

任意形状电大散射体附近天线受扰方向图的快速分析

陈 铭 赵勋旺 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文采用基于非均匀有理 B 样条曲面(NURBS)建模的物理光学方法结合矩量法(MoM-PO)分析任意形状电大散射体附近天线的受扰方向图。采用插值驻相点技术加快了方向图的计算速度。文章推导了基于有理贝齐尔曲面的物理光学散射场计算公式,采用驻相法(SPM)计算有理贝齐尔表面上的物理光学感应电流积分从而得到物理光学散射场,并利用物理光学散射场迭代矩量法区域的电压矩阵。通过与传统平面片建模的物理光学方法的计算结果对比,说明该文方法的有效性和计算速度快的优点。

关键词: 非均匀有理 B 样条曲面; 物理光学; 矩量法; 驻相法

中图分类号: O441

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2787-04

Fast Analysis of Antenna around Arbitrary Shaped Scatterer

Chen Ming Zhao Xun-wang Liang Chang-hong

(National Key Lab of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The hybrid iterative Method of Moments and Physical-Optics method of moments (MoM-PO) is used to analyze radiation pattern of antenna around an electrically large platform modeled with Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) surfaces. The formula of scatter field based on NURBS surface is deduced. Stationary Phase Method (SPM) is applied to the integral of induced current on the rational Bezier surface. The process of obtaining stationary point is accelerated by interpolation technique. Results obtained by this method and by MoM-PO based on triangle facet model agree well while the former is more efficient in execution time.

Key words: Non-uniform rational B-spline; Physical optics; Method of moments; Stationary phase method

1 引言

由于散射体的电尺寸巨大,任意形状电大散射体附近天线的分析一直是电磁计算的难题之一。传统采用三角形平面片建模的物理光学方法结合矩量法(MoM-PO)的混合方法,一般要求矩量法区域片单元的尺寸小于十分之一波长,物理光学区域一般不能够超过三分之一波长。在计算目标的电尺寸较大的时候需要采用大量的面片单元,并且面片单元数量随着频率的升高而大幅增加,导致对计算内存要求随着频率的升高大幅增加而计算速度随之下降。

基于非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面建模技术在 90 年代初成为工业设计中几何外形设计的国际标准。采用 NURBS 曲面建模具有建模精度高、面片数量少的优点。NURBS 曲面建模技术在电磁计算方面的优点有: (1)与实际物体的外形误差小。(2)不需要将工业设计的模型转化为三角形平面片模型,省略了中间步骤。(3)面片数量少,使得内存需求大幅降低,计算速度加快。

1992 年,西班牙学者 Perez 首次将该建模技术引入高频电磁计算领域^[1]。此后,采用基于 NURBS 曲面建模的电磁计算方法在国内外得到的广泛的研究^[2-5]。2001 年,Olga 提

出采用基于 NURBS 建模技术的物理光学方法(PO)分析天线受电大散射体影响后的方向图^[6]。由于采用了球面波替代真实天线,要求天线必须距离散射体足够远。为了快速分析天线距离散射体较近的情况,必须引入 MoM-PO 混合方法。

本文作者在研究基于 NURBS 曲面建模的散射场计算方法^[7,8]的基础上继续研究了基于 NURBS 建模的迭代 MoM-PO 方法。与传统基于平面片建模技术的迭代 MoM-PO 方法相比,基于 NURBS 曲面建模和驻相法的 MoM-PO 方法在填充阻抗矩阵时速度更快。但是在计算方向图时,由于需要在每个计算角度上重新求取驻相点从而导致计算速度减慢。本文作者采用了插值驻相点技术加快驻相点的求取速度,从而使得基于 NURBS 曲面建模和驻相法的 MoM-PO 方法相对传统平面片建模的 MoM-PO 方法在计算的各个阶段都具有速度上的优势。

