

## 伞形天线扫描分析\*

黄纪军 刘克成 庞卫勇

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

**摘要** 用物理光学方法对扫描伞形天线进行了计算, 得出了扫描伞形天线的电参数与结构参数的一组关系, 可供设计参考。

**关键词** 伞形天线, 扫描, 偏焦

**分类号** TN827.3

## The Analysis of Scanning Umbrella Antenas

Haung Jijun Liu Kecheng Pang Weiyong

(Department of Electronic Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** This paper calculates the scanning umbrella antennas with the method of PTG, and derives the relation between the electronic parameters and structural parameters of scanning umbrella antennas, which is very useful for design.

**Key words** Umbrella Antenas, scan, defocus

在《伞形天线分析》(参见文献<sup>[2]</sup>)一文中已说明伞形天线由于其可折叠性, 在航天设备中可用作抛物面天线的替代天线。虽然在卫星通讯中伞形天线(例如点对点通讯)已经有了应用, 但是见诸文献的不多。因此本文对伞形天线偏焦进行了分析, 其基本的方法仍然是物理光学方法。利用计算机计算, 得出几组曲线。

## 1 基本理论

## 1.1 扫描伞形天线正馈时的远区场

参见文献 [2] 知, 三角形面(两棱间面)亦可看成一抛物柱面, 即焦距在  $f_r$  和  $f_g$  之间延续变化的抛物线构成的抛物面, ( $f_r$  为棱抛物线焦距,  $f_g$  为  $\alpha=0$  时的  $f_c$ )。把连续变化的焦距用  $f_c$  表示, 那么  $f_c$  应为方位角  $\alpha$  的函数, 且有

$$f_c = f_r \cos^2(\pi/N_g) / \cos^2\alpha \quad (1)$$

其中  $\alpha$  是三角形面中心线起算的方位角,  $0 \leq \alpha \leq \pi/N_g$ ,  $N_g$  是支撑棱数目。

\* 1996年3月5日修订

由于扫描伞形天线是由焦距为  $f_g$  与  $f_r$  之间抛物线连续变化构成, 正馈时其间必有最佳电点  $F_s$ 。由图 1 有:

$$\rho = MN + NF_s \quad (2)$$

由平行线近似, 有

$$\rho = 2f_r / (1 + \cos\psi) + \Delta f \cos\psi \quad (3)$$

记  $\Delta f$  为焦点的偏移  $F_c F_s$ 。

对于扫描伞形天线而言, 正馈时它不可能做到口径面上相差为 0, 但是能够做到相位偏差最小。根据口径面上的最小相位偏差, 可求出最佳馈电位置

$$f_s = N_g / \pi \int_{-\pi/N_g}^{\pi/N_g} f_c d\alpha \approx f_c \left( 1 - \frac{2}{3} * \pi^2 / N_g^2 \right) \quad (4)$$

一般来讲, 反射面处于馈源远区场, 则反射面附近的场有下面形式。

$$\vec{E}_r(\rho) = \vec{a}_r f(\theta, \psi) \text{Exp}(-jk\rho) / \rho \quad (5)$$

要求得次级场, 需规定初级场方向图。为了简化计算, 规定初级场方向图由下式表示:

$$\begin{aligned} f(\psi) &= f(\theta, \psi) = \cos^n \psi \quad (-\psi_0 \leq \psi \leq \psi_0) \\ f(\psi) &= f(\theta, \psi) = 0 \quad (-\pi/2 < \psi < -\psi_0 \cup \psi_0 \leq \psi < \pi/2) \end{aligned} \quad (6)$$

对于面积微元, 其远区场辐射特性为:

$$dE = j60 |J_x| / (\lambda r) \cos\theta e^{-j\alpha} ds \quad (7)$$

其中,  $|J_x|$  为感生电流含主极化部分的分量,  $\lambda$  为空间波长,  $\alpha$  为相位。

在反射器表面有

$$\vec{J} = 2 * (\vec{n} \times \vec{H}) = 2 / \eta_0 [\vec{n} \times (\vec{\rho}_0 \times \vec{E}_\rho)] \quad (8)$$

