂实际问题, 比如线天线作为机载、舰载、星载、电子设备的电磁能量的发射和接收端口. 纯 MoM 所需的内存和计算时间分别为 $O(N^2)$ 和 $O(N^3)$, 因此电大尺寸目标难以用纯 MoM 计算. PO 是一种重要的高频近似方法, 它是用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为散射体的源, 然后对表面感应电流积分求得散射场. 计算资源需求低、速度快、精度可靠的优势使得 PO 成为雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 分析的一个较佳的选择.

PO 适用于计算电大目标的电磁散射, 但是无法精确地描述复杂结构和源, 如天线等结构^[3]. U. Jakobus^[4] 详细阐述了 MoM 和 PO 的混合理论, 并且将其成功地应用在复杂环境的电磁散射中. 基于电流的混合方法^[5-7] 可以在表征大型平台的天线特性方面产生很大的效用, R. E. Richard^[8] 提出了修改 MoM 右端激励的方法加速计算面片间相互作用, 聂小春^[9] 将迭代 PO (iterative PO, IPO) 和 MoM 结合起来, 分析了二维腔体的散射问题.

随着雷达技术的发展, 地表复杂背景下目标的检测与识别技术在军事及民用领域都有广泛运用. 对海面目标的定位, 对低空飞行的飞机进行识别与跟踪, 复杂背景往往增大了探测的难度. 从总体看, 这些背景具有随机粗糙特性, 可以用随机粗糙表面来描述^[10], 复旦大学金亚秋和叶红霞计算得到粗糙面上的散射场和 Green 函数法的散射场的对比结果^[11].

复合散射中, 粗糙面和目标特性往往不一致, 粗糙面通常是电大尺寸或者超电大尺寸, 并且表面相对光滑; 目标尺寸相比粗糙面通常比较小, 并且含有比较精细的结构, 这种不一致的电结构, 用单一的方法建模是不准确的, 所以通过 MoM-PO 混合方法, 划分区域进行不同尺度剖分, 以降低超电大尺寸的面元数目, 再计算不同区域之间的耦合作用, 既能相对精确地计算散射场, 又能大大节省计算时间和内存消耗.

1 迭代 MoM-PO 方法计算散射场

将整个目标分为 MoM 区域和 PO 区域, 建立矩阵方程, 阻抗矩阵为 $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^{\text{MoM}} + \mathbf{Z}^{\text{PO}}$, $\mathbf{Z}^{\text{MoM}}$ 为原始的 MoM 阻抗矩阵, $\mathbf{Z}^{\text{PO}}$ 为 PO 区域产生的贡献. $\mathbf{Z}^{\text{PO}}$ 的计算非常耗时, 为了减小计算量, 这里使用高效迭代的 MoM-PO 方法.

三维目标 MoM-PO 混合算法的 MoM 区域的电场积分方程 (electric field integral equation, EFIE) 可以表示为

$$-\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}^{\text{MoM}}(\mathbf{r}) = \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^{\text{MoM-PO}}(\mathbf{r})). \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}^{\text{MoM}}$ 是目标 MoM 区域的散射场; $\mathbf{E}_0$ 是入射波与 PO 区域的直接激励场, 可以将 $\mathbf{E}_0$ 表示为 $\mathbf{E}_0(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_0^{\text{PO}}(\mathbf{r})$; $\mathbf{E}_0^{\text{PO}}(\mathbf{r})$ 是入射波 $\mathbf{E}^{\text{inc}}$ 照射下的 PO 区域散射场, 可以通过直接解析计算得到; $\mathbf{E}^{\text{MoM-PO}}$ 为 MoM 区域对 PO 区域的多次耦合散射场.

