

机载螺旋天线辐射特性的研究

刘其中 李 莉

(西安电子科技大学天线研究所 西安 710071)

摘要 本文用螺旋的半圆近似法计算了阿基米德螺旋天线的辐射场。应用几何绕射理论(GTD)导出了机载螺旋天线辐射场的计算公式。计算结果与实测结果进行了比较,两者吻合较好。

关键词 机载阿基米德螺旋天线,辐射场,几何绕射理论

1 引言

阿基米德螺旋天线具有宽频带,圆极化的特点。再加上能齐平安装,属于低轮廓天线。因而在飞行器上得到了较为广泛的应用。其辐射场的计算,常用的有两种方法:其一,用半圆近似表示半圈螺旋线计算辐射场^[1]。另一,采用矩量法计算^[2]。后者较精确,但是,随着宽频带应用,螺旋线圈数较多,计算机计算时计算量和存储量都较大。前一种方法经应用和实验验证,也能满足工程上对精度的要求,且计算量小。本文采用半圆近似法计算单元螺旋天线的辐射场。当螺旋天线装在飞机上,由于机上复杂环境的影响,其辐射场产生显著的变化。本文从单元螺旋天线的辐射场出发,应用几何绕射理论(GTD)^[3],考虑周围环境的影响,计算机载螺旋天线的辐射场。

2 阿基米德螺旋天线辐射场的计算

螺旋天线及其坐标系如图1所示。天线位于 xoy 平面内。根据文献[1],可以导出;螺旋天线的辐射场为^[4]

$$E = E_{\theta}\hat{\theta} + E_{\phi}\hat{\phi} \quad (1)$$

$$E_{\theta} = c \cos \sum_{k=1}^m (2K-1) \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n \exp(jn\Phi) J_n(x_K)$$

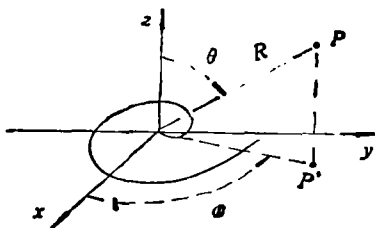


图1 螺旋天线及其坐标系

1993-03-10 收到,1993-06-28 定稿

刘其中 男,1938年生,教授,主要从事天线的理论与工程应用,天线的数值计算与CAD的教学和科研工作。
李 莉 女,1967年生,硕士,现在东北大学计算机系无线电教研室从事电磁场与微波技术的教学和科研工作。 邮政编码 110006。

$$\times \left\{ [(-1)^n e_2 + e_1] \times \left[\frac{(d_K + jn) \sin \Phi - \cos \Phi}{(d_K + jn)^2 + 1} \right] \right. \\ \left. - [(-1)^n e_3 + e_4] \left[\frac{(-d_K + jn) \sin \Phi - \cos \Phi}{(-d_K + jn)^2 + 1} \right] \right\} \quad (2)$$

$$E_\phi = c \sum_{K=1}^m (2K-1) \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n \exp(jn\Phi) J_n(x_K) \\ \times \left\{ [(-1)^n e_2 + e_1] \left[\frac{(d_K + jn) \cos \Phi + \sin \Phi}{(d_K + jn)^2 + 1} \right] \right. \\ \left. - [(-1)^n e_3 + e_4] \left[\frac{(-d_K + jn) \cos \Phi + \sin \Phi}{(-d_K + jn)^2 + 1} \right] \right\} \quad (3)$$

