

## 利用 PO 修正 MM-UTD 计算机载波导缝隙天线阵的方向图

陈晓洁 王萌 梁昌洪 史小卫

(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:** 针对物理光学方法(PO)中 Ludwig 算法数值发散的问题, 提出了解决方案。以复矢量场为接口, 利用 PO 修正了 MOM-UTD 算法, 并应用于机载波导缝隙天线阵方向图的计算。采用 MOM 分析天线自身的特性, UTD 分析飞机形状简单的大型部件对天线方向图畸变的影响, PO 分析机头等形状复杂的部件的影响。计算结果表明, 此 3 种方法的结合算法适用于计算靠近机头的机载天线的方向图。

**关键词:** 机载波导缝隙阵列天线; 方向图; 一致性几何绕射理论; 矩量法; 物理光学

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1773-03

## Modifying MOM-UTD with PO to Compute the Pattern of the Airborne Waveguide Slot Array

Chen Xiao-jie Wang Meng Liang Chang-hong Shi Xiao-wei

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

**Abstract:** The formula is presented to solve the singular problem of Ludwig's algorithm. And vector field is used as interface to combine Physical Optics (PO) and Uniform Theory of Diffraction (UTD) and MOment Method (MOM) to calculate the airborne antenna. The character of the array is analyzed with MOM, large and simple parts of the plane are analyzed with UTD, and the complex parts are analyzed with PO. The results show that combing these three methods together is a good way for the pattern prediction of the airborne slot array.

**Key words:** Airborne waveguide slot array; Pattern; UTD; MOM; Physical Optics(PO)

### 1 引言

机载波导缝隙阵天线方向图的分析是一个重要的工程问题。由于飞机是电大平台, 因此机载天线方向图的计算往往采用高频算法。UTD 是一种高频射线方法, 已在方向图计算中有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。因此采用 UTD 方法对载机平台进行建模是一个合适的选择。

采用 UTD 方法计算载机平台影响的时候, 飞机只能等效为由板、柱、锥构成的模型。对于机身、机翼等简单形状部件, 作这样的简化是可以接受的。然而, 对于机头这样形状比较复杂的部件, 简化为圆锥是不合适的。因此, 为了保证计算精度。本文提出 PO 修正 MOM 结合 UTD, 计算机载波导缝隙阵天线的受扰方向图。首先, 采用 MOM 分析天线的自身特性; 然后以板、柱对机翼、机身进行近似建模, 并采用 UTD 方法分析其对天线方向图的干扰; 最后以三角形剖分对机头进行建模, 并采用 PO 方法分析其对天线受扰辐射方向图的影响。

需要指出的是, 目前通行的 PO 求积分的 Ludwig 算法的计算公式不够完善, 存在着数值发散的问题。因此本文给出了新的计算公式, 比较完善地解决了 Ludwig 算法中的奇

异性问题。这样, 结合 MOM, UTD 和 PO 3 种方法, 可以准确地分析机载天线的方向图。

### 2 机头对天线影响的 PO 分析

PO 方法本质上也是一种高频分析方法, 它是用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为散射场的源, 然后对表面感应电流积分而求得散射场。Ludwig 算法可以通过三角形三个顶点的值得出面积分的值<sup>[4]</sup>, 因此在电流积分求解时广泛应用。1985 年 Pogorzelski<sup>[5]</sup>和 Santos<sup>[6]</sup>分别对 Ludwig 算法作了重要的推广。对于采用三角形剖分建模的目标, 其中一个三角形面片的积分式可以通过下式计算:

$$I_c = 2\Delta e^{jD_0} \left\{ e^{jD_p} \left[ \frac{C_p + C_0}{D_q(D_q - D_p)} + \frac{C_p + C_0}{D_q D_p} + F_1 - F_2 \right] - e^{jD_q} \left[ \frac{C_q + C_0}{D_q(D_q - D_p)} - F_2 \right] - \frac{C_0}{D_q D_p} - F_1 \right\}$$

式中各字符的具体含义见文献[7], 若  $|D_p| < L_t$  或  $|D_q| < L_t$  或  $|D_q - D_p| < L_t$ , ( $L_t$  表示一个很小的数, 一般取 0.05 即可), 则上式会产生数值上发散, 为了避免数值发散, 要对这些特殊情况分别进行讨论<sup>[7]</sup>, 其中当  $|D_p| \geq L_t$  且  $|D_q| < L_t$  时,

$$I_c = 2S_e e^{jD_0} e^{jD_p} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_q)^n}{n!} \left[ \frac{C_p + C_0}{n+1} G(n+1, -D_p) + \left( \frac{C_q}{n+2} - \frac{C_p}{n+1} \right) G(n+2, -D_p) \right]$$

