

运用谱域法分析天线罩对天线方向图的影响¹

曹祥玉 高 军* 梁昌洪 戴国宪*

(西安电子科技大学微波电信工程系 西安 710071)

*(空军工程大学导弹学院 陕西三原 713800)

摘 要 该文利用谱域法分析了天线罩对天线方向图的影响, 计算了加天线罩后, 天线-天线罩等效体辐射方向图, 得到了与实验结果相吻合的结论, 并对某型机载吊舱干扰机中天线罩对天线方向图的影响给出了定量说明, 为天线、天线罩设计提供了参考依据。

关键词 谱域法, 天线罩, 方向图, 同轴双环多模喇叭天线

中图分类号 TN820

1 引言

本文来源于某型机载吊舱干扰机, 天线采用的是同轴双环多模喇叭。课题要求天线在天线罩内向下倾斜 15° 安装, 以便对地面雷达实施定向干扰。天线罩对天线性能的影响, 通常用几何光学的单一平面波射线跟踪法进行分析, 但是, 这种方法要求天线口径场是单一平面波, 对小天线, 天线罩处于天线近区场内, 由于存在绕射等效应, 到达天线罩上的场不是完纯平面波, 所以用此方法计算较小天线罩的性能是很难令人满意的, 而平面波谱法对此分析却有独到之处。本文采用平面波谱法对带罩同轴双环多模喇叭一体化远区辐射方向图进行了仿真分析, 获得了满意的结果。并对加罩前后天线辐射方向图计算结果进行了对比, 说明了天线罩对天线辐射方向图的影响, 为天线-天线罩一体化设计提供了理论依据。

2 理论分析

2.1 天线罩结构与参数 天线罩采用的是 A 夹层结构, 内外层是高介电常数的玻璃纤维, 中间层采用的是纸蜂窝结构材料。天线罩形状为旋转对称抛物面型, 其曲线方程为

$$X_R^2 + Y_R^2 = R^2 \left[1 - \frac{Z_R}{L} \right] \quad (1)$$

天线在天线罩中的位置如图 1 所示, 天线坐标系为 $o-xyz$, 天线罩坐标系为 $O-X_R Y_R Z_R$, 利用平面波谱法分析三维天线-天线罩系统可分为 3 步^[1]。首先对辐射天线积分, 确定入射于

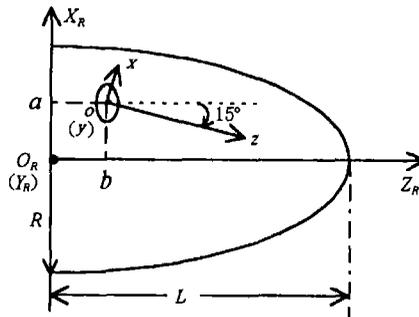


图 1 天线罩结构参数示意图

¹ 1999-11-09 收到, 2000-04-24 定稿

天线罩内表面上的近场。然后, 计算透过天线罩壁的场, 即天线罩外表面上的透过场。最后根据沿罩外表面上切线场分布对天线罩外表面积分, 求得天线-天线罩综合体远区辐射方向图。下面分别对此 3 个步骤加以说明。

2.2 平面波谱法计算天线罩内表面场 根据平面波谱理论^[2], 天线在空间任意点所产生的电场与平面波谱的关系为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}(k_x, k_y) e^{-j\mathbf{k}\mathbf{r}} dk_x dk_y \quad (2)$$

其中 $\tilde{F}(k_x, k_y) = \tilde{F}_x(k_x, k_y)\mathbf{k}_x + \tilde{F}_y(k_x, k_y)\mathbf{k}_y + \tilde{F}_z(k_x, k_y)\mathbf{k}_z$, 为同轴双环多模喇叭的平面波谱, 其具体表达式参见文献^[3]。

这样在天线罩内表面其电场的各个分量分别为

$$\left. \begin{aligned} E_x(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}_x(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y \\ E_y(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}_y(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y \\ E_z(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}_z(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于 $\mathbf{H}_k(\mathbf{r}) = \frac{1}{Z_0} \mathbf{k} \times \mathbf{E}_k(\mathbf{r})$, 所以平面波谱中每一根谱线的磁场为