2 基于 NURBS 曲面建模的迭代 MoM-PO 方法

通常将 NURBS 曲面分解为有理贝齐尔曲面用于数值计算^[1-3]。有理贝齐尔曲面数学定义为

$$\mathbf{r}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} \mathbf{b}_{i,j} B_i^m(u) B_j^n(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} B_i^m(u) B_j^n(v)} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{b}_{i,j}$ 为曲面的控制点^[2], $w_{i,j}$ 为对应于控制点的权值, $B_i^m(u)$ 和 $B_j^n(v)$ 为伯恩斯坦多项式, m 和 n 为曲面的次数, 参数 u 和 v 的取值范围为 $[0,1]$ 。

当应用 MoM-PO 分析位于电大散射体附近的天线的辐射特性时, 通常将天线作为 MoM 区域, 将电大散射体作为 PO 区域。当天线受到激励时, 由天线与散射体组成的电磁系统将经历一个短暂的相互作用过程直到达到平衡状态。迭代 MoM-PO 方法就是通过模拟这个相互作用的过程来求解平衡状态时的天线和散射体的电流分布, 进而求解整个系统的散射场^[9]。迭代 MoM-PO 的实现的具体步骤可以参见参考文献^[9], 其核心步骤是计算矩量法子域 m 为源的情况下的物理光学散射场。本文中物理光学区域采用有理贝齐尔曲面建模, 如图 1 所示。曲面上由第 m 个矩量法子域发出的磁场可以由下式计算:

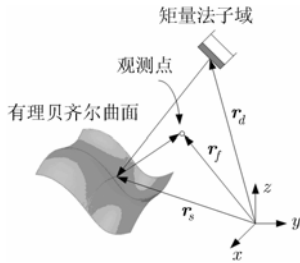


图 1 矩量法子域为源情况下曲面散射

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}_s) = - \int_{s_m} \frac{(1 + jkR_{sd})(\mathbf{R}_{sd} \times \mathbf{g}_m)}{4\pi R_{sd}^3} e^{-jkR_{sd}} d\mathbf{s}_m \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi f/c$, f 为天线的工作频率, c 表示光速。 s_m 为第 m 段矩量法子域, \mathbf{g}_m 是该子域对应的电流。 \mathbf{r}_d 是矩量法区域中第 m 段矩量法子域的位置。 $\mathbf{R}_{sd} = \mathbf{r}_s - \mathbf{r}_d$, $R_{sd} = |\mathbf{R}_{sd}|$ 是矩量法子域到曲面的距离。由散射体表面的入射磁场及物理光学近似可以得到散射体亮区表面的感应电流:

$$\mathbf{J}^{\text{PO}}(\mathbf{r}) = \begin{cases} 2\mathbf{n}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}(\mathbf{r}), & \text{亮区} \\ 0, & \text{暗区} \end{cases} \quad (3)$$

对散射体亮区表面的电流积分就可以求得物理光学散射场:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon 4\pi} \int_{s'} \left[\frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} \mathbf{R}_{fs} \times (\mathbf{R}_{fs} \times \mathbf{J}^{\text{PO}}) + \frac{-1 - jkR_{fs}}{R_{fs}^3} (-2\mathbf{J}^{\text{PO}}) \right] e^{-jkR_{fs}} d\mathbf{s}' \quad (4)$$

其中 $\mathbf{R}_{fs} = \mathbf{r}_f - \mathbf{r}_s$, \mathbf{r}_f 是散射场的观测点。 $R_{fs} = |\mathbf{R}_{fs}|$ 表示观测点到曲面的距离。以 Pulse 基函数为例, 由式(2)-式(4)可以得到物理光学散射场计算公式:

$$\mathbf{E} = \frac{-L_d}{16j\omega\epsilon\pi^2 R_{sd}^3} \int_{s'} \left[\frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} \mathbf{R}_{fs} \times (\mathbf{R}_{fs} \times 2\mathbf{n} \times (\mathbf{R}_{sd} \times \mathbf{g}_n)) + \frac{4(1 + jkR_{fs})}{R_{fs}^3} (\mathbf{n} \times (\mathbf{R}_{sd} \times \mathbf{g}_n)) \right] e^{-jk(R_{fs} + R_{sd})} d\mathbf{s}' \quad (5)$$

