

## 机载超宽带天线罩物理光学分析方法

张强<sup>①②</sup> 曹伟<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(南京邮电大学电子工程系 南京 210003)

<sup>②</sup>(南京电子技术研究所天线与微波技术国家级重点实验室 南京 210013)

**摘要** 该文提出了机载超宽带天线罩口径积分-表面积分-自适应网格(AI-SI-AG)分析方法。给出了用 AI-SI-AG 的计算和实测结果。理论分析和实验结果表明,该算法能够高效地预测定向和全向天线的带罩方向图,理论计算与实际测试符合较好,在工程应用中较大的实用价值。

**关键词** 机载宽带天线罩,口径积分-表面积分,物理光学方法

中图分类号: TN820.8+1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)01-0100-03

## The Physical Optics Analysis Method for Ultra-wideband Airborne Radome

Zhang Qiang<sup>①②</sup> Cao Wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology,

Nanjing Research Institute of Electric Technology Nanjing 210013, China)

**Abstract** In this paper, a method of the Aperture-Integration, Surface-Integration and Adaptive Grid (AI-SI-AG) for ultra-wideband airborne radome analysis is presented. The theoretical results by AI-SI-AG and measured data are given. It is found that by this method the pattern of omni-directional-antenna and directional-antenna enclosed in radome can be computed efficiently and the theoretical results agree with measurement quite well. It has shown significant practical value in engineering applications.

**Key words** Wide-band airborne radome, Aperture integration, Surface integration, Physical-optical method

### 1 引言

电子战对宽带和超宽带天线罩的需要越来越迫切,超宽带天线罩是机载电子战系统的重要组成部分,其性能倍受关注。机载超宽带天线罩位于载机的突出部位,天线罩内布置多种频段的的天线,频率覆盖很宽的范围(例如 1-20GHz),罩内天线电尺寸较小而天线罩相对于波长尺寸较大,给天线罩电性能分析计算带来困难,表现在:几何射线跟踪方法虽然适用于电大天线罩分析<sup>[1]</sup>,但是要求天线口径大于 20 个波长,高频近似方能成立;矩量法(MoM)能精确分析天线罩内场分布<sup>[2]</sup>,但是,对于电大天线罩夹层结构,需要巨大的计算机内存和计算时间;如果采用有限元法(FEM)或有限时域差分法(FDTD),由于色散使波在网格中的相速不同,所以一般采用致密网格,区域越大,网格越细这样便增加了计算量,因为误差的积累,一般不适于电大尺寸物体的运算。

长期以来,机载宽带天线罩的设计和计算,仍然依赖于等效平板的估算<sup>[3]</sup>,天线加罩后的辐射方向特性计算方法一直未见报道,本文以物理光学为基础<sup>[4]</sup>,提出了一种机载超宽带天线罩的(AI-SI-AG)分析方法,算法的步骤是:(1)首先采

用口径矢量积分(AI)求得宽带天线的辐射近场,将天线罩表面近似为局部的平面,入射到内表面的场近似为平面波,其传播方向由入射电磁场的玻印亭矢量确定;(2)将入射场分解为平行和垂直两种极化波,用二端口网络理论,计算多层平板介质结构的复传输系数和复反射系数,以确定罩表面的透射场和反射场量的切向分量。(3)采用一种自适应网格技术(AG),沿天线罩外表面对电场和磁场的切向分量作表面积分(SI)求远区辐射场量得到带罩天线的辐射方向图。

AI-SI-AG 算法中网格大小是频变的,节省了计算时间,使用该技术,生成了极细化网格,克服了固定尺寸网格在低频段浪费计算时间,而在高频端积分不收敛的弊病,采用 AI-SI-AG 算法解决了超宽带天线罩对罩内天线方向图影响的问题,得到了一组理论计算数据,并与实测进行了比较,结果表明:理论计算与实际测试符合较好。

