

# 再入体模型截短对天线辐射特性影响\*

李 彪\*\*

丁小磊

(西南电子工程研究所 四川绵阳 621900)(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

【摘要】从再入体典型口径天线在无限大平面上的辐射场出发,采用几何绕射法(GTD),计算分析了不同口径分布的再入体缝隙天线赤道面和子午面辐射场随再入体模型纵向尺寸的变化,实验验证了其计算分析结果,从理论分析和实验得出了可忽略截短效应的再入体模型纵向尺寸。

关键词 方向图; 几何绕射; 口径极化; 截短尺寸

中图分类号 TN82

再入体天线辐射图形与再入体形状、材料及天线安装位置密切相关,因此,从严格意义上讲再入体天线方向图测试应在真实的再入体模件上进行,但一般的天线测试转台不能支撑真实再入体模件重量。从天线的实际工作环境来看,可用金属壳体模拟再入体,即用截短的金属壳体模型替代整体再入体金属模型,本文研究再入体模型截短对天线辐射特性的影响,对再入体天线测试具有较大的实际指导作用。

## 1 典型口径辐射场

再入体天线结构复杂,一般很难精确预计其口径分布,但对绝大多数再入体天线,其口径可用某些典型分布来近似。再入体天线常用的近似口径分布主要有TE<sub>10</sub>模、余弦漏波模、TE<sub>11</sub>模。如图1所示,TE<sub>10</sub>模、TE<sub>11</sub>模在无限大平板上的辐射场为<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} E_q = \frac{C}{r} e^{-jk r} \sin f \frac{\cos X}{X^2 - (\pi/2)^2} \frac{\sin Y}{Y} & X = \frac{ka}{2} \sin q \cos f \\ E_f = \frac{C}{r} e^{-jk r} \cos q \cos f \frac{\cos X}{X^2 - (\pi/2)^2} \frac{\sin Y}{Y} & Y = \frac{kb}{2} \sin q \sin f \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_q = \frac{C}{r} e^{-jk r} \sin f \frac{J_1(Z)}{Z} & Z = ka \sin q \\ E_f = \frac{C}{r} e^{-jk r} \cos q \cos f \frac{J'_1(Z)}{1 - (Z/x_{11})^2} & \end{cases} \quad (2)$$

式中 C为常数; k=2π/l为波数; x<sub>11</sub>=1.841。

采用等效源和口径积分法可求出余弦漏波模在无限大平板上的辐射场为<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} E_q = \frac{C}{r} e^{-jk r} \sin f \frac{\sin Y}{Y} N_x & Y = \frac{kb}{2} \sin q \sin f \\ E_f = \frac{C}{r} e^{-jk r} \cos q \cos f \frac{\sin Y}{Y} N_x & \end{cases} \quad (3)$$

$$N_x = \int_{-L_2}^{L_1} \{A + (1-A) \cos \frac{x}{L_1} \frac{P}{2}\} e^{j(k \sin q \cos f \cdot x - k_x |x|)} dx \quad (4)$$

式中 A为常数, A=0.2~0.3。求出口径在无限大平板上的辐射场后,即可根据口径辐射场求出几何绕射场,进而求出天线总辐射场。再入体天线一般选择子午面和赤道面方向图作为检验指标。