其中  $\eta_0$  空间波阻抗 377,  $\rho_0$  为单位矢量。

$$\alpha = \beta(-\vec{\rho} \cdot \vec{r}_0 + \rho) \quad (9)$$

将 (3), (8), (9) 式代入 (7) 式, 考虑到

$$\xi = 2(m-1)\pi / N_g + \alpha \quad (10)$$

进行坐标变换并舍去变换中的高阶无穷小量, 可推得伞形天线的远区场为

$$\begin{aligned} E &= -j480\pi f_r / (\eta_0 \lambda r) \sum_{m=1}^{N_g} \int_0^R dR \int_{-\pi/N_g}^{\pi/N_g} A_m(\alpha, R) e^{-j\alpha(\alpha, R)} d\alpha \\ A_m(\alpha, R) &= [(4f_r^2 - R^2) / (4f_r^2 + R^2)]^2 (-2R^2 \cos(2(m-1)\pi / N_g + \alpha) \\ &\quad + 4f_r^2 + R^2) R \cos\theta \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \rho(\alpha, R) &= \beta [2f_c - f_c \sin\theta \cos(\varphi - 2(m-1)\pi / N_g - \alpha) / f_r \\ &\quad + 8\Delta f * f_r^2 (4f_r^2 - R^2) / (4f_r^2 + R^2)^2] \end{aligned} \quad (13)$$

对于天线增益, 可以用下面公式计算:

$$G = r^2 * |E_0|^2 / (1 / (n+1) \cos^{n+1}\theta |_{-\rho_0}^{\rho_0}) \quad (14)$$

## 1.2 扫描伞形天线扫描时的远区场

伞形天线的扫描之初级馈源不在伞形天线的轴线上, 如图 3,  $F_s$  为正馈时最佳点,  $F$  为偏馈点。它是由  $F_s$  作平行于  $x$  轴的横向偏移,  $F_s$  平行于  $x$  轴。当正馈时, 馈源到反射面上一点  $M$  射线段为  $F_s M = \rho$ , 偏馈时则为  $F M = \rho_1$ , 故偏焦时的伞天线的面积微元的

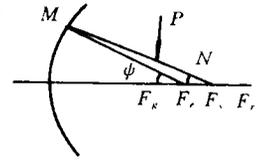


图 1

入射场与正馈时的入射场是不同的,从而引起次级场波束的偏转。在(7)式中的相位因子  $e^{-j\alpha}$  要用  $e^{-j\alpha_1}$  来替代。

$$\alpha_1 = \beta(-\vec{\rho}_1 \cdot \vec{r}_0 + \rho_1) \quad (15)$$

因此要求偏馈时的辐射场,就是要求  $\rho_1$  的值。通过图2,即可找出  $\rho_1$  与  $\rho$  的关系。记  $F_s F = t$  为偏焦长度,当与  $x$  轴同向时,  $t$  为正,反之为负。再设  $\angle MF_s F = r$ ,  $\rho$  与伞中心轴即  $z$  轴的夹角仍旧记为  $\psi$ 。  $M_1$  为点  $M$  在  $xy$  平面上的投影,  $OM_1$  同  $z$  轴的夹角仍旧记为  $\xi$ 。这样  $\rho, \psi, \xi$  的定义同正馈时相同。下面来推导扫描时的相位  $\rho_1$  同  $\rho, \psi, \xi$  的关系。为了推导方便,过  $M$  点作  $xz$  面的重线  $MD$ , 垂足为  $D$ , 再过  $D$  作  $z$  轴的垂线  $DP$ , 垂足为  $P$ , 过  $D$  作  $x$  轴的垂线  $DE$ , 垂足为  $E$ , 记  $\angle MF_s D = \alpha$ ,  $\angle DF_s P = \beta$ 。

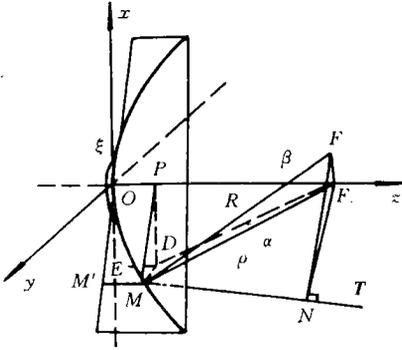


图 2

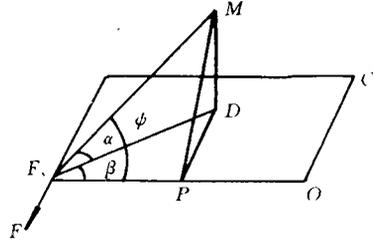


图 3

参照图3,对应图2则:

$$\cos\psi = \cos\alpha\cos\beta \quad (16)$$

$$\cos\gamma = \cos\alpha \cdot \cos(90 - \beta) = \cos\alpha\sin\beta \quad (17)$$