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{k_x, k_y}(x, y, z) &= \frac{1}{\omega_0 \mu_0} k_{k_x, k_y} \times \mathbf{E}_{k_x, k_y}(x, y, z) \\ &= iH_x(k_x, k_y) + jH_y(k_x, k_y) + \mathbf{k}H_z(k_x, k_y) \end{aligned} \quad (4)$$

将所有子平面波产生的磁场叠加, 可得由磁场的平面波谱分量组合成的总磁场的各个分量为

$$\left. \begin{aligned} H_x(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_x^2 \tilde{F}_y - k_x k_y \tilde{F}_x}{\omega_0 \mu_0 k_z} dk_x dk_y \\ H_y(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-k_y^2 \tilde{F}_x + k_x k_y \tilde{F}_y}{\omega_0 \mu_0 k_z} dk_x dk_y \\ H_z(x, y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_x \tilde{F}_y - k_y \tilde{F}_x}{\omega_0 \mu_0} dk_x dk_y \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.3 平面波谱对天线罩壁的入射角和极化角 平面波谱对天线罩壁的入射角是由平面波谱的入射线方程 \mathbf{P}_{A_0} 和天线罩壁的外法线方程 \mathbf{n}_{RM_0} 决定的。对每一子平面波 (s_ρ, φ') , 其入射角 $\theta_0(s_\rho, \varphi') = \arccos[\mathbf{P}_{A_0}(s_\rho, \varphi') \cdot \mathbf{n}_{RM_0}]$ 。每一子平面波入射线方程为 $\mathbf{P}_{A_0}(s_\rho, \varphi') = ik_x + jk_y + zk_z$ 。而天线罩外壁任意点 M 外法线方程为 $\mathbf{n}_{RM_0} = iR n_{iRM} + jR n_{jRM} + kR n_{kRM}$; 它是由天线罩曲线方程 (1) 式确定。其中 $n_{iRM} = 2X_R/G_M$; $n_{jRM} = 2Y_R/G_M$; $n_{kRM} = (R^2/L)/G_M$; $G_M = \sqrt{(2X_R)^2 + (2Y_R)^2 + (R^2/L)^2}$ 。由于子平面波的入射线方程 \mathbf{P}_{A_0} 是天线坐标系中的表达式, 而天线罩外法线方程 \mathbf{n}_{RM_0} 是天线罩坐标系中的表达式, 为求子平面波对天线罩壁的入射角, 首先须进行坐标变换。天线坐标系 xyz 与天线罩坐标系 $X_R Y_R Z_R$ 变换关系为

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega & 0 & -\sin \Omega \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Omega & 0 & \cos \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ a \end{bmatrix}$$

则在天线罩坐标系中, 子平面波的入射线方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{A_0} &= i_R V_1 + j_R V_2 + k_R V_3 \\ V_1 &= S_\rho \cos \varphi' \cos \Omega - \sqrt{1 - S_\rho^2} \sin \Omega \\ V_2 &= S_\rho \sin \varphi' \\ V_3 &= \sqrt{1 - S_\rho^2} \cos \Omega + S_\rho \cos \varphi' \sin \Omega \end{aligned}$$

则子平面波的入射角:

$$\theta_0(S_\rho, \varphi') = \arccos(n_{iRM} V_1 + n_{jRM} V_2 + n_{kRM} V_3) \quad (6)$$