2001年7月17日收稿

\* 总装备部跨行业预研基金资助项目

\*\* 男 35岁 硕士 助理研究员

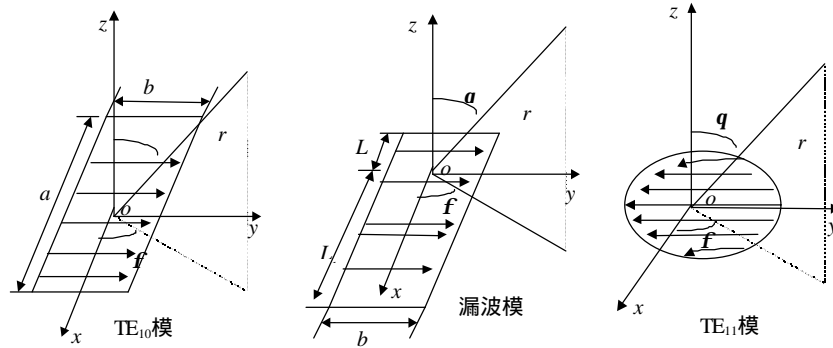


图1 无限大平板上典型口径辐射

## 2 截锥再入体天线子午面方向图计算

### 2.1 f向口径极化天线子午面方向图计算

绝大多数再入体天线均为f向极化的纵向缝隙天线。根据局部场原理<sup>[3]</sup>，天线子午面辐射图形完全由子午面附近结构的电磁特性决定，因此，子午面内如图2所示的截锥载体可等效为一个二维的四棱柱；子午面内天线辐射场为口径直射场与四个棱的绕射场的和为

$$E_r = E_{Go} + E_d^1 + E_d^2 + E_d^3 + E_d^4 \quad (5)$$

式中  $E_{Go}$  为口径直射场； $E_d^1$ 、 $E_d^2$  分别为棱1、棱2的一次绕射场； $E_d^3$  为棱1绕射场在棱3激励的二次绕射场； $E_d^4$  为棱2绕射场在棱4激励的二次绕射场。

参考图1所示坐标系，在式(1)~(3)中令  $f=0$ ，可得纵缝f向极化天线在子午面内直射场，直射场只有E分量，E分量可写成通式

$$E_f = \frac{c}{r_0} e^{-jk_0 r} \sin(q + a) f \left( \frac{\pi}{2} - q - a \right) \quad (6)$$

因入射场E分量平行于四棱柱面，属软边界入射。根据一致性绕射理论  $E_d^1$ 、 $E_d^2$  为<sup>[2,3]</sup>

$$\begin{cases} E_d^1 = f \frac{c}{d} e^{-jk_0 d} \sin(2\pi) f \left( \frac{3\pi}{2} \right) \sqrt{\frac{d}{(d+r_1)r_1}} D_s^1 e^{-jk_0 r_1} \\ E_d^2 = f \frac{c}{x_0} e^{-jk_0 x_0} \sin(2\pi) f \left( \frac{\pi}{2} \right) \sqrt{\frac{x_0}{(x_0+r_2)r_2}} D_s^2 e^{-jk_0 r_2} \end{cases} \quad (7)$$

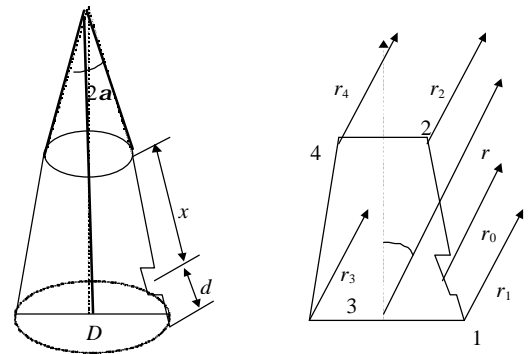


图2 子午面内截锥等效为四棱直劈

$$D_s = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \{ [\text{ctg}(\frac{\pi + (f-f')}{2n}) F(kLg^+(f-f')) + \text{ctg}(\frac{\pi - (f-f')}{2n}) F(kLg^-(f-f'))] -$$

$$[\text{ctg}(\frac{\pi + (f+f')}{2n}) F(kLg^+(f+f')) + \text{ctg}(\frac{\pi - (f+f')}{2n}) F(kLg^-(f+f'))] \} \quad (8)$$

式中  $F$  为过渡修正函数； $f$ 、 $f'$  分别为场点和源点矢径与X轴的夹角； $L = \frac{SS'}{S+S'}$  为等效长度， $S'$  为源点到绕射点的距离， $S$  为绕射点到场点的距离。 $g^+(f)$ 、 $g^-(f)$ 、 $F(x)$  的表达式如下

$$g^+(f) = \begin{cases} 1 + \cos f & 0 < f < (n-1)\pi \\ 1 + \cos(f - 2n\pi) & (n-1)\pi < f < n\pi \end{cases} \quad (9)$$

$$g^-(\mathbf{f}) = 1 + \cos \mathbf{f} \quad (10)$$

$$F(x) = j2\sqrt{x}e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{+\infty} e^{-jx'} dx' \quad (11)$$