使用 RWG 基函数离散电场积分方程, 将 MoM 区域和 PO 区域分别按照 $\lambda/10$ 和 $\lambda/8$ 进行剖分, MoM 区域基函数个数为 M , PO 区域基函数个数为 P , 将 MoM 区域的电流展开为

$$\mathbf{J}^{\text{MoM}}(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^M \mathbf{I}_m^{\text{MoM}} \mathbf{f}_m^{\text{MoM}}(\mathbf{r}). \quad (2)$$

式中: $\mathbf{f}_m^{\text{MoM}}$ 为 MoM 区域的第 m 个 RWG 基函数; $\mathbf{I}_m^{\text{MoM}}$ 为展开系数. 可以将散射场表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{MoM}}(\mathbf{r}) &= \eta \mathbf{L}(\mathbf{J}^{\text{MoM}}) \\ &= \eta \sum_{m=1}^M \mathbf{I}_m^{\text{MoM}} \mathbf{L}(\mathbf{f}_m^{\text{MoM}}(\mathbf{r}')). \end{aligned} \quad (3)$$

将 PO 表面电流展开在 RWG 基函数上, 有

$$\mathbf{J}^{\text{PO}}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}_0^{\text{PO}}(\mathbf{r}) + \mathbf{J}^{\text{MoM-PO}}(\mathbf{r}), \quad (4)$$

$\mathbf{J}^{\text{PO}}$ 为 PO 区域在入射波照射下的感应电流, $\mathbf{J}^{\text{MoM-PO}}$ 为 PO 区域在 MoM 区域照射下产生的二次以及多次耦合的感应电流, 所以

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_0^{\text{PO}}(\mathbf{r}) &= \eta \mathbf{L}(\mathbf{J}_0^{\text{PO}}) \\ &= \eta \sum_{p=1}^P \mathbf{I}_{0,p}^{\text{PO}} \mathbf{L}(\mathbf{f}_p^{\text{PO}}(\mathbf{r}')), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{MoM-PO}}(\mathbf{r}) &= \eta \mathbf{L}(\mathbf{J}^{\text{MoM-PO}}) \\ &= \eta \sum_{p=1}^P \mathbf{I}_p^{\text{MoM-PO}} \mathbf{L}(\mathbf{f}_p^{\text{PO}}(\mathbf{r}')). \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 展开系数 $\mathbf{I}_{0,p}^{\text{PO}}$ 可以直接计算, 根据 PO 的切平面近似和暗区无贡献, 仅考虑 PO 亮区面片, 展开系数计算公式为

$$\mathbf{I}_{0,p}^{\text{PO}} = \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{t}}_p^+ + \hat{\mathbf{t}}_p^-) \cdot (\hat{\mathbf{n}}_p^+ + \hat{\mathbf{n}}_p^-) \times \mathbf{H}^{\text{inc}}(\mathbf{r}_c). \quad (7)$$

如图 1 所示, $\mathbf{r}_c$ 为 RWG 基函数的公共边中点, $\hat{\mathbf{t}}_p^+$ 和 $\hat{\mathbf{t}}_p^-$ 分别是一对三角形面元 T_n^+ 和 T_n^- 垂直于公共边的切向单位向量, $\hat{\mathbf{n}}_p^+$ 和 $\hat{\mathbf{n}}_p^-$ 分别是外法向量, 以此可以推得 PO 区域在 MoM 区域照射下产生的二次即多次耦合的感应电流在 RWG 基函数上的展开系数 $\mathbf{I}_p^{\text{MoM-PO}}$ 为

$$\mathbf{I}_p^{\text{MoM-PO}} = \sum_{m=1}^M \mathbf{I}_m^{\text{MoM}} (\hat{\mathbf{t}}_p^+ + \hat{\mathbf{t}}_p^-) \cdot (\hat{\mathbf{n}}_p^+ + \hat{\mathbf{n}}_p^-) \times \frac{K(f_m^{\text{MoM}})}{2}. \quad (8)$$

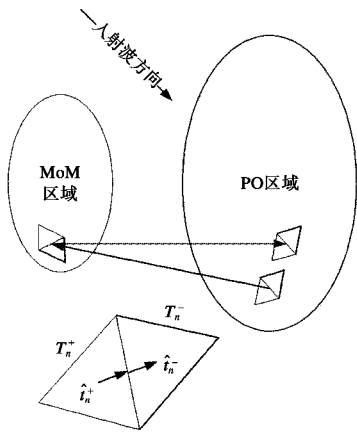


图 1 MoM-PO 混合方法示意图

Fig. 1 MoM-PO hybrid method diagram

关于 MoM 区域电流系数的矩阵方程满足如下形式:

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V}. \quad (9)$$

式中:

$$\mathbf{Z}_{mn} = \left[\mathbf{f}_n^{\text{MoM}}(\mathbf{r}), -\eta \sum_{m=1}^M \mathbf{I}_m^{\text{MoM}} L(\mathbf{f}_m^{\text{MoM}}(\mathbf{r}')) \right]; \quad (10)$$

$$\mathbf{V}_n = \left[\mathbf{f}_n^{\text{MoM}}(\mathbf{r}), \mathbf{E}^{\text{inc}} + \eta \sum_{p=1}^P (\mathbf{I}_{0,p}^{\text{PO}} + \mathbf{I}_p^{\text{MoM-PO}}) L(\mathbf{f}_p^{\text{PO}}(\mathbf{r}')) \right]. \quad (11)$$

整个迭代过程可以分为以下步骤:

1) 计算平面入射波 $\mathbf{E}^{\text{inc}}$ 照射下的 PO 散射场 $\mathbf{E}_0^{\text{PO}}$;

2) 计算 $\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_0^{\text{PO}} + \mathbf{E}^{\text{inc}}$, 并初始化 $\mathbf{E}^{\text{MoM-PO}}$ 为 0;

3) 计算 MoM 区域的激励源和感应电流, 在达到收敛精度之前重复步骤 2)。

2 图形学消隐加速亮区判断

对于 MoM-PO 混合方法, 对 PO 区域的亮区判断分为两种情况。一种是在计算入射波激励下的

PO 区域的散射场, 进行的是平面波入射下的亮区判断。第二种是计算 MoM 区域对 PO 区域耦合作用时, 进行点光源入射下的亮区判断。

具体照射情况如下: 对于平面波入射波的情况, 如图 2 所示, 计算入射波照射下的 PO 区散射场 $\mathbf{E}_0^{\text{PO}}(\mathbf{r})$; 在计算 MoM 区域对 PO 区域的耦合作用时, 需要将每一片的 MoM 面片当做点光源对 PO 区域进行照射, 亮区会产生感应电流, 暗区无贡献, 如图 3 所示。

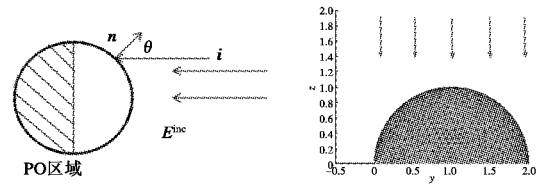


图 2 平面波亮区示意图

Fig. 2 PO region illuminated by plane incident wave

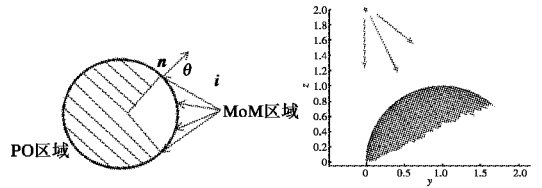


图 3 点光源亮区示意图

Fig. 3 PO region illuminated by MoM region

2.1 消隐 zbuffer 算法

在将三维目标渲染到二维屏幕时, 目标会被离散成像素, 记录像素的两个属性: 颜色(帧缓存)和距离投影屏幕的深度(z 缓存^[12-13])。相对屏幕来说, 近处目标会遮挡住远处目标。整个消隐流程如下:

1) 在渲染之前, 将屏幕像素的帧缓存和 z 缓存分别清零(黑色)和置于无穷大(无穷远)。

2) 按照输入顺序编号, 给每一片面片分配唯一一种特定的颜色作为标记。以 8 位帧缓存为例, 8 位 RGB 能组合出的颜色总数为 $(2^8)^3 = 16\,777\,216$, 其中选出一种颜色作为背景, 所以颜色总数为 $16\,777\,216 - 1 = 16\,777\,215$, 颜色分配关系如下(i 为面片序号, N 为面片总数):

$$\text{color} = \frac{(2^8)^3 - 1}{N} i. \quad (12)$$

3) 在渲染每片面片之前, 比较此面片覆盖住的像素位置的深度值和像素原先的深度值, 如果像素原先的深度值大于面片深度值, 表明新面片更近, 于是将当前面片的颜色值存入像素的帧缓存中。反