### 2 算法原理

#### 2.1 用口径积分方法计算入射到天线罩内表面的切向场

假定天线口径为  $A$ , 法向为  $n_a$ , 激励的电场为  $E_a$ , 等效磁流为

$$J_m = E_a \times n_a \quad (1)$$

电矢量

$$F = \varepsilon \iint J_m \exp(jkr) / (4\pi r) ds \quad (2)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为天线辐射电磁波在自由空间中的波长,  $r = |\mathbf{r}| = |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_a|$ ,  $\mathbf{r}_s$  是天线罩上场点的位置矢量,  $\mathbf{r}_a$  是天线口径源点的位置矢量, 并设  $\hat{\mathbf{r}}$  是  $\mathbf{r}$  的单位矢量。仅对场点作  $\nabla$  运算, 得到入射到天线罩上的电场和磁场:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\nabla \times \mathbf{F} / \varepsilon = -\nabla \times \iint J_m \exp(-jkr) / (4\pi r) ds \\ &= -\iint \left( jk + \frac{1}{r} \right) J_m \times \hat{\mathbf{r}} \exp(-jkr) / (4\pi r) ds \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \nabla \times \nabla \times \mathbf{F} / (j\omega\mu\varepsilon) \\ &= \frac{1}{j4\pi\omega\mu} \iint \frac{\exp(-jkr)}{r} \left[ -J_m \frac{1}{r} \left( jk + \frac{1}{r} \right) \right. \\ &\quad \left. - (\mathbf{J}_m \cdot \hat{\mathbf{r}}) \hat{\mathbf{r}} \left( k^2 - \frac{j3k}{r} - \frac{3}{r^2} \right) + k^2 J_m \right] ds \end{aligned} \quad (4)$$

入射到天线罩内表面上的电磁场能流密度:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) + \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \exp(j2\pi t)) \quad (5)$$

\* 表示共轭, 第二项对时间的平均值为 0, 入射波的传播方向单位矢量为

$$\hat{\mathbf{s}} = \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) / |\text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)| \quad (6)$$

## 2.2 用等效平板网络理论计算天线罩外表面的切向场

天线罩壁局部可以等效为  $N$  层的介质平板, 用二端口网络理论, 得到总级联 A 矩阵:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{i=N} \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $A_i = D_i = \text{ch}(j\gamma_i d_i)$ ,  $B_i = Z_{0i} \text{sh}(j\gamma_i d_i)$ ,  $C_i = \text{sh}(j\gamma_i d_i) / Z_{0i}$ ;  $\gamma_i = 2\pi \sqrt{\hat{\varepsilon}_i - \sin^2 \theta} / \lambda$ 。其中  $d_i$  是第  $i$  层的厚度,  $\hat{\varepsilon}_i$  是第  $i$  层的复介电常数,  $\theta$  是入射角, 满足  $\cos \theta = \hat{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{n}$ ,  $\mathbf{n}$  为入射点处的单位外法向矢量,  $Z_{0i}$  是第  $i$  层对自由空间归一化特征阻抗: 对平行极化,

$Z_{0i} = Z_{//} = \sqrt{\hat{\varepsilon}_i - \sin^2 \theta} / [\hat{\varepsilon}_i \cos \theta]$ , 对垂直极化,  $Z_{0i} = Z_{\perp} = \cos \theta / \sqrt{\hat{\varepsilon}_i - \sin^2 \theta}$ 。罩壁对电波的透过系数和反射系数为

$$T = \frac{2}{A + B + C + D} = T_0 \exp(-j\phi_t) \quad (8)$$

$$R = \frac{A + B - C - D}{A + B + C + D} = R_0 \exp(-j\phi_r) \quad (9)$$

透过场的切向场矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^t &= E_{//}^t T_{//0} \exp(-j\eta_{//}) \mathbf{e}_{//} + E_{\perp}^t T_{\perp 0} \exp(-j\eta_{\perp}) \mathbf{e}_{\perp} \\ \mathbf{H}^t &= H_{//}^t T_{//0} \exp(-j\eta_{//}) \mathbf{e}_{//} + H_{\perp}^t T_{\perp 0} \exp(-j\eta_{\perp}) \mathbf{e}_{\perp} \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\eta = \phi_t - 2\pi d \cos \theta / \lambda$ ,  $d = \sum_{i=1}^N d_i$ 。  $\mathbf{e}_{//}$ 、 $\mathbf{e}_{\perp}$  是在罩壁上

平行分量和垂直分量的单位矢量。 $\mathbf{n}$  是罩壁的外法线单位矢量。 $E_{//}^i$ 、 $E_{\perp}^i$ 、 $H_{//}^i$ 、 $H_{\perp}^i$  表示罩内壁入射电场和磁场场量的平行分量和垂直分量。

## 2.3 用表面积分计算远场

沿天线罩外表面所在的曲面上对切向电场和磁场作矢量积分, 求得远区的辐射场量:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\theta, \varphi) &= -\frac{jk}{4\pi R} \exp(-jkR) \hat{\mathbf{r}} \\ &\quad \times \iint \left[ \mathbf{n} \times \mathbf{E}^t - \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{n} \times \mathbf{H}^t \right] \exp(jk\mathbf{r}' \cdot \hat{\mathbf{r}}) ds \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $R$  是天线到远区观察点的距离,  $\hat{\mathbf{r}}$  是其单位矢量,  $\mathbf{r}'$  是曲面采样点位置矢量, 对任意曲面的表面积分一般离散为数值求和, 采样点的间距取决于工作频率。