因为天线口径在XY面上， $\mathbf{f}' = 0$ 。将 $\mathbf{f}' = 0$ 代入式(8)可证 $D_s = 0$ ，所以 $E_d^1$ 、 $E_d^2$ 为零；因为一次绕射场为零，二次绕射场 $E_d^3$ 、 $E_d^4$ 当然也为零。纵缝 $f$ 向口径极化天线在子午面内不存在绕射场，天线辐射场就等于口径直射场。

## 2.2 轴向口径极化天线子午面方向图计算

常用的轴向极化矩形横缝和圆缝采用TE<sub>10</sub>模、TE<sub>11</sub>模近似，横缝、圆缝天线子午面为YZ面；对照图1，YZ面内 $\mathbf{f} = 90^\circ$ ，将 $\mathbf{f} = 90^\circ$ 代入式(1)、(2)，可得口径轴向极化的横缝、圆缝天线子午面内的直射场只有 $E_q$ 分量，其表达式分别为

$$\mathbf{E} = -q \frac{C}{r_0} e^{-jk_0} \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \frac{\sin(\mathbf{k}b \sin \mathbf{q} / 2)}{\mathbf{k}b \sin \mathbf{q} / 2} \quad (12)$$

$$\mathbf{E} = -q \frac{C}{r_0} e^{-jk_0} \frac{J_1(\mathbf{k}a \sin \mathbf{q})}{\mathbf{k}a \sin \mathbf{q}} \quad (13)$$

为分析方便，将式(9)、(10)写为统一的形式

$$\mathbf{E} = -q \frac{C}{r_0} e^{-jk_0} f(\mathbf{q}) \quad (14)$$

式中  $f(\mathbf{q})$  为天线子午面直射场方向图函数； $r_0$ 为口径坐标原点到场点的距离。同理，按上面的方法计算子午面内四棱柱的绕射场。因 $\mathbf{q} = 90^\circ$ 时，入射电场矢量垂直于劈面，属硬边界入射，根据文献[4]，硬边界条件下棱1、棱2的绕射系数为原值的一半，绕射系数为

$$D_h = \frac{-e^{-j\frac{\pi}{4}}}{2n\sqrt{2\pi\mathbf{k}}} \left\{ \text{ctg}\left(\frac{\pi+\mathbf{f}}{2n}\right) F[\mathbf{k}Lg^+(\mathbf{f})] + \text{ctg}\left(\frac{\pi-\mathbf{f}}{2n}\right) F[\mathbf{k}Lg^-(\mathbf{f})] \right\} \quad (15)$$

式中  $n$ 为劈角参数， $n = 2 - Q_w / \pi$ ， $Q_w$ 为劈角； $\mathbf{k}$ 为波数； $L$ 、 $g^+(\mathbf{f})$ 、 $g^-(\mathbf{f})$ 、 $F(x)$ 的表达式与前面相同。直射场在棱1、棱2的绕射场 $E_d^1$ 、 $E_d^2$ 为

$$E_d^1 = q \frac{C}{d} e^{-jk_0} f\left(\frac{3\pi}{2}\right) \sqrt{\frac{d}{(d+r_1)r_1}} e^{-jk_0} D_{h1} \approx q \frac{C}{\sqrt{d}} e^{-jk_0} f\left(\frac{3\pi}{2}\right) \frac{e^{-jk_0}}{r} e^{jk_0 \frac{D}{2} \sin \mathbf{q}} D_{h1} \quad (16)$$

$$E_d^2 = q \frac{C}{x_0} e^{-jk_0} f\left(\frac{\pi}{2}\right) \sqrt{\frac{x_0}{(x_0+r_2)r_2}} e^{-jk_0} D_{h2} \approx q \frac{C}{\sqrt{x_0}} e^{-jk_0} f\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{e^{-jk_0}}{r} e^{jk_0 r_2} D_{h2} \quad (17)$$

$$\ddot{A}r_2 = [D/2 - (x_0 + d) \sin \mathbf{a}] \sin \mathbf{q} + (x_0 + d) \cos \mathbf{a} \cos \mathbf{q} \quad (18)$$