式中 L_d 为天线的分段长度。对于有理 Bezier 曲面, 积分面元可以写为

$$d\mathbf{s}' = |\mathbf{r}_{su} \times \mathbf{r}_{sv}| du dv \quad (6)$$

其中 $\mathbf{r}_{su} = \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial u}$, $\mathbf{r}_{sv} = \frac{\partial \mathbf{r}_s}{\partial v}$ 。将积分面元代入, 最后散射场可以表示为

$$\mathbf{E} = C \int_0^1 \int_0^1 \mathbf{g}(u, v) e^{jkf(u, v)} du dv \quad (7)$$

其中

$$C = \frac{-L_d}{16j\omega\epsilon\pi^2 R_{sd}^3} \quad (8)$$

$$f(u, v) = -(R_{sd} + R_{fs}) \quad (9)$$

$$\mathbf{g}(u, v) = \left\{ \frac{3 - k^2 R_{fs}^2 + j3kR_{fs}}{R_{fs}^5} \mathbf{R}_{fs} \times (\mathbf{R}_{fs} \times 2\mathbf{n} \times (\mathbf{R}_{sd} \times \mathbf{I}_d)) + \frac{4(1 + jkR_{fs})}{R_{fs}^3} (\mathbf{n} \times (\mathbf{R}_{sd} \times \mathbf{I}_d)) \right\} |\mathbf{r}_{su} \times \mathbf{r}_{sv}| \quad (10)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_{su} \times \mathbf{r}_{sv}}{|\mathbf{r}_{su} \times \mathbf{r}_{sv}|} \quad (11)$$

3 应用驻相法计算物理光学积分

对于式(7)这种形式的积分, 在 $k \gg 1$ 条件下可以采用驻相法计算^[10]。驻相法的基本思路是: 积分的结果主要来自于积分区域关键点附近区域的贡献。在驻相法的应用中一共存在 3 类关键点, 分别计算这 3 类关键点对于积分的贡献, 相加后即得到积分的值。

第 1 类是曲面内的驻相点, 这一类关键点需要满足的条件为

$$\begin{cases} f_u(u_0, v_0) = 0 \\ f_v(u_0, v_0) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

这一类关键点对于积分的贡献可以由下式计算:

$$\mathbf{I}_{in} = \mathbf{g}(u_0, v_0) e^{jkf(u_0, v_0)} \frac{2\pi\sigma}{k\sqrt{|\sigma_1\sigma_2|}} \quad (13)$$

其中 σ_1 和 σ_2 是矩阵 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma \\ \gamma & \beta \end{bmatrix}$ 的特征值, 矩阵元素中 $\alpha = f_{uu}$, $\beta = f_{vv}$, $\gamma = f_{uv}$ 。 σ 由下式定义

$$\sigma = \begin{cases} j, & \sigma_1 > 0, \quad \sigma_2 > 0 \\ -j, & \sigma_1 < 0, \quad \sigma_2 < 0 \\ 1, & \sigma_1\sigma_2 < 0 \end{cases} \quad (14)$$

第 2 类关键点是曲面边界上的关键点, 有理 Bezier 曲面有 4 条边界, 对应于每一条边界上的关键点需要满足的条件分别为 $f_v(0, v_0) = 0$; $f_v(1, v_0) = 0$; $f_u(u_0, 0) = 0$; $f_u(u_0, 1) = 0$ 。曲面边界上的关键点对于积分的贡献可以由下式计算:

$$\mathbf{I}_{bo} = (-1)^\alpha \frac{j\mathbf{g}(u_0, v_0)}{k f_{\alpha\alpha}(u_0, v_0)} \sqrt{\frac{2j\pi}{k f_{\beta\beta}(u_0, v_0)}} e^{jkf(u_0, v_0)} \quad (15)$$

若边界驻相点位于边界 $u = 0$ 和 $u = 1$ 上时, 有 $\alpha = u$, $\beta = v$ 。若边界驻相点位于边界 $v = 0$ 和 $v = 1$ 上时, 有 $\alpha = u$, $\beta = v$ 。