之,如果像素原先的深度值小于面片对应的深度值,表面新面片距离屏幕更远,会被遮挡住,于是不渲染面片,对应位置的帧缓存也不做修改。

4) 对所有面片操作完成之后,读出能被渲染在屏幕上的像素颜色,并依据公式(12)得到面片的编号,从而提取出亮区面片。

如图 4 所示,红色面片(R:255 G:0 B:0)深度值为 2,遮挡住黄色面片(R:255 G:255 B:0)深度值为 3 和 4 的部分,这部分像素颜色(帧缓存值)为红色。

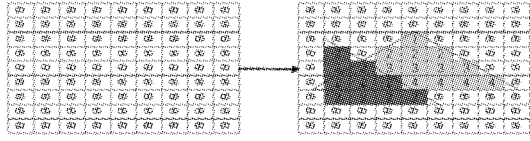


图 4 深度消隐原理

Fig. 4 Zbuffer shadowing process

2.2 投影参数选择

如图 5 所示,屏幕方向为左下角源点, z 轴正方向朝外。此坐标系参数与目标三维参数一致。投影的过程就是选择好适合的三维体对物体进行剪裁,并根据视角方向投影到屏幕上。

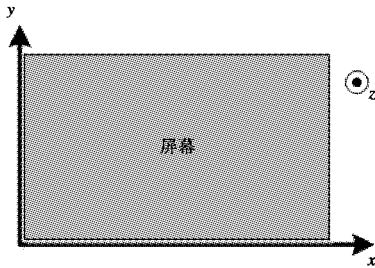


图 5 屏幕坐标系

Fig. 5 Screen coordinate

对于平面波照射下的亮区判断情况,使用正射投影函数,用平行六面体包围三维目标,两个截面大小相同,分别是垂直于入射方向的最近的平行平面和最远的平面。如图 6 所示。

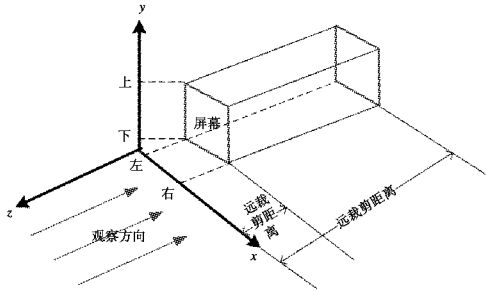


图 6 正射投影选取以及屏幕方向

Fig. 6 The orthographic projection for plane wave incidence

投影时先计算好模型的旋转角度和旋转轴,以便将入射方向 $\hat{r}^i$ 旋转至 $-\hat{z}$ 方向。由于屏幕对应 xy 平面,其法向量为 $\hat{n}_{xy} = (0, 0, 1)$,旋转轴 r_{axis} 和旋转角 θ_{axis} 分别为

$$\begin{aligned} r_{axis} &= \hat{r}^i \times \hat{n}_{xy}, \theta_{axis} \\ &= \arccos\left(\frac{\hat{r}^i \cdot \hat{n}_{xy}}{|\hat{r}^i| |\hat{n}_{xy}|}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

确定旋转角度和旋转轴后,对几何目标做相应旋转变换和投影变换,将三维目标投影到二维屏幕。根据 zbuffer 大小决定像素的最终颜色。平面波入射下,一次投影完成一次亮区判断。

对于点光源的亮区判断情况,使用透视投影函数,用平锥体包围三维目标^[14],两个截面分别是观察位置(MoM 区域棱边中点位置)到 PO 区域最近和最远的截面,如图 7 所示。

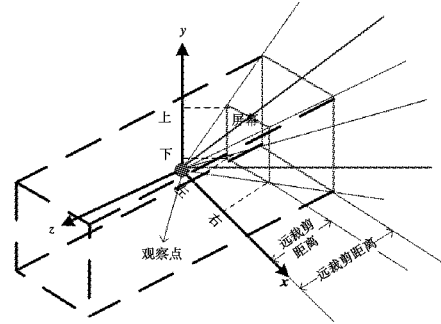


图 7 点光源投影选取以及屏幕方向

Fig. 7 The perspective projection for point source

投影时先选择好观察点位置,也就是 RWG 基函数的公共边中点,将整体模型做平移变换,使观察点位置被平移到原点,按照 $-\hat{z}$ 方向选取最近和最远的投影平面,使得待亮区检测的物体处在平锥体中,视为一次投影,完整的检测需要将物体分别投影到包围整个物体的 6 个面上,一共进行 6 次投影,6 次投影的亮区总数为最终结果。