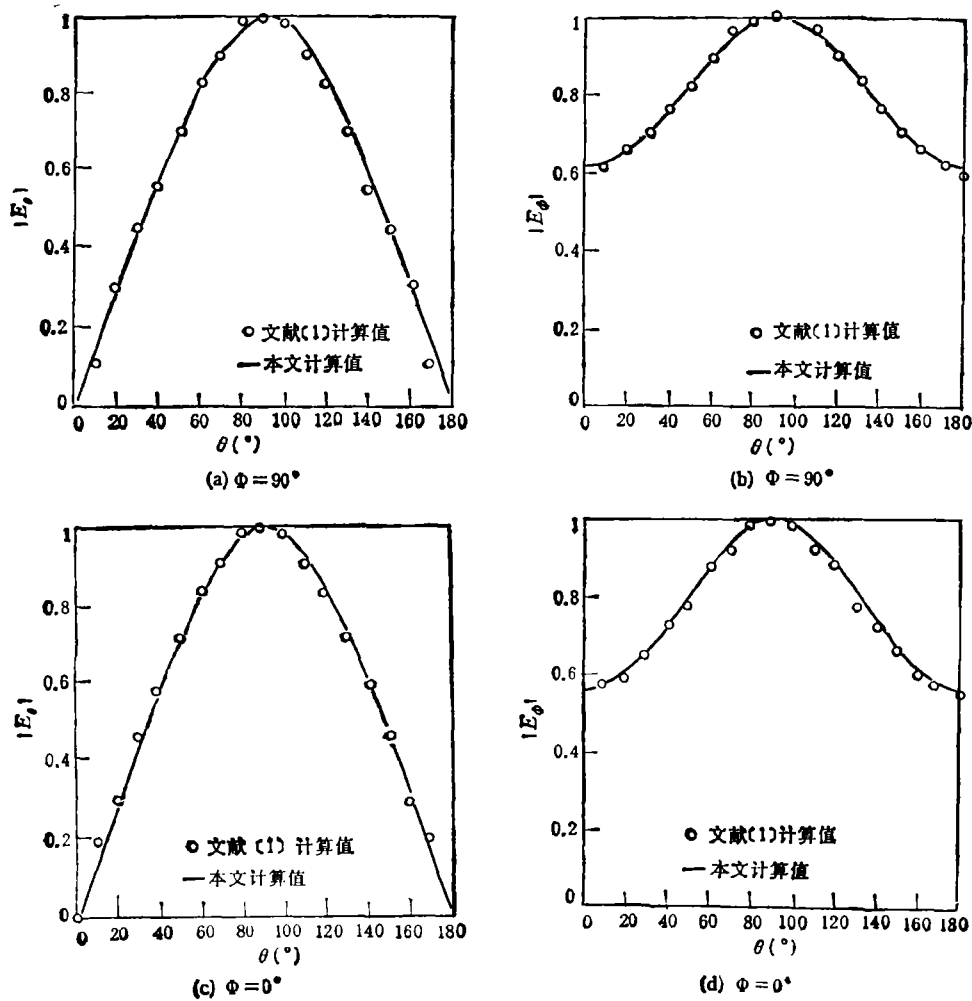


图2 螺旋天线辐射场

 $m = 7, \beta a = 0.1, \alpha = 1/(3\lambda)$

式中 $c = -j\omega\mu I_0 a \exp(-j\beta R)/(4\pi R)$, ω 为角频率, μ 为磁导系数, I_0 为馈电点处的电流, a 为螺旋线第一个半圆的半径(共 m 个半圈), $\beta = 2\pi/\lambda$ 为螺旋线的相位常数, R 为坐标原点至场点的距离; $J_n(x_K)$ 为 n 阶贝塞尔函数, $x_K = (2K-1)\beta a \sin\theta$; $e_1 = \exp[-\pi(K-1)^2 d]$, $d = \gamma a$, $\gamma = \alpha + j\beta$ 为螺旋线的传播常数; $e_2 = \exp(-\pi K^2 d)$; $e_3 = \exp[-\pi(2m^2 - K^2)d]$; $e_4 = \exp\{-\pi[2m^2 - (K-1)^2]d\}$; $d_K = (2K-1)d$. 按上述公式编制程序可以计算螺旋天线辐射场的 E_θ 和 E_ϕ 分量, 进而可以计算上述两个分量的方向函数并绘制方向图. 进行了大量的计算(参见文献[4]), 并与文献[1]的计算值进行对比, 两者吻合良好(参见图 2). 文献[1]的计算值与实测值也进行了对比, 两者相当一致. 这说明本文公式和程序可以用于工程计算. 由于篇幅有限, 仅举一个计算例子示于图 2. 图中, 实线为本文计算值, 圈为文献[1]的计算值.

3 机载螺旋天线辐射场的计算

算出螺旋天线辐射场的基础上, 应用 GTD 可以计算出在周围环境的影响下天线的辐射场. 以天线装在机翼上为例, 其它情况可作类似计算. 其结构如图 3 所示. 两边有金属板, 中间加有吸收材料, 上面有介质罩封闭. 由于介质罩很薄, 暂不考虑它对天线辐射的影响. 螺旋天线在自由空间为双向辐射, 在机上只希望单向辐射, 后面加有吸收腔, 吸收后向辐射. 若加反射腔会影响天线的宽频带特性. 在周围环境的影响下, 天线的总场为直射场、反射场和各种绕射场的叠加. 下面分别计算各种场.