第 3 类驻相点是曲面的角点, 角点对于积分的贡献为

$$I_{co} = -(-1)^{u_0+v_0} \frac{g(u_0, v_0)}{k^2 f_u(u_0, v_0) f_v(u_0, v_0)} e^{jkf(u_0, v_0)} \quad (16)$$

将所有关键点对积分的贡献相加就可以求得积分的结果。

由以上的分析可以看出, 计算积分的关键是寻找驻相点。驻相点只与被积函数的相位项相关。由式(9)可知被积函数的相位项与源和观察点的位置相关。在求解天线电流分布时, 源和观测点的位置均为矩量法子域。因此, 当天线的位置和分段确定之后, 只需要求解一次驻相点。在计算天线的受扰方向图时, 总的散射场由矩量法区域(天线)辐射场和物理光学区域(散射体)散射场叠加得到。计算物理光学区域散射场时, 由于驻相点的位置与场点的位置相关, 因此需要在每个角度求取一遍驻相点。这样一来就降低了计算速度。为了解决这一问题, 本文采用了驻相点插值技术。首先在需要求解的平面内通过直接计算得到均匀间隔角度上的驻相点, 然后通过三次样条插值得到任意角度上的驻相点。通过数值实验表明, 插值间隔一般取为 10° 到 20° 左右就能取得很好的精度。采用插值驻相点方法可以大大加快计算速度。

4 计算结果与分析

本文算例所得的结果均为采用 Fortran 语言编写代码, 并在 PC 机上进行计算得到。PC 机的配置为 P4 3.0G, 1G 内存。

算例 1 为球面的在第一象限的一部分, 球面半径为 0.2m, 如图 2 所示。天线长度为 $\lambda/2$, 距离球面 2.2 个波长, 工作频率为 3GHz。天线被分为 19 段。为了说明本文方法的正确性, 另外采用传统基于三角形平面片建模的迭代 MoM-PO 方法计算。驻相点对应的参数平面坐标的直接计算结果和插值结果在图 3 中给出。迭代 5 步后的受扰方向图计算结果在图 4 中给出。3 种方法的计算结果吻合良好, 其中插值驻相点时插值间隔为 20° 。3 种方法的计算时间对比在表 1 中给出, 可以看出插值驻相点的方法的相对于直接计算加快了计算速度。

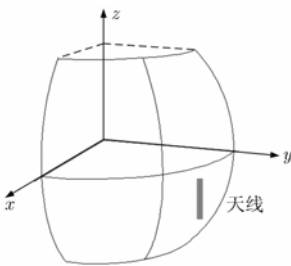


图 2 算例 1 模型

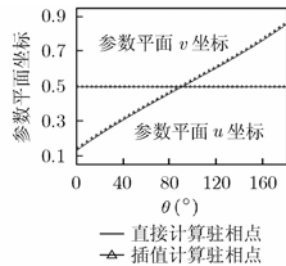


图 3 驻相点位置直接计算结果与插值结果对比

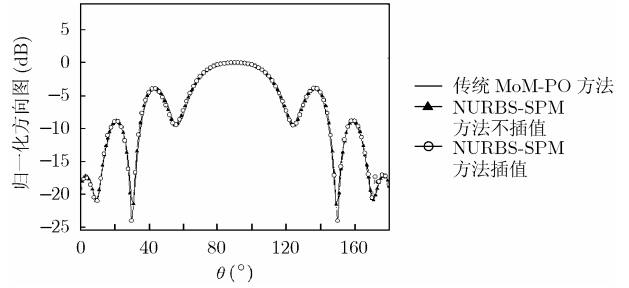


图 4 $\varphi = 45^\circ$ 切面的受扰方向图

表 1 算例 1 各种方法计算时间对比

采用方法	计算时间(s)	加快倍数
传统 MoM-PO 方法	215	
NURBS-SPM 不插值	121	约 2 倍
NURBS-SPM 插值	31	约 4 倍

算例 2 中散射体由 4 个有理贝齐尔曲面构成, 大小为 $5.85\text{m} \times 9.4\text{m} \times 4.28\text{m}$, 如图 5 所示。天线的工作频率为 300MHz, 天线长度为 $\lambda/2$, 放置于 z 方向距离散射体 2.1 个波长处。天线被分为 19 个矩量法子域进行计算。经过 5 次迭代后得到的 xoz 面的方向图如图 6 所示。时间对比在表 2 中给出。