棱1、棱2绕射场在棱3、棱4激励的二次绕射场 $E_d^3$ 、 $E_d^4$ 为

$$E_d^3 = q \frac{C}{d} e^{-jk_0} f\left(\frac{3\pi}{2}\right) \sqrt{\frac{d}{(d+r_{13})r_{13}}} e^{-jk_0} D_{h13} D_{h3} \sqrt{\frac{D}{(D+r_3)r_3}} e^{-jk_0} \quad (19)$$

$$E_d^4 = q \frac{C}{x_0} e^{-jk_0} f\left(\frac{\pi}{2}\right) \sqrt{\frac{x_0}{(x_0+r_{24})r_{24}}} e^{-jk_0} D_{h24} D_{h4} \sqrt{\frac{r_{24}}{(r_{24}+r_4)r_4}} e^{-jk_0} \quad (20)$$

式中  $r_{13}$ 、 $r_{24}$ 为棱1、3，棱2、4间距离； $D_{h13}$ 为棱1在 $r_{13}$ 方向的绕射系数； $D_{h24}$ 为棱2在 $r_{24}$ 方向的绕射系数。求出绕射场 $E_d^1$ 、 $E_d^2$ 、 $E_d^3$ 、 $E_d^4$ 后，利用式(5)即可计算出子午面内的辐射场。

根据局部场原理及文献[3]的计算方法，赤道面辐射场只取决于再入体赤道横截面几何尺寸，与再入体纵向尺寸无关，因此，理论上模型截短对天线赤道方向图无影响。

### 3 再入体模型截短对天线方向图影响分析与验证

从前面计算分析及讨论可知，从理论上，再入体模型向尺寸截短对赤道面方向图和 $f$ 向极化天线子午面方向图没有影响。这是按局部场原理得出的结论，一般而言，物体尺寸为数个波长时局部场原理即适用。为确定再入体上局部场原理成立的具体物理尺寸，采用实验方法予以验证。

图3、图4为赤道面方向图和 $f$ 向口径极化天线子午面方向图随再入体尺寸变化的对比。实验数据表明，即使截短到距天线口径只有4.5波长，20 dB动态范围内截短造成的方向图偏差小1 dB，1 dB的偏差在测试中是允许的，因此，模型可截短到距天线4.5  $l$ ，甚至更短。