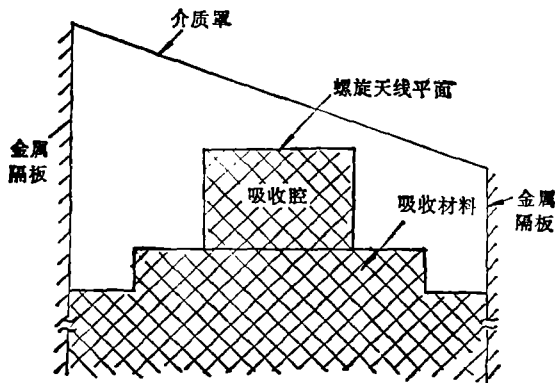


图 3 机载天线及其电磁环境结构简图

3.1 直射场

$$\mathbf{E}^i = \begin{cases} (E_\theta^i \hat{\theta} + E_\phi^i \hat{\phi}) \exp(-jkR_0)/R_0, & 0^\circ \leq \theta \leq \alpha_1, \text{ 和 } 270^\circ - \alpha_2 \leq \theta < 360^\circ; \\ 0, & \alpha_1 < \theta < 270^\circ - \alpha_2. \end{cases} \quad (4)$$

式中 E_θ^i 和 E_ϕ^i 由(2)式和(3)式计算, $\alpha_1 = \lg^{-1}(a_0/b_0)$, $\alpha_2 = \lg^{-1}(d_0/c_0)$, $k = 2\pi/\lambda$, R_0 为坐标原点至场点的距离.

3.2 直射场在 Q_1 点产生的绕射场 根据 GTD^[5,6], 直射场在 Q_1 点产生的绕射场的 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\phi}$ 方向的分量分别为

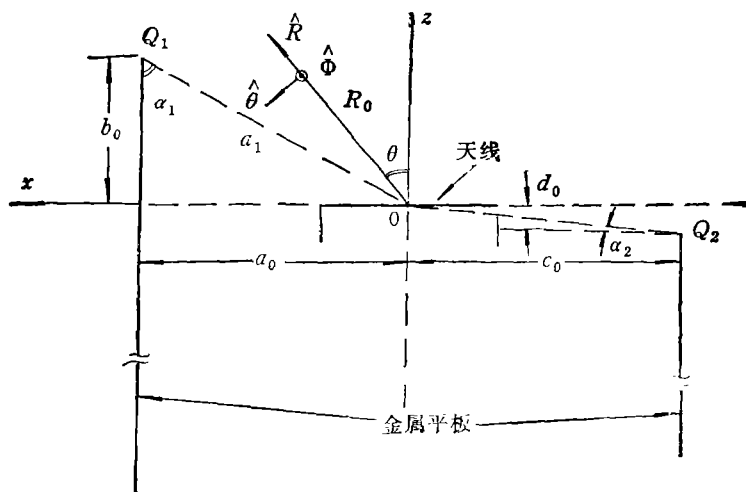


图 4 天线电磁环境尺寸和坐标系

$$\left. \begin{aligned} E_{1\theta}^d &= E_b^d(Q_1) D_h(Q_1) \exp\{-jk[a_1 - a_0 \sin \theta - b_0 \cos \theta + R_0]\} / (R_0 \sqrt{a_1}), \\ E_{1\phi}^d &= E_b^d(Q_1) D_s(Q_1) \exp\{-jk[a_1 - a_0 \sin \theta - b_0 \cos \theta + R_0]\} / (R_0 \sqrt{a_1}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

存在范围: $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 和 $270^\circ - \alpha_3 \leq \phi < 360^\circ$.

式中 $E_b^d(Q_1)$ 和 $E_s^d(Q_1)$ 分别为直射场在 Q_1 处的 θ 和 ϕ 分量, $D_h(Q_1)$ 和 $D_s(Q_1)$ 分别为绕射点 Q_1 处的硬、软边界绕射系数^[7], $a_1 = (a_0^2 + b_0^2)^{1/2}$, $\alpha_3 = \lg^{-1}[(b_0 + d_0)/(a_0 + c_0)]$.