在上式中

$$G(n, \omega) = \int_0^1 s^n e^{j\omega s} ds = \frac{e^{j\omega} - nG(n-1, \omega)}{j\omega}, \quad n \geq 1 \quad (1)$$

以上公式为目前通行的 Ludwig 算法的计算公式。然而, 式(1)中的迭代算法仍是很不稳定, 很容易发散。为了完善 Ludwig 算法, 本文提出新的计算公式:

$$G(n, \omega) = \int_0^1 s^n e^{j\omega s} ds = \frac{\sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{n!}{(n-k)!} (j\omega)^{n-k} e^{j\omega} + (-1)^{n+1} n!}{(j\omega)^{n+1}} \quad (2)$$

需要指出的是, 上式在  $\omega$  趋近于 0 时依然有奇异性问题, 此时需要将式(2)中的  $e^{j\omega s}$  项以泰勒级数展开, 然后进行积分。最后, 再次给出最终的表达式:

$$G(n, \omega) = \int_0^1 s^n e^{j\omega s} ds = \begin{cases} \frac{\sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{n!}{(n-k)!} (j\omega)^{n-k} e^{j\omega} + (-1)^{n+1} n!}{(j\omega)^{n+1}}, & |\omega| > L_t \\ \sum_{k=0}^n \frac{(j\omega)^k}{k!(k+n+1)}, & |\omega| \leq L_t \end{cases} \quad (3)$$

### 3 UTD 方法分析机翼和机身对天线的影响

除去机头的区域, 其他的部件以板、柱建模, 并采用 UTD 方法分析其对天线辐射方向图的影响。机翼与机身比较大且形状规则, 因此用平板或者圆柱都可以比较好地等效。圆柱以及平板可以很方便地采用 UTD 方法计算其对于天线辐射方向图的影响。UTD 的公式一般都可以简写为以下形式<sup>[5]</sup>:

$$\mathbf{E}^r(R_0) = \mathbf{E}^i \mathbf{B} \mathbf{f}(s) \quad (4)$$

式(4)中  $\mathbf{E}^i$  是反射点、绕射点处的入射场,  $\mathbf{B}$  是反射系数或绕射系数,  $\mathbf{f}(s)$  是传播因子。对于 UTD 算法,  $\mathbf{E}^i$  的求解是关键。

### 4 波导缝隙阵单元的矩量法分析

根据方向图乘积定理, 阵列天线的方向图可以看作阵因子方向图与单元因子方向图的乘积。方向图乘积定理没有考虑单元之间的耦合, 然而对于大型阵列天线, 天线方向图主要决定于阵因子方向图, 不考虑单元之间的耦合而将单元因子与阵因子直接相乘的做法在工程上是行得通的。因此作者在此用 MOM 仅仅计算一个单元的矢量方向图, 然后将其与阵因子相乘, 即可得到阵列天线的总的矢量方向图。

限于篇幅, 本文不再给出 T 型波导缝隙天线的矩量法求解公式, 其具体计算公式见参考文献[8]。T 型波导分析单元

的辐射场与阵因子相乘即可得到 UTD 中反射点、绕射点处的入射电场以及 PO 方法中三角形面片的入射磁场。将入射场, 代入 PO 或 UTD 计算公式, 即可以得到方向图。

## 5 计算实例

**算例 1** 计算式(1), 目前通行的计算方法与本文方法计算结果的比较见表 1, 其中 A 表示目前通行方法的结果, B 表示本文方法的结果。Re、Im 分别表示实部与虚部。从表 1 可以看出在  $\omega = 0.1$  时,  $\omega$  还不算很小, 到  $N = 2$  时就已经发散了。因此原来的方法确实有非常大的局限性。

表 1  $\omega = 0.1$  时, 目前的方法与本文方法计算  $G(n, \omega)$

$N$	Re(A)	Re(B)	Im(A)	Im(B)
0	0.99833	0.99833	0.04996	0.04996
1	0.49875	0.49875	0.0333	0.0333
2	-199.33449	0.33233	-9.9667	0.02497
3	749.87419	0.24917	-17979.98422	0.01998
4	1.91773E6	0.19929	79950.02862	0.01665