2.3 亮区判断时间对比

传统纯 CPU 精确计算方法是将面片两两组合,根据面片中心到光源源点距离长短判断面片的先后顺序及遮挡关系。算法复杂度为 $O(N^2)$ (N 表示面元个数),在面元数量较大时,该方法耗时明显。借助 GPU 渲染原理的 zbuffer 方法在时间上和内存消耗上大大降低,其算法复杂度依赖于屏幕的分辨率而不直接依赖于面片数量。本文中使用的设备参数为:处理器 Intel(R) Core(TM) i7-4790,时钟主频 3.6 GHz,显示适配器 AMD Radeon (TM) R5 240。表 1 和图 8 分别给出对应不同面片数量剖

分的同一物体(此处使用的是球目标),分别使用纯 CPU 亮区判断和借助 GPU 渲染的亮区判断时间对比.可得:在面片数量极少(低于 1 000),纯 CPU 方法计算效率更高,因为 GPU 与 CPU 的内存交换需要消耗时间,随着面片数量的增多,尤其是百万数量级面片数量时,GPU 加速的优势非常明显.

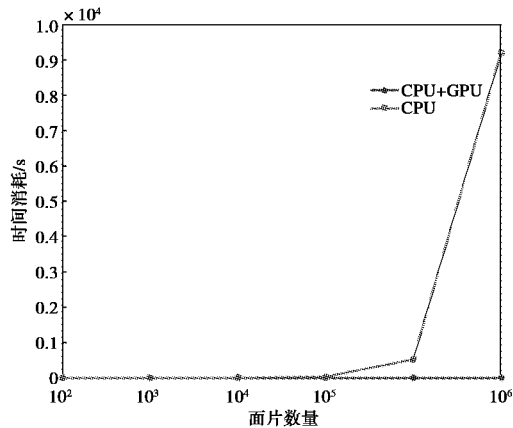


图 8 GPU zbuffer 与传统纯 CPU 亮区计算时间与面片数量级关系比较

Fig. 8 Time consuming comparison between CPU and CPU+GPU rendering method

表 1 纯 CPU 计算亮区和 GPU 渲染加速亮区时间消耗对比

Tab. 1 Time consuming comparison between CPU and CPU+GPU rendering method

面片数量	距离判断 (纯 CPU)/s	zbuffer (CPU+GPU)/s
526	0.004	0.052
3 536	0.048	0.063
13 868	0.607	0.072
106 792	35.851	0.097
346 754	527.119	0.143
1 153 174	9 216.130	0.302

3 数值算例

3.1 MoM-PO 算法计算简单模型散射场

为了测试混合算法的有效性,我们首先考虑相对简单的完全电导体(perfect electric conductor, PEC)圆锥与 PEC 圆形平面几何模型.入射波方向 $\theta=25^\circ, \varphi=0^\circ$, 频率 300 MHz, 波长 $\lambda=1$ m. 电场沿 $\hat{x}$ 方向极化. 其中圆锥半径为 0.3 m, 高为 0.8 m, 面片数量为 360(按照 $\lambda/8$ 剖分), 其电尺寸 $L/\lambda=0.85$, 将其划定为 MoM 区域. 下面的圆形平面半径为 3 m, 面片数量 4 716(按照 $\lambda/6$ 剖分), 圆锥底面距离圆形平面 0.8 m, 其电尺寸 $L/\lambda=6$, 与圆锥相

比,将其划定为 PO 区域. 模型示意如图 9 所示. 其 $0\sim360^\circ$ 双站 RCS 如图 10 所示. 表 2 给出不同区域的具体面片数目和剖分尺度.