3.3 直射场在 Q_2 点产生的绕射场 类似地, 直射场在 Q_2 点产生的绕射场为

$$\left. \begin{aligned} E_{2\theta}^d &= E_b^d(Q_2) D_h(Q_2) \exp\{-jk[a_2 + c_0 \sin \theta + d_0 \cos \theta + R_0]\} / (R_0 \sqrt{a_2}), \\ E_{2\phi}^d &= E_b^d(Q_2) D_s(Q_2) \exp\{-jk[a_2 + c_0 \sin \theta + d_0 \cos \theta + R_0]\} / (R_0 \sqrt{a_2}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

存在范围: $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ - \alpha_3$ 和 $180^\circ \leq \theta < 360^\circ$.

式中各符号的含义与(5)式同, $a_2 = (c_0^2 + d_0^2)^{1/2}$.

3.4 Q_1 点的一次绕射场在 Q_2 点产生的二次绕射场 根据 GTD^[5,6], 直射场在 Q_1 点产生的绕射场再在 Q_2 点产生的二次绕射场为^[4]

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta 12}^d &= E_{\theta 1}^d(Q_2) D_h(Q_{12}) \exp\{-jk[c_0 \sin \theta + d_0 \cos \theta + R_0]\} / (R_0 \sqrt{a_1 + a_2}), \\ E_{\phi 12}^d &= E_{\phi 1}^d(Q_2) D_s(Q_{12}) \exp\{-jk[c_0 \sin \theta + d_0 \cos \theta + R_0]\} / (R_0 \sqrt{a_1 + a_2}), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

存在范围与(6)式相同.

式中 $D_h(Q_{12})$ 和 $D_s(Q_{12})$ 分别为 Q_1 点为入射源点 Q_2 处绕射时, Q_2 处的硬、软边界绕射系数^[7]. $E_{\theta 1}^d(Q_2)$ 和 $E_{\phi 1}^d(Q_2)$ 由下式计算

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta 1}^d(Q_2) &= E_b^d(Q_1) D_h(Q_1) \exp[-jk(a_1 + a_3)] / [\sqrt{a_1 a_3 (a_1 + a_3)}], \\ E_{\phi 1}^d(Q_2) &= E_b^d(Q_1) D_s(Q_1) \exp[-jk(a_1 + a_3)] / [\sqrt{a_1 a_3 (a_1 + a_3)}], \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $a_3 = [(b_0 + d_0)^2 + (a_0 + c_0)^2]^{1/2}$, 其余各符号与(5)式相同.

3.5 Q_2 点的一次绕射场在 Q_1 点产生的二次绕射场 计算公式与第 3.4 小节中

的类似,不再列出。分别写为 $E_{\theta 21}^d$ 和 $E_{\phi 21}^d$ 。

3.6 直射场在左金属平板上产生的反射场

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta 1}^r &= E_{\theta}^i(360^\circ - \theta) \exp[-jk(R_0 - 2a_0 \sin \theta)]/R_0, \\ E_{\phi 1}^r &= -E_{\phi}^i(360^\circ - \theta) \exp[-jk(R_0 - 2a_0 \sin \theta)]/R_0, \\ \text{存在范围: } 180^\circ + \alpha_1 &\leq \theta \leq 360^\circ - \alpha_1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 $E_{\theta}^i(360^\circ - \theta)$ 和 $E_{\phi}^i(360^\circ - \theta)$ 分别按(2)式和(3)式计算; $\alpha_1 = \lg^{-1}[(2a_0 + c_0)/d_0]$ 。

3.7 左金属板的反射场在 Q_2 点产生的绕射场 此绕射场写成 $E_{\theta r2}^d$ 和 $E_{\phi r2}^d$, 可以按前面计算绕射场的方法计算。

由于遮挡,入射到右金属平面上的场较弱,而且产生的反射场传至机翼内部被吸收,对空间辐射无贡献。

3.8 Q_2 点的一次绕射场在左金属平面上产生的反射场

根据推导^[4],可以导出

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta d2}^r &= E_{\theta}^i(270^\circ - \alpha_2) D_1(Q_2) \exp\{-jk[a_2 + R_0 - (2a_0 + c_0) \sin \theta]\}/(R_0 \sqrt{a_2}), \\ E_{\phi d2}^r &= E_{\phi}^i(270^\circ - \alpha_2) D_1(Q_2) \exp\{-jk[a_2 + R_0 - (2a_0 + c_0) \sin \theta]\}/(R_0 \sqrt{a_2}), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