## 2.4 用自适应网格进行表面积分的数值计算

对于任意曲面的天线罩的外形, 表面积分是对数模网格的数值求和, 一般地, 表面矢量积分收敛的条件是: 采样点间距小于四分之一波长, 频率每增加一倍, 网格的边长缩小一倍, 网格数量增加 4 倍, 宽带天线罩表面积分的计算量随频率急剧增加。自适应网格技术就是以低频网格为基础, 在不同频率点上, 对基本网格进行细化, 以增加积分采样点, 频率越高, 采样点越密, 使积分一致性收敛。

不失一般性, 以图 1 所示的三角形为例, 设  $A$ ,  $B$ ,  $C$  分别为三角形的顶点, 它们的坐标为  $(x_a, y_a, z_a)$ ,  $(x_b, y_b, z_b)$ ,  $(x_c, y_c, z_c)$ 。

设  $AC$  为最长边, 在  $AC$  上作  $n$  等分, 使  $AC/n < \lambda/4$ , 过各等分点, 作与边  $AB$  的平行线, 与边  $AC$  相交得到线段(包括  $AB$ ), 记为  $j=1, 2, \dots, n+1$ , 再作与边  $AC$  的平行线, 与边  $AB$  相交得到得到线段记为  $i=1, 2, \dots, n+1$ , 三角形亚网格的所有节点均由  $i, j$  唯一地确定, 设:  $AB$  两点之间构成一矢量, 其单位矢量记为:  $\hat{\mathbf{e}}_{ab}$ ; 同理定义, 单位矢量  $\hat{\mathbf{e}}_{ac}$ 。设:  $\Delta_{ab} = AB/n$ ,  $\Delta_{ac} = AC/n$  则亚网格的节点位置矢量可以通过以下公式得到:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_{i,1} &= \mathbf{r}_{1,1} + \hat{\mathbf{e}}_{ab} \Delta_{ab} (i-1), & i &= 2, \dots, n+1 \\ \mathbf{r}_{1,j} &= \mathbf{r}_{1,1} + \hat{\mathbf{e}}_{ac} \Delta_{ac} (j-1), & j &= 2, \dots, n+1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_{i,j} = \mathbf{r}_{i,j-1} + \hat{\mathbf{e}}_{ac} \Delta_{ac} (j-1), \quad j = 2, \dots, n+1 \quad (13)$$

得到  $(n-1)n/2$  个全等平行四边形,  $n$  个全等三角形, 总亚网格数 =  $(n+1)n/2$ , 对所有亚网格求中心点坐标和单元面积代入式(11)即可。

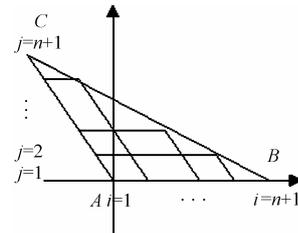


图 1 三角形单元中的亚网格剖分

### 3 仿真与实测结果比较

假定罩内天线为一组非频变天线,定向天线的口径和全向天线均采用理想分布,天线分布在罩内不同部位,工作带宽 0.5–18GHz,为简化起见,与通常的 PO 算法一样,天线罩对天线口径场的影响近似忽略不计。

#### 3.1 天线罩对宽带天线方位方向图影响

采用 AI-SI-AG 技术,计算了翼尖罩对罩内定向天线和全向天线方向图的影响,并与实际测试的数据进行了比较。为能够清楚起见,对理论计算采用了归一化处理,对测试结果则给出了实测的方向图绝对电平值。从图 2 可见,理论预测天线罩对定向天线方向图影响很小,与实际测试一致。图 3 给出了天线罩对理想的全向天线方向图影响,理论与实测存在一定的误差,原因是实际测试的结果包括天线座、周围天线及测试支架在内的全向天线的辐射方向图。从图 3 上可以明显地看到,理论计算预示在低频端天线加罩后方向图基本保持不变,在中频和低频,60 度以外的角度上加罩后方向图