**算例 2** 为验证本方法的有效性, 作者设计一个算例, 如图 1 所示。两个板的尺寸以及相对几何位置见图 1。 $\lambda/4$  天线工作频率 300MHz, 位于(0, 3, 3)处。天线采用 MOM 分析, 垂直于 XOY 面的板采用 PO 方法分析, 位于 XOY 面上的板采用 UTD 分析。

为了验证本文方法的有效性, 计算了天线平行于 XOY 面指向 X 轴正向时 XOZ 面的方向图, 如图 2 所示。其中 MOM 中平板采用 RWG 剖分。

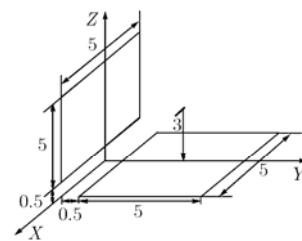


图 1 计算模型

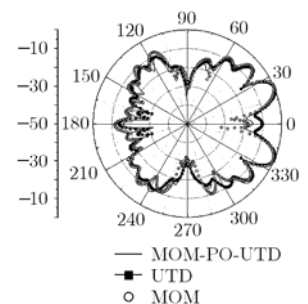


图 2 方向图对比

**算例 3** 飞机模型如图 3, 机头以三角形剖分建模, 机身以圆柱或平板建模,  $80 \times 8$  单元的相控阵天线位于机身上方, 工作频率为 3.25GHz, 方位面、俯仰面方向图分别如图 4 和图 5 所示。

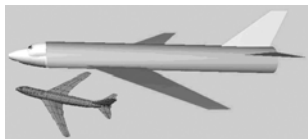


图 3 飞机模型

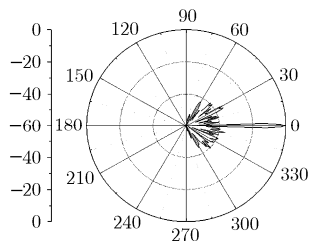


图 4 方位面方向图

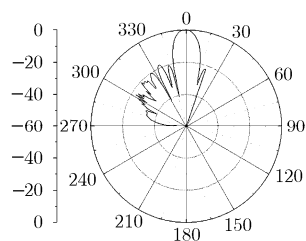


图 5 俯仰面方向图

## 6 结论

从计算结果可以看出, 本文提出的方法可以有效解决 PO 积分中的发散问题。增加了 PO 算法以后, 提高了建模精度, 计算精度也相应有了较大提高。因此, 采用 PO 修正 MOM-UTD 算法计算机载天线方向图是一种非常有效的方法。

## 参考文献

- [1] Wang Meng, Zhang Yu, and Liang Changhong. Analysis of airborne antenna using FEM hybrid UTD method [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(3): 395-399.
- [2] Zhai Huiqing, Wang Lina, and Liang Changhong. A hybrid method of MoM and PO Modified by UTD [J]. *Chinese*

*Journal of Radio Science*, 2003, 18(5): 529-533.

- [3] Wang Maoguang. Geometrical Theory of Diffraction [M]. Xi'an: Publishing house of xidian university, 1994.
- [4] Ludwig A C. Computation of radiation patterns involving numerical double integration [J]. *IEEE Trans. on AP*, 1968, 11(6): 767-769.
- [5] Pogorzelski R J. On the Ludwig integration algorithm for triangular subregions. *Proc. IEEE*, 1985, 73(4): 837-838.
- [6] dos Santos M L X and Rabelo N R. On the Ludwig integration algorithm for triangular subregions [J]. *Proc. IEEE*, 1986, 74(10): 1455-1456.
- [7] Moreira Fernando J S and Prata A. A self-checking predictor-corrector algorithm for efficient evaluation of reflector antenna radiation integrals [J]. *IEEE Trans. on AP*, 1994, 42(2): 246-254.
- [8] Jensen A. Slotted waveguides: An analysis of T-slotted for array applications [D]. California USA: California State University, 2000.

陈晓洁: 女, 1980 年生, 教授, 博士生, 研究方向为电磁场数值计算。

王 萌: 男, 1980 年生, 教授, 博士生, 研究方向为电磁场数值计算。

梁昌洪: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等。

史小卫: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能天线、射频识别和电磁兼容。