故  $\cos\gamma = \cos\psi \cdot \text{tg}\beta \quad (18)$

而  $\text{tg}\beta = PD/|PF_s| \quad (19)$

$$PD = OE = |PF_s| \cdot \text{tg}\psi\cos\xi \quad (21)$$

将(19)、(20)代入(18)式,有

$$\cos\gamma = \cos\xi\sin\psi$$

$$\rho_1 \sqrt{\rho^2 + t^2 - 2\rho t\cos\gamma} \approx \rho \sqrt{1 - 2t\cos\gamma/\rho} \quad (22)$$

将式(21)代入(22)式,并考虑到  $t\cos\gamma/\rho$  趋于0,有

$$\rho_1 = \rho(1 - t\cos\xi\sin\psi) \quad (23)$$

将(23)代入(15),并进行坐标变换得:

$$\alpha_1 = \alpha - t\beta\cos\xi(4f_r \cdot r)/(4f_r^2 + r^2) \quad (24)$$

用式(23)替代式(7)中的  $\alpha$ , 其它计算步骤如同(8)~(12)式,即得到扫描时的远区场。

## 2 结 论

将前面远区场的表达式进行编程计算,且类比于相同的正馈抛物面天线和正馈伞形

天线。图 4 是一  $D=6m$ ,  $f=10GHz$  (伞形天线  $N_g=32$ ) 正馈抛物面天线、正馈伞形天线和扫描伞形天线的方向图。计算结果表明, 类比于正馈抛物面天线, 扫描伞形天线与正馈伞形天线类似, 天线增益降低, 波瓣宽度展宽; 类比于正馈伞形天线, 扫描伞形天线和扫描抛物面天线类似, 波瓣发生偏转, 方向图不再对称 (此例扫描角度较小), 但天线增益、波瓣宽度比正馈时并无明显变化。

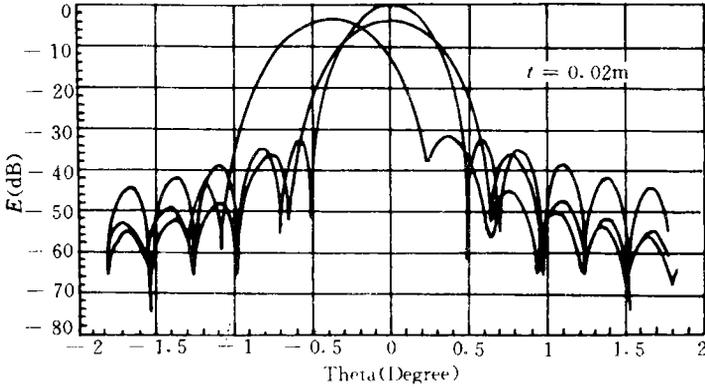


图 4

图 5 是一  $D=6m$ ,  $f=10GHz$ ,  $N_g=32$ , 但扫描角度不同的两伞形天线 (扫描角度都不大) 的方向图。从图中可以看出, 当扫描角度变大时, 同抛物面天线扫描一样, 天线增益无明显变化, 但天线方向图畸变更厉害, 右副瓣 (相背于波瓣偏转方向的副瓣) 电平迅速升高。可以预见, 扫描角度进一步增大时, 它会同主瓣融合, 使偏转角度变小。