同理可得在天线罩坐标系中, 天线在天线罩内表面所产生的近场为

$$\mathbf{E}(S_\rho, \varphi') = i_R E_i(S_\rho, \varphi') + j_R E_j(S_\rho, \varphi') + k_R E_k(S_\rho, \varphi')$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} E_i(S_\rho, \varphi') = E_x(S_\rho, \varphi') \cos \Omega - E_z(S_\rho, \varphi') \sin \Omega \\ E_j(S_\rho, \varphi') = E_y(S_\rho, \varphi') \\ E_k(S_\rho, \varphi') = E_x(S_\rho, \varphi') \sin \Omega + E_z(S_\rho, \varphi') \cos \Omega \end{cases}$$

$$\mathbf{H}(S_\rho, \varphi') = i_R H_i(S_\rho, \varphi') + j_R H_j(S_\rho, \varphi') + k_R H_k(S_\rho, \varphi')$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} H_i(S_\rho, \varphi') = H_x(S_\rho, \varphi') \cos \Omega - H_z(S_\rho, \varphi') \sin \Omega \\ H_j(S_\rho, \varphi') = H_y(S_\rho, \varphi') \\ H_k(S_\rho, \varphi') = H_x(S_\rho, \varphi') \sin \Omega + H_z(S_\rho, \varphi') \cos \Omega \end{cases}$$

2.4 透过天线罩壁场的计算 子平面波 (S_ρ, φ') 的入射角 $\theta_0(S_\rho, \varphi')$ 和极化角 $\phi_0(S_\rho, \varphi')$ 既是 S_ρ, φ' 的函数, 也是天线罩位置的函数. 子平面波透过天线罩以后, 在天线罩外表面上形成切面场 $E_t^{R\text{out}}(S_\rho, \varphi')$ 为

$$\begin{aligned} E_t^{R\text{out}}(S_\rho, \varphi') &= [\mathbf{n}_{BM_0} \cdot \mathbf{E}(S_\rho, \varphi')] \mathbf{n}_{BM_0} T_\perp[\theta_0(S_\rho, \varphi')] + [\mathbf{t}_{BM_0} \cdot \mathbf{E}(S_\rho, \varphi')] \mathbf{t}_{BM_0} T_\parallel[\theta_0(S_\rho, \varphi')] \\ &= i_R E_{ix}^{R\text{out}}(S_\rho, \varphi') + j_R E_{iy}^{R\text{out}}(S_\rho, \varphi') + k_R E_{iz}^{R\text{out}}(S_\rho, \varphi') \end{aligned}$$

其中 \mathbf{n}_{BM_0} 为入射平面的单位垂线方向, $\mathbf{t}_{BM_0} = \mathbf{n}_{BM_0} \times \mathbf{n}_{RM_0}$ 为天线罩表面的切线方向, T_\parallel 和 T_\perp 分别为天线罩对水平极化波和垂直极化波的透过系数, 则在天线罩外表面形成的切面总场为

$$\left. \begin{aligned}
 E_{tx}^{Rout}(X_R, Y_R, Z_R) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [(E_i p_{BM} + E_j q_{BM} + E_k r_{BM}) p_{BM} T_{\perp} \\
 &\quad + (E_i p_{tM} + E_j q_{tM} + (E_k r_{tM}) p_{tM} T_{\parallel})] dS_{\rho} d\varphi' \\
 E_{ty}^{Rout}(X_R, Y_R, Z_R) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [(E_i p_{BM} + E_j q_{BM} + (E_k r_{BM}) q_{BM} T_{\perp} \\
 &\quad + (E_i p_{tM} + E_j q_{tM} + E_k r_{tM}) q_{tM} T_{\parallel}] dS_{\rho} d\varphi' \\
 E_{tz}^{Rout}(X_R, Y_R, Z_R) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [(E_i p_{BM} + E_j q_{BM} + E_k r_{BM}) r_{BM} T_{\perp} \\
 &\quad + (E_i p_{tM} + E_j q_{tM} + E_k r_{tM}) r_{tM} T_{\parallel}] dS_{\rho} d\varphi'
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned}
 H_{tx}^{Rout}(X_R, Y_R, Z_R) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [(H_i p_{BM} + H_j q_{BM} + H_k r_{BM}) p_{BM} T_{\parallel} \\
 &\quad + (H_i p_{tM} + H_j q_{tM} + H_k r_{tM}) p_{tM} T_{\perp}] dS_{\rho} d\varphi' \\
 H_{ty}^{Rout}(X_R, Y_R, Z_R) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [(H_i p_{BM} + H_j q_{BM} + H_k r_{BM}) q_{BM} T_{\parallel} \\
 &\quad + (H_i p_{tM} + H_j q_{tM} + H_k r_{tM}) q_{tM} T_{\perp}] dS_{\rho} d\varphi' \\
 H_{tz}^{Rout}(X_R, Y_R, Z_R) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [(H_i p_{BM} + H_j q_{BM} + H_k r_{BM}) r_{BM} T_{\parallel} \\
 &\quad + (H_i p_{tM} + H_j q_{tM} + H_k r_{tM}) r_{tM} T_{\perp}] dS_{\rho} d\varphi'
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2.5 天线—天线罩远区辐射场 对天线罩外表面上的电场和磁场沿天线罩外表面积分, 可精确计算天线—天线罩综合体的远区辐射场。如图 2 所示, 在天线罩坐标系里 $\overline{ORP} = r$ 是观察方向, $|r| = r$ 是天线罩原点到观察点距离。 r' 是天线罩外表面上原点坐标, r_1 是源点到观察点的矢量距离, R_1, ρ_1 分别是 r 和 r' 的单位矢量。当 P 点在无穷远时, r_1 的方向与 r 平行, R_1 近似为 r_1 的单位矢量, 此时远区辐射场为