存在范围: $270^\circ < \theta < 270^\circ + \alpha_3$ 。

式中各符号含义同前。

总辐射场为各种场叠加。

$$\mathbf{E} = E_{\theta} \hat{\theta} + E_{\phi} \hat{\phi}, \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta} &= E_{\theta}^i + E_{\theta 1}^r + E_{\theta 2}^d + E_{\theta 12}^d + E_{\theta 21}^d + E_{\theta 1}^r + E_{\theta r2}^d + E_{\theta d2}^r, \\ E_{\phi} &= E_{\phi}^i + E_{\phi 1}^r + E_{\phi 2}^d + E_{\phi 12}^d + E_{\phi 21}^d + E_{\phi 1}^r + E_{\phi r2}^d + E_{\phi d2}^r. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

二次绕射场和绕射后的反射场较小,在工程计算中可以忽略,仅影响小的副瓣和个别地方方向图出现较小的不连续。

3.9 计算举例 应用本文的计算公式和程序,计算了装在机翼上的阿基米德螺旋天线的方向图,结果示于图 5。图中实线为本文计算曲线,虚线为实测曲线(测试在微波暗室中进行);图 5(a)为 E_{θ} 分量,图 5(b)为 E_{ϕ} 分量。从图中可以看出,在高于 -20 dB 的范围内,计算值与实测值吻合较好,因为测试中背景噪声约为 -20 dB。图 5(a)中 E_{θ} 副瓣有些偏移,误差较大,主要由于测试中自动转动角度计量不太准,再加上支架金属条

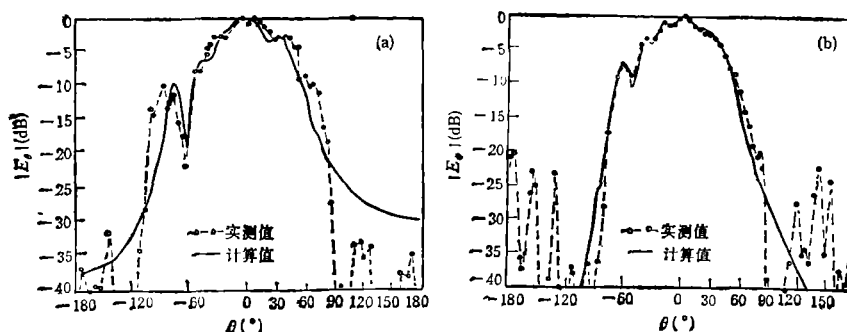


图 5 机翼螺旋天线方向图

与 E_θ 分量取向一致,虽然用吸波材料包装,仍有部分 E_θ 分量的绕射场存在。

4 小结

本文的计算公式和程序已初步用于工程计算,为总体设计提供数据。今后还应考虑天线前方的介质罩的影响,天线边缘绕射,吸收材料本身吸收不完善等因素,进一步完善算式和程序。

参 考 文 献

- [1] Curtis W L. IRE Trans. on AP, 1960, AP-8(5): 298—306.
- [2] Champagne N J. IEEE Trans. on AP, 1992, AP-40(1): 102—108.
- [3] 王尔杰,等. 几何绕射理论的工程应用. 西安: 西北电讯工程学院出版社,1993,6—12.
- [4] 李 莉. 机载螺旋天线辐射特性研究: [硕士论文]. 西安电子科技大学,1992.
- [5] Kouyoumjian R G. Proc. IEEE, 1974, 62(11): 1448—1461.
- [6] Pathak P H. IEEE Trans. on AP, 1981, AP-29(7): 609—622.
- [7] 刘其中. 天线的计算机辅助设计. 西安: 西安电子科技大学出版社,1988,176—183.

A STUDY ON RADIATION CHARACTERS OF SPIRAL ANTENNAS ON AN AIRCRAFT

Liu Qizhong Li Li

(*Institute of Antenna, Xidian University, Xi'an 710071*)

Abstract The radiation fields of the Archimedean spiral antenna are derived by approximating the spiral with a series of semicircles. The formulas are developed to calculate radiation fields of the spiral antennas on an aircraft by applying the GTD. The calculated results agree well with the experimental ones.

Key words Archimedean spiral antenna on an aircraft, Radiation field, GTD