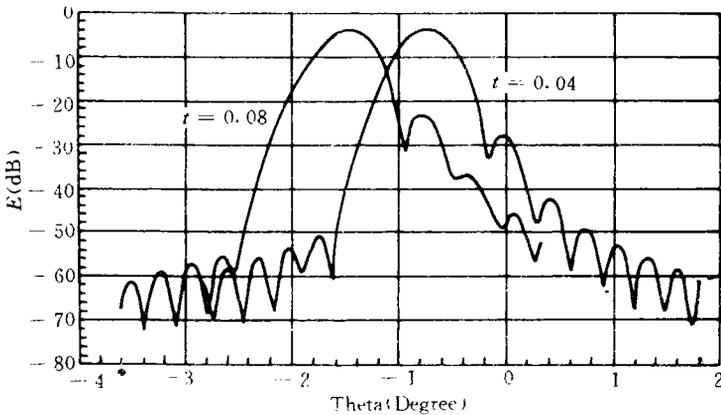


图 5

图 6、图 7 描述了一  $D=1.5m$ ,  $f=10GHz$ ,  $N_g=18$  时, 扫描角度  $\Delta\theta_0$  不同的伞形天线的增益损失和偏转角度  $\Delta\theta$  的关系图。这里  $\Delta\theta_0$ 、 $\Delta\theta$  都以波瓣宽度为单位, 从图 7 可以看出,  $\Delta\theta_0$  大于  $\Delta\theta$ 。这是因为同抛物面天线扫描一样, 其偏转因子小于 1。从图 8 可以看出, 随着  $\Delta\theta_0$  增大, 天线损失增大, 且当  $\Delta\theta_0$  增大到 2~10 倍波束宽度时, 再增大, 天线损失迅速增大。这也同抛物面天线扫描的基本性能一样, 扫描宽度只有几个波瓣宽度, 扫描

角度超过这一宽度时, 天线增益迅速下降。但是, 从图中还可看出, 扫描伞形天线的增益下降速度要慢一些。扫描伞形天线扫描角为 10 个波速宽度左右时, 可以认为是正常工作的。

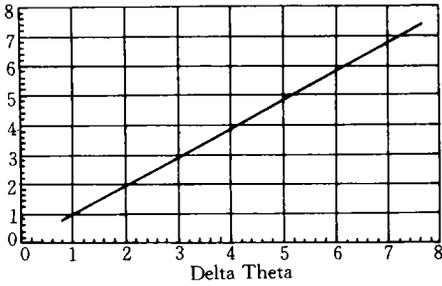


图 6

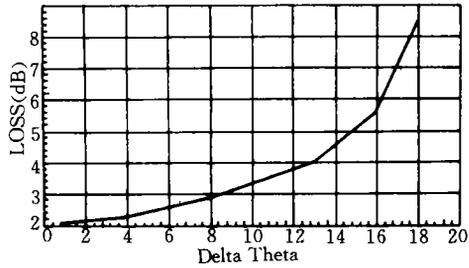


图 7

图 8、图 9 描述了  $D=6m$ ,  $f=10GHz$ , 扫描角度  $\Delta\theta_0=1.9^\circ$  时, 棱数目  $N_g$  不同的伞形天线的偏转角度  $\Delta\theta$  和增益损失的关系图。从图 9 中可以看出, 随着  $N_g$  的增大, 偏转角度  $\Delta\theta$  减小, 并驱于抛物面天线扫描时的偏转角度  $\Delta\theta(1.76^\circ)$ 。这再次证明, 对抛物面是棱数目为无穷大的伞形天线的假设是正确的。从图 8 中可以看出, 当  $N_g$  增大时, 伞形天线的增益损失减小; 反之, 增益损失增大, 对比于正馈时的伞形天线,  $Loss-N_g$  几乎是同一曲线。这说明当扫描角度  $\Delta\theta_0$  不大时, 伞形天线扫描时的增益基本维持正馈的值。

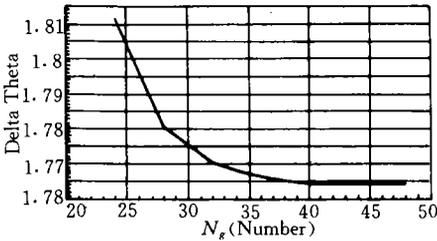


图 8  $N_g$  (NUMBER)

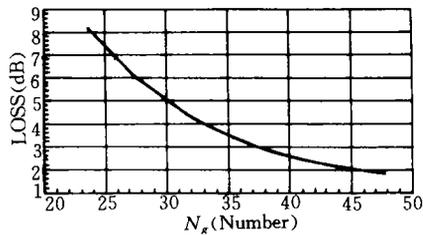


图 9  $N_g$  (NUMBER)

参照以前的结论和本文前面的数据和曲线, 伞形天线不仅在正馈时是一高增益天线, 可以替代抛物面天线, 而且在扫描时仍然具有良好的扫描特性, 也可替代抛物面天线作电扫天线。它还具有比抛物面天线扫描宽度宽的优良特性, 更合适作扫描天线。

## 参 考 文 献

- 1 刘克成, 宋学诚. 天线原理. 长沙: 国防科技大学出版社
- 2 黄纪军, 刘克成. 伞形天线分析. 见: 全国微波会议论文集, 1995
- 3 Paul G, Inger Son and William C, Wong. The Analysis of Deployable Umbrella Parabolic Reflectors. IEEE Trans Antenas Propagat July, 1992

(责任编辑 潘 生)