$$\mathbf{E} = -\frac{jk_0}{4\pi r} e^{jk_0 r} \mathbf{R} \times \int \int_{S_R} \left\{ \mathbf{n}_{RM_0} \times \mathbf{E}_t^{Rout} - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \mathbf{R}_1 \times \mathbf{n}_{RM_0} \times \mathbf{H}_t^{Rout} \right\} e^{jk_0 r'} \cdot \mathbf{R}_1 dS_R \quad (9)$$

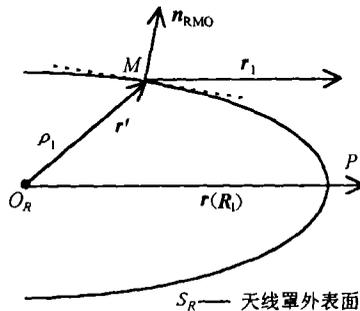


图 2 天线罩远场计算参数示意图

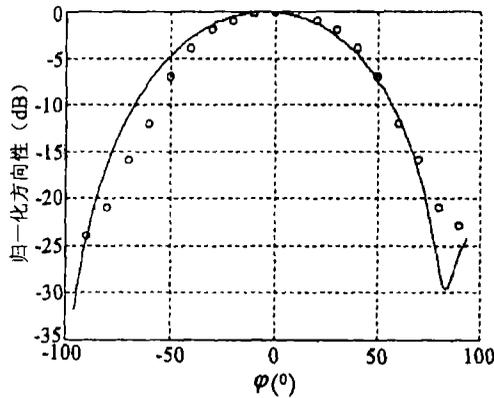


图 3 辐射方向图

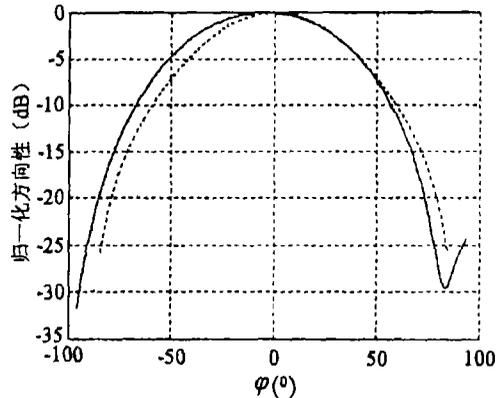


图 4 辐射方向图

在天线罩坐标系中:

$$r' = i_R X_{RM} + j_R Y_{RM} + k_R Z_{RM}, \quad R_1 = i_R \sin \theta_R \cos \psi_R + j_R \sin \theta_R \sin \psi_R + k_R \cos \theta_R$$