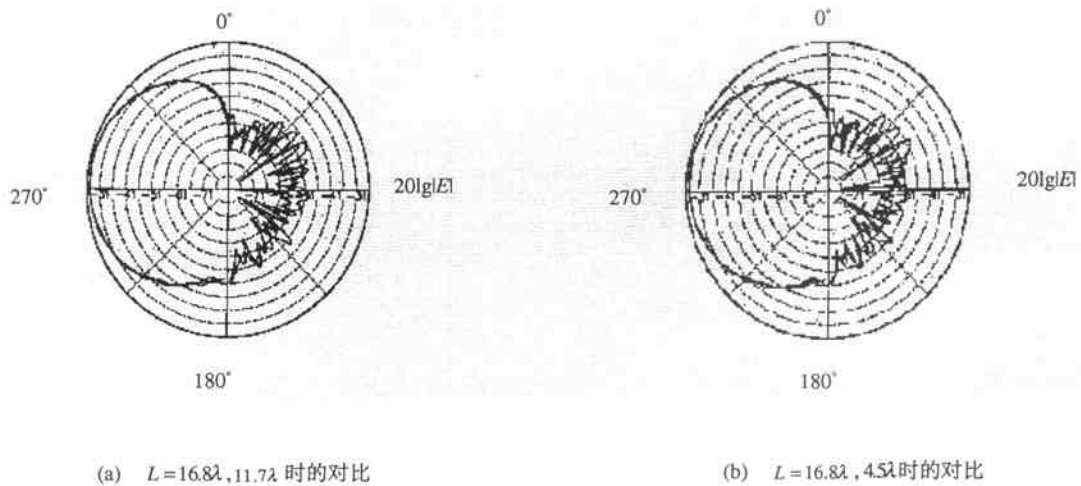


图3 单腔单极天线在不同长度模型上赤道面方向图对比

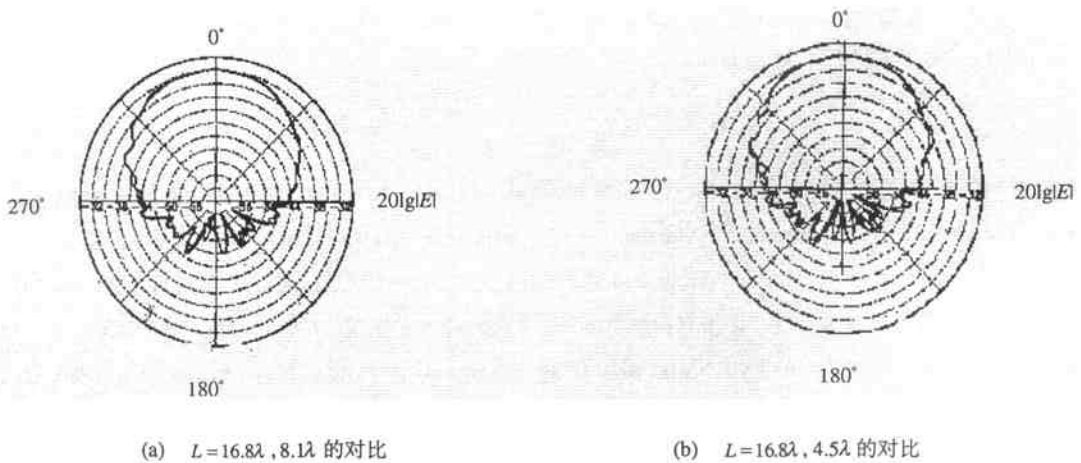


图4 纵缝 $TE_{10}$ 模天线在不同长度模型上子午面方向图对比

按式(9)~(20)，用编程计算对比天线总的辐射场随再入体纵向尺寸的变化。为可靠地计算天线辐射场，首先检验算法及程序正确性，图5为再入体长度 $L = 16.8l$ 时 $TE_{11}$ 模天线辐射场计算值和实测值的对比(图中 $\times$ 号为计算值)，数据分析表明，在20 dB动态范围内计算偏差小于2 dB，因此，可认为计算方法较准确。

图6为计算得出轴向极化 $TE_{11}$ 模天线子午面归一化方向图随再入体纵向尺寸的变化对比，计算中天线安装位置距再入体群部距离为0.6  $l$ ，天线口径为 $f0.8l$ 。从图中可看出截短对轴向极化天线

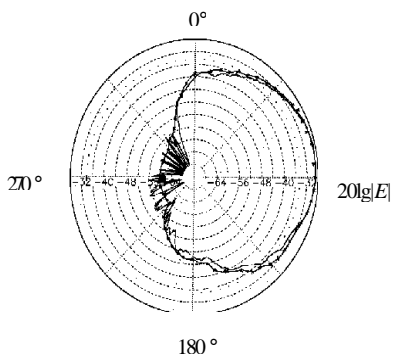
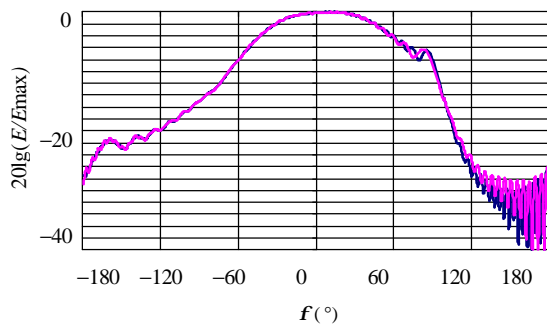