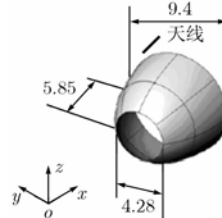


图 5 算例 2 散射体模型

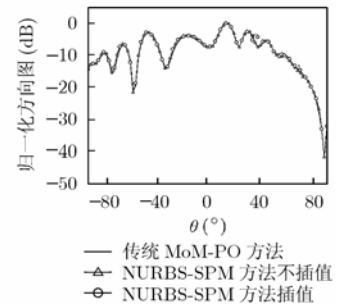


图 6 算例 2 xoz 面方向图

表 2 算例 2 各种方法计算时间对比

采用方法	计算时间(s)	加快倍数
传统 MoM-PO 方法	1067	
NURBS-SPM 不插值	783	约 1.4 倍
NURBS-SPM 插值	177	约 6 倍

通过上述两个算例可以看出插值驻相点方法计算得到的受扰方向图与直接计算得到的方向图吻合良好。在计算速度上插值方法相对于直接计算可以提高速度, 相对传统基于三角形平面片建模的 MoM-PO 方法可以提高计算速度 4 倍到 6 倍, 具有明显的优势。

5 结束语

本文采用 MoM-PO 结合 NURBS 建模技术快速计算天线受电大尺寸散射体影响的受扰方向图。文章推导了基于有理贝齐尔曲面的物理光学散射场公式, 采用驻相法计算了有理贝齐尔曲面上的物理光学电流积分。通过插值驻相点解决了由于需要重复求取驻相点导致的计算速度变慢的缺陷。通过与基于平面片建模的迭代 MoM-PO 方法以及直接计算驻相点的方法的对比说明本文方法的有效性并说明采用插值驻相点方法可以大大加快计算速度。

参 考 文 献

- [1] Perez J and Catedra M F. RCS of electrically large targets modeled with NURBS surfaces. *Electronics Letters*, 1992, 28(12): 1119-1121.
- [2] Perez J and Catedra M F. Application of physical optics to the RCS computation of bodies modeled with NURBS surfaces. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1994, 42(10): 1404-1411.
- [3] Domingo M, Rivas F, and Perez J. Computation of the RCS of complex bodies modeled using NURBS surfaces. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, 37(6): 36-47.
- [4] Perez J, Saiz A, and Conde M. Analysis of antennas on board arbitrary structures modeled by NURBS surfaces. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1997, 45(6): 1045-1053.
- [5] Hu Jin-Lin, Lin Shi-Ming, and Wang Wen-Bing. Computation of PO integral on NURBS surface and its application to RCS calculation. *Electronics Letters*, 1997, 33(3): 239-240.
- [6] Conde M, Perez J, and Catedra M F. Stationary phase method application for the analysis of radiation of complex 3-D conducting structures. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 2001, 49(5): 724-730.
- [7] Chen Ming, Zhang Yu, and Liang Chang-hong. Calculation of the field distribution near electrically large NURBS surfaces with physical-optics method. *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, 2005, 19(11): 1511-1524.
- [8] Chen Ming, Zhang Yu, and Liang Chang-Hong. Calculation of field distribution near electrically large NURBS surface Illuminated with a Dipole. Asia-Pacific microwave Conference, SuZhou, China, December 4-7, 2005.
- [9] Jakobous U, and Landstorfer F M. Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape. *IEEE Trans on Antennas Propagat.*, 1995, 43(1): 162-169.
- [10] Borovikov V A. Uniform Stationary Phase Method, 1st edition, United Kingdom, The Institution of Electrical Engineers, 1994: 79-116.

陈 铭: 男, 1980 年生, 博士生, 从事计算电磁学方面的研究工作.

赵勋旺: 男, 1983 年生, 博士生, 从事计算电磁学、电磁兼容分析工作.

梁昌洪: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE Senior member, 研究方向包括计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面.