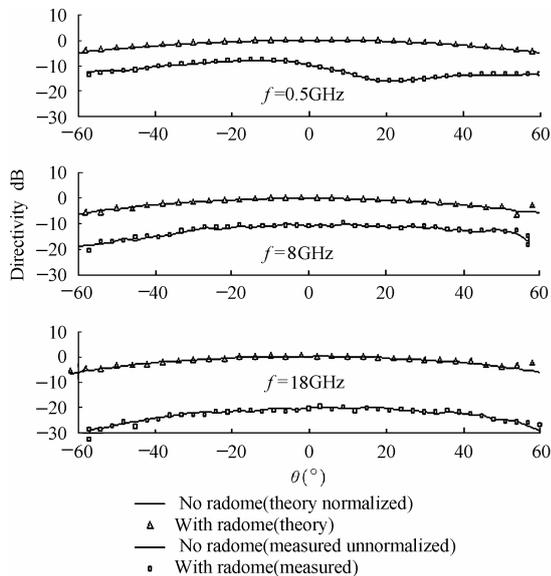


图 2 天线罩对宽带定向天线方向图影响(理论与实测的比较)

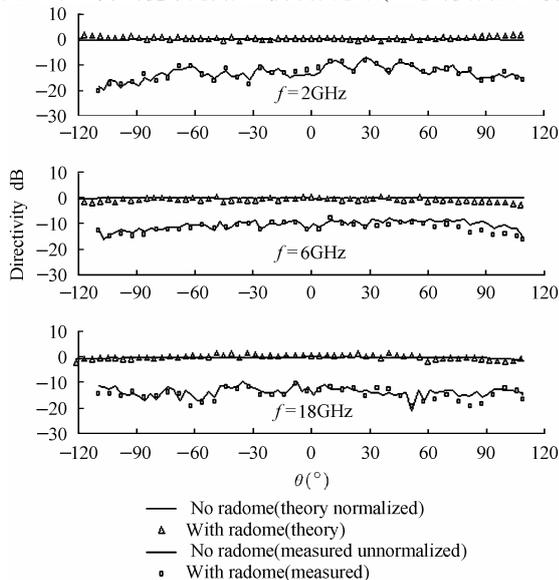


图 3 天线罩对宽带全向天线方向图影响(理论与实测的比较)

曲线有下降的现象,这些,都被测试结果所印证。

#### 3.2 天线罩平均功率传输系数

天线罩在方位面上的平均功率传输系数计算值与实测数据列于表 1 和表 2,理论预测与实测符合较好。在某些频率点,由于空间方向图出现了起伏,部分频率点的平均功率传输系数大于 100%。

表 1 天线罩平均功率传输系数(定向天线)

频率 (GHz)	测试 (%)	理论 (%)
0.5	104.6	100.7
1	108.4	102.42
2	98.1	104.8
4	80.9	85.06
8	84.4	83.49
12	89.7	91.1
16	78.0	84.6
18	77.5	85.7

表 2 天线罩平均功率传输系数(全向天线)

频率 (GHz)	测试 (%)	理论 (%)
2	97.5	100.3
4	103.1	91.69
6	105.6	89.37
12	108.1	93.26
16	89.6	85.96
18	96.5	100.3

### 4 结束语

本文提出了口径积分-表面积分-自适应网格方法(AI-SI-AG),定量分析了电大尺寸天线罩对宽带天线方向图的影响,比较了仿真与试验的结果,证明了算法的有效性;AI-SI-AG 算法的计算精度比三维射线法高得多;需要的内存和时间比矩量法要小得多;不会像有限时域差分法(FDTD)要求细小三维网格导致需要大量的内存和循环时间,也不需要建立完全吸收的边界条件;避免了谱域法冗长的波谱数值积分求和运算;对天线的口径没有限制,可用于定向天线和全向天线的带罩方向性分析;所以在工程使用上具有较高的实用价值。

致谢 殷连生研究员对本文提出宝贵的修改意见,在此谨表谢意。

### 参考文献

- [1] Shifflett J A. CADDRAD: A physical optics radar/radome analysis code for arbitrary 3D geometries[J]. *IEEE AP Magazine*, 1997, 39(6): 73–79.
- [2] Moneum M A A. Hybrid PO-MoM analysis of large axisymmetric radome. *IEEE Trans. on AP*, 2001, 49(12): 1657–1666.
- [3] Loyet D L. Broadband radome design techniques. Proceedings of the 13<sup>th</sup> symposium on electromagnetic windows, Georgia Institute of Technology, Boston, 1980: 169–173.
- [4] Paris D T. Digital computer analysis of aperture antennas [J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 1968, 16(3): 262–264.

张 强: 男,1962 年生,研究员级高级工程师,长期从事雷达罩电讯设计的研究工作。

曹 伟: 男,1939 年生,教授,长期从事电磁理论、应用数学天线、电波传播、微波技术、电磁兼容等学科领域的教学和科研工作。