由于分布在曲面上的曲面积分是分布在曲面上的三重积分的推广, 对积分区域的曲面, 若 (1) 它是分段光滑的, (2) 曲面的方向取向外的方向为正, 则有

$$dS_R = \sqrt{1 + Z_{X_R}^2(X_R, Y_R) + Z_{Y_R}^2(X_R, Y_R)} dX_R dY_R$$

3 计算结果与测量结果比较

作为对上述分析方法的检验, 本文对同轴双环多模喇叭天线-天线罩辐射方向图进行了分析计算, 天线罩采用 A 夹层结构型, 内外蒙皮采用玻璃纤维材料, 介电常数为 0.015, 夹芯层采用的是纸蜂窝材料, 介电常数为 0.004。图 3 是天线-天线罩等效体辐射方向图, 其中实线为采用本文方法计算结果, $\circ\circ\circ$ 是在微波暗室测量值。由图可见, 二者符合很好, 从而验证了本文分析方法的有效性和正确性。图 4 是加天线罩前、后同轴双环多模喇叭辐射方向图计算结果, 其中实线是同轴双环多模喇叭天线-天线罩等效体辐射方向图; 虚线是无天线罩时同轴双环多模喇叭辐射方向图。对比可以看出天线罩对天线辐射方向图的影响: 加罩后主瓣略加宽 (约 5°), 方向图零点偏移约 4° , 这主要是由于由天线辐射出的电磁波到达天线罩表面后, 由于在天线罩表面不同位置, 透过波和反射波振幅和相位叠加造成的。根据这一结论, 我们在天线和天线罩设计时, 根据天线罩对天线辐射方向图的影响, 将天线-天线罩等效为一体进行参数设计, 通过调整天线设计参数, 将天线罩对天线辐射特性的影响减小到最小。

4 结束语

本文采用谱域法预测了某型机载吊舱干扰机天线罩对天线辐射特性的影响, 得到了天线罩对天线辐射特性影响的具体参数, 为天线和天线罩的设计、安装提供了参考。本文设计的天线、天线罩已通过外场试验, 并得到了实际应用。

参 考 文 献

- [1] 杜耀惟, 天线罩电信设计方法, 北京, 国防工业出版社, 1993, 404-416.
- [2] 方大纲, 电磁理论中的谱域方法, 合肥, 安徽教育出版社 1995 年 6 月第一版, 93-99.

- [3] 曹祥玉, 机载干扰机天线系统 EMC 研究, [博士论文], 陕西三原, 空军导弹学院 1999.5

ANALYSIS OF THE EFFECT OF RADOME ON ANTENNA RADIATION WITH THE SPECTRAL DOMAIN APPROACH

Cao Xiangyu Gao Jun* Liang Changhong Dai Guoxian*

(Dept. of Microwave Telecom. Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

*(Missile Institute Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract In this paper, the effect of radome on antenna radiation with the spectral-domain approach is analyzed. Radiated pattern of antenna with radome is calculated, and the conclusion is got that the experimental results agree with the calculated. The quantitative analysis of the effect of radome on antenna radiated pattern is given and provide valuable basis for the design of antenna and radome.

Key words Spectral-domain approach, Radome, Directional pattern, Coaxial multi-mode horn of two chokes

- 曹祥玉: 女, 1964 年生, 博士, 副教授, 曾获国家科技进步三等奖 (并获军队科技进步一等奖), 现在西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士后流动站, 已发表有关天线、天线罩、EMC 等方面论文 20 余篇。
- 梁昌洪: 男, 1943 年生, 现为西安电子科技大学校长, 教授, 博士生导师, 并为中国电子学会会士, IEEE Senior Member。研究方向包括计算场论、计算微波、微波网络理论、近代数据处理、电磁散射与逆散射。
- 高 军: 男, 1962 年生, 副教授, 主要研究方向: 防空武器系统电子抗干扰。
- 戴国宪: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 防空武器系统电子抗干扰。曾获国家科技大会奖, 并多次获军队科技进步奖。