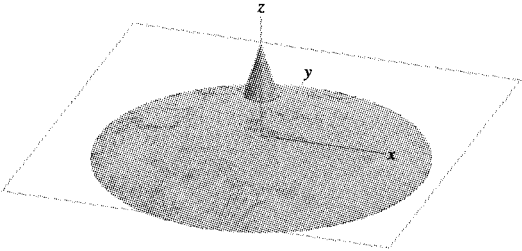


图 9 简单圆锥和圆形平面复合目标

Fig. 9 Cone and circular plane combined model

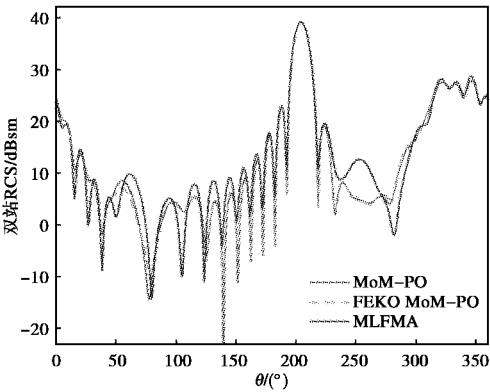


图 10 PEC 圆锥和圆形平面复合目标的 MoM-PO 算法 $0\sim360^\circ$ 双站 RCS 计算对比

Fig. 10 The bistatic RCS results by using MoM-PO method of PEC cone and circular plane combined targets

表 2 简单复合目标不同区域划分面片数量

Tab. 2 Different region division for simple combined targets

区域类型	顶点数目	面片个数
MoM 区域(圆锥)	182	360($\lambda/8$ 剖分)
PO 区域(圆形平面)	2 435	4 716($\lambda/6$ 剖分)

由图 10 看出,在简单模型的情况下,MoM-PO 混合方法和电磁学软件 FEKO 的 MoM-PO 方法以及多层快速多级子(multi level fastmultipole method, MLFMA)方法吻合很好,说明此方法的有效性.

3.2 MoM-PO 算法计算一般复杂目标散射场

如图 11 所示,针对一般复杂 PEC 飞机目标和其下的 PEC 粗糙面,我们采用 MoM-PO 混合方法进行计算.入射波方向 $\theta=25^\circ, \varphi=0^\circ$, 电场沿 $\hat{x}$ 方向极化.入射频率为 300 MHz,入射波长 $\lambda=1$ m. 飞机目标对其进行适当比例的缩小后,其几何尺寸

为 $4.2\text{ m} \times 4.2\text{ m} \times 0.57\text{ m}$, 其电尺寸 $L/\lambda = 5.96$, 将其划定为 MoM 区域, 面片数量为 1 680 (按照 $\lambda/8$ 剖分). 下面的粗糙面采用二维随机高斯粗糙面模型, 其均方根高度 $\delta = 0.5\lambda$, 相关长度 $l_x = l_y = 2\lambda$, 其二维几何尺寸为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, 与飞机中心距离 10 m, 相比于入射波长, 其电尺寸 $L/\lambda = 34.6$, 将其划定为 PO 区域, 面片数量为 20 000 (按照 $\lambda/5$ 剖分). 计算其 360° 方向的双站散射场. 表 3 给出不同区域的具体面片数目和剖分尺度.

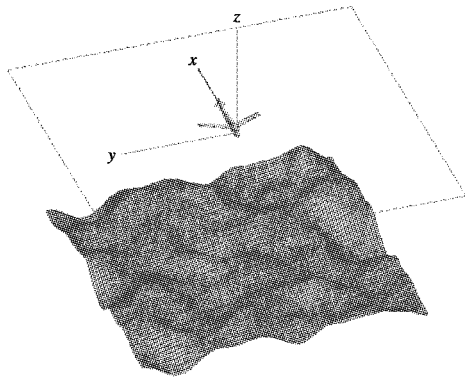


图 11 粗糙面和飞机复合目标示意图

Fig. 11 Rough surface and complex target glider above composite model

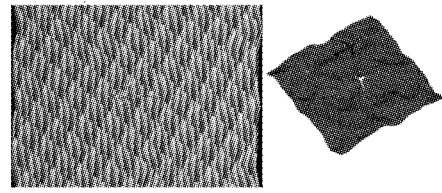
表 3 不同区域划分面片数量

Tab. 3 Different region division for glider above rough surface

区域类型	顶点数目	面片个数
MoM 区域(飞机)	842	1 680($\lambda/8$ 剖分)
PO 区域(粗糙面)	10 201	20 000($\lambda/5$ 剖分)

对于迭代计算过程, 首先计算的是平面波入射下的 PO 散射场, 其亮区判断过程以及亮区结果如图 12 所示. 计算 MoM 区域与 PO 区域耦合时, 计算的是点源的亮区判断, 其判断过程以及亮区结果如下图 13 所示. 图(a)为 6 次投影渲染过程, 6 个投影面从左到右从上到下分别是底面、右面、上面、左面、前面、后面; 图(b)为亮区输出, 点源位置以原点 $(0, 0, 0)$ 为例.