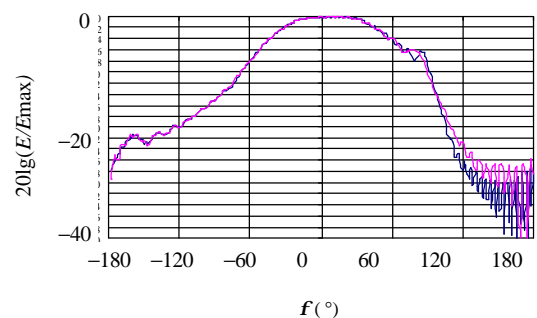
图5 轴向极化  $TE_{11}$  模天线辐射场计算值和实测值的对比

方向图的影响比  $f$  向极化天线大, 数据分析表明, 当再入体截锥尺寸  $L = 8.1l$ , 截锥再入体和整体再入体上的子午面方向图偏差在 3 dB 波束内 0.2 dB, 在 3 ~ 20 dB 范围内 2 dB, 再缩小再入体尺寸, 方向图偏差将更大。1 ~ 2 dB 的偏差在实验上是允许的, 因此, 对轴向极化口径天线再入体可截短到距口径中心  $8l$  左右。

参照图1, 任意复杂极化口径场  $E$  总可以分解成  $E_x$ 、 $E_y$  两个分量。根据前面分析推论, 当再入体尺寸距离天线口径大于8个波长时, 可以忽略截短对任意分量子午面方向图的影响, 此结论已经实验验证。



(a)  $L=16.8l, 11.7l$



(b)  $L=16.8l, 8.1l$

图6 不同尺寸再入体上  $TE_{11}$  模天线子午面方向图对比

## 4 结束语

对纵缝再入体天线, 当天线口径距再入体顶端距离大于5个波长时, 模型截短对天线方向图测试影响可以忽略; 对轴向口径极化或任意口径极化的再入体天线, 当天线口径距再入体顶端距离大于8个波长时, 模型截短对天线方向图测试影响可以忽略。

## 参 考 文 献

- 1 巴拉尼斯C A. 天线理论——分析与设计. 下册. 钟顺时, 任凯湘, 译. 北京: 电子工业出版社, 1988
- 2 Zhou Haijing, Ruan Yingzheng, Liu Wanmin. A new method for pattern simulation using gaussian beams. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1996, 25(8):201~205[周海京, 阮颖铮, 刘万明. 一种用高斯波束进行方向图模拟的新方法. 电子科技大学学报, 1996, 25(8): 201~205]
- 3 Ruan Yinzhen. Ray analysis in electromagnetics. Journal of Chendy Instityte of Radio Engineering, 1986, 15(3): 83~90[阮颖铮. 电磁场问题中的射线分析. 成都电讯工程学院学报, 1986, 15(3): 83~90]
- 4 王尔杰, 林焯森, 肖良勇, 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, 1983

## Truncation Effect Of RB Mockup On Antenna Radiation Pattern

Li Biao

(SEE I of CAEP, MianYang 621900)

Ding Xiaolei

(Dept.of Microwave Eng.,UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, the pattern variation of aperture antenna with different polarization versus the truncation size of reentry body(RB) mockup is analyzed with geometrical diffraction techniques(GDT). On the basis of analysis, truncation effect of RB mockup on antenna pattern is evaluated in elaboration with experiment, thus the minimum mockup sizes corresponding to different aperture polarization on which the antenna pattern measurement error due to truncation is neglectible is obtained

**Key words** antenna pattern; geometrical diffraction techniques; aperture polarization; truncation size

---

· 征订启事 ·

### 欢迎订阅《电子工艺技术》

《电子工艺技术》杂志是我国电子行业生产技术综合性科技期刊，创刊于1980年，该刊集众多专业为一体，突出工艺特色，凡是与电子产品生产过程相关的技术，都是该刊的报道范围。内容包括国内外电子工业生产技术动态、基础理论研究 and 科技成果介绍、科研生产中所急需的新技术、新材料、新工艺、新设备，引进消化吸收经验等。辟有SMT/SMD、PCB、微电子焊接、国外工艺文献导读、市场信息与新产品开发等栏目。内容着重于先进性和实用性。

《电子工艺技术》杂志是信息产业部优秀科技期刊，山西省一级期刊，全国电子行业核心期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)期刊》。

《电子工艺技术》杂志为双月刊，大16开本，48页，全年6期，总价36元。国内发行代号：22-52，国外发行代号：BM4439。全国各地邮局订阅。

编辑部地址：山西省太原市115信箱

邮政编码：030024

电 话：0351-6523813、6520409

E-mail:gytech @ public.ty.sx.cn

· 本刊编辑部 ·