图 14 给出了用 MoM-PO 混合算法和 MLFMA 算法的双站散射场计算结果比较, 吻合较好. 说明在复杂的模型下, 该算法也有较高的精度. 图 15 为加入了纯 PO 方法的双站结果对比, MoM-PO 方法更加接近于 MLFMA 方法, 是对纯 PO 方法的完善和改进.



(a) 渲染过程

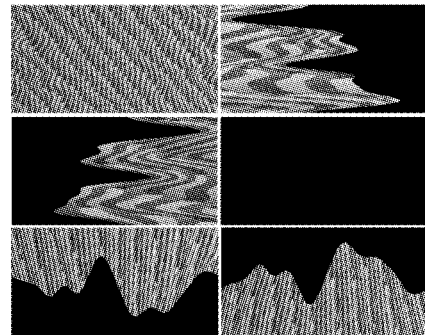
(b) 亮区输出结果

(a) Projection procedure

(b) lit region

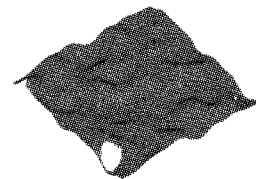
图 12 复合目标在平面入射波照射下的亮区判断过程

Fig. 12 Lit region of rough surface and glider above illuminated by incident plane wave



(a) 6 次投影渲染过程

(a) Projection on 6 planes of bounding box



(b) 亮区输出

(b) Lit region

图 13 粗糙面在 MoM 区域照射下的亮区判断过程

Fig. 13 Lit region of rough surface illuminated by MoM region

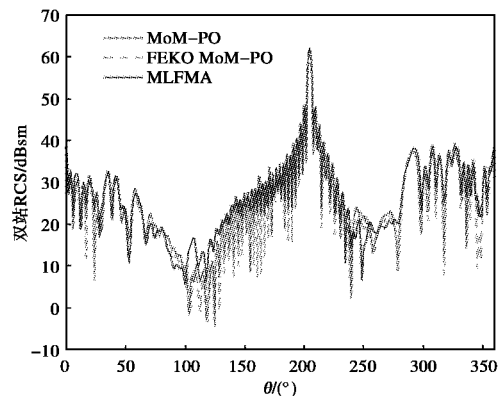


图 14 粗糙面和飞机复合目标的 MoM-PO 算法的 $0 \sim 360^\circ$ 双站 RCS 计算对比(与 FEKO 软件对比)

Fig. 14 The bistatic RCS results of MoM-PO method from rough surface and complex target glider above composite model (compared with FEKO software)

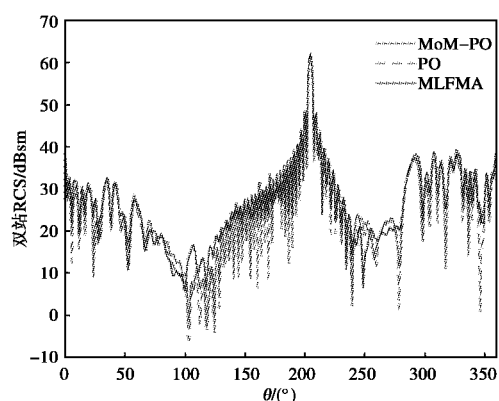


图 15 粗糙面和飞机复合目标的 MoM-PO 算法的 0~360°双站 RCS 计算对比(与纯 PO 方法对比)

Fig. 15 The bistatic RCS results of MoM-PO method from rough surface and complex target glider above composite model (compared with PO method)

4 结 论

本文针对复杂目标与粗糙面的组合情况,使用 GPU 加速的 MoM-PO 混合算法快速计算多尺度目标的散射场. 该算法针对不同区域采用不同尺度网格划分,降低了计算机内存使用. 采用图形渲染加速 PO 区域的亮区判断,在面片数量级达到 10^5 以上情况下,极大地加快计算时间,且计算精度误差相对较小,与纯 PO 方法比较精度也有所提高,说明了该混合算法的优势.

参考文献

- [1] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985: 1-20.
- [2] MACDONALD H M. The effect produced by an obstacle on a train of electric waves[J]. Philosophical transactions of the Royal Society of London, 1913, 212(484-496): 299-337.
- [3] JIN J M, LING F, CAROLAN S T, et al. A hybrid SBR/MoM technique for analysis of scattering from small protrusions on a large conducting body [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1998, 46(9): 1349-1357.
- [4] JAKOBUS U, LANDSTORFER F M. Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three-dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1995, 43(2): 162-169.
- [5] LING F, SHENG X Q, JIN J M. Hybrid MoM/SBR and FEM/SBR methods for scattering by large bodies with inhomogeneous protrusions[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Montreal, 1997.
- [6] HODGES R E, RAHNAT S Y. An iterative current-based hybrid method for complex structures [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1997, 45(2): 265-276.
- [7] 邓泳, 董纯柱, 耿方志. 一种计算电大尺寸复杂导体目标电磁散射的 MoM-SBR/PO 混合法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1400-1403.
- [8] DENG Y, DONG C Z, GENG F Z. Hybridization of MoM-SBR/PO for computing electromagnetic scattering of electrical large-size complex conducting bodies [J]. Systems engineering and electronics, 2009, 31(6): 1400-1403. (in Chinese)
- [9] HODGES R E, RAHMAT-SAMII Y. An iterative current-based hybrid method for complex structures [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1997, 45(2): 265-276.
- [10] 聂小春, 葛德彪, 阎玉波. IPO-MoM 混合法分析开槽电大目标的电磁散射[J]. 电子学报, 1999, 27(9): 108-110.
- [11] NIE X C, GE D B, YAN Y B. Hybrid analysis of the electromagnetic scattering of a large body with cracks [J]. Acta electronica sinica, 1999, 27(9): 108-110. (in Chinese)
- [12] 王蕊, 郭立新, 秦三团, 等. 粗糙海面及其上方导体目标复合电磁散射的混合算法研究[J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3473-3480.
- [13] WANG R, GUO L X, QIN S T, et al. Hybrid method for investigation of electromagnetic scattering interaction between the conducting target and rough sea surface[J]. Acta physica sinica, 2008, 57(6): 3473-3480. (in Chinese)
- [14] 金亚秋, 刘鹏, 叶红霞. 随机粗糙面与目标复合散射数值模拟理论与方法(精)[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 122-126.
- [15] 李炳炎, 何芒, 徐晓文, 等. MoM-PO 混合算法中的快速消隐算法研究[J]. 微波学报, 2016(s1): 9-12.
- [16] LI B Y, HE M, XU X W, et al. Fast shadowing algorithm in the MoM-PO hybrid method[J]. Journal of microwaves, 2016(s1): 9-12. (in Chinese)
- [17] 党晓杰, 袁浩波, 王楠, 等. MOM-PO 混合方法中一种遮挡消影的新算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 38-41.
- [18] DANG X J, YUAN H B, WANG N, et al. New method for removing the hidden face in the MOM-PO hybrid method [J]. Journal of Xidian University,

2012, 39(1):38-41. (in Chinese)

- [14] FAN T Q, GUO L X, LIU W. A novel OpenGL-based MoM/SBR hybrid method for radiation pattern analysis of an antenna above an electrically large complicated platform[J]. IEEE transactions on antennas & propagation, 2016, 64(1):201-209.

作者简介

吴安雯 (1994—), 女, 江苏人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为计算电磁学和雷达成像算法。

吴语茂 (1982—), 男, 山东人, 副研究员, 主要研究方向为非均匀介质中的场与波、计算电磁学、环境与目标的电磁特性的识别。

杨杨 (1992—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算电磁学全波混合算法。

张楠 (1994—), 男, 山东人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为计算电磁学和电磁逆散射算法。