

文章编号: 1001-0645(2003)06-0768-04

# 单孔毁伤对赋形反射面天线辐射特性的影响

肖 疆, 徐晓文, 董 涛

(北京理工大学 信息科学技术学院电子工程系, 北京 100081)

**摘要:** 研究赋形反射面天线的反射面在单孔毁伤条件下的辐射特性, 利用基于表面电流积分的物理光学法, 对赋形反射面天线的远场辐射特性进行了建模和分析, 比较了反射面完好时辐射特性的计算结果和测试值, 具有很好的一致性。重点探讨了天线反射面单孔毁伤后远区辐射特性随孔径及孔位置的变化规律, 得出毁伤孔径越大或孔越靠近反射面中心位置时, 天线的增益下降越多, 副瓣电平提高越多的结论。

**关键词:** 赋形反射面; 物理光学法; 辐射方向图; 天线毁伤

中图分类号: TN 820.1 文献标识码: A

## A Study on the Radiation Characteristics of a Shaped Beam Reflector Antenna Subjected to the Single-Hole Damage

XIAO Jiang, XU Xiao-wen, DONG Tao

(Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The radiation characteristic of a shaped beam reflector antenna subjected to a single-hole damage is studied. The far field of the shaped reflector antenna is modeled and analyzed using the method of physical optics based on surface current integration. Comparisons between the calculated results and those measured before the damage were made, and good agreement has been found to exist. A study was then made on the radiation pattern characteristics of the antenna after its reflector is damaged by bomb explosion, including the influence of the size and position of the damage. The larger the size and the closer the position of the damage hole to the reflector center, the higher will be position of the side lobe and the lower will be the gain of the antenna.

**Key words:** shaped beam reflector; PO method; radiation patterns; antenna damage

赋形反射面天线不仅在搜索雷达中应用十分广泛, 而且在卫星通信、射电天文、地面跟踪, 甚至在移动通信基站都有应用, 这类天线一般都是大口径反射体。在实战中, 雷达的其它部件一般都装在雷达车内而被保护起来, 被冲击波和弹片破坏的几率较小, 而反射面天线必须裸露在外, 故受到导弹等反雷达武器打击的概率较大。因此分析赋形反射面天线

的毁伤效应是非常有意义的。作者研究的天线反射体是一种典型的赋形双弯曲反射面。首先用物理光学法对完好反射面进行数值建模, 在仿真结果和测试结果具有很好一致性的基础上, 进行精确建模, 并快速计算了反射体单孔毁伤后天线的辐射特性随孔径以及孔位置的变化规律。

# 1 理论分析与建模

赋形波束双弯曲反射面天线在垂直面产生赋形波束(余割平方), 以使雷达的威力覆盖一定的高度、仰角和最大作用距离。而在水平面内产生窄波束, 以确定目标的位置。这样, 天线的反射体是非解析的, 比较复杂。因此对反射体的建模是求解辐射特性的关键。下面用基于面电流的物理光学法对反射体为完好实表面和单孔毁伤后分别进行详细分析与建模。

## 1.1 反射体实表面的天线分析与建模

天线轮廓形状如图 1 所示, 它是一种赋形双弯曲反射面天线, 纵向直线代表固定反射面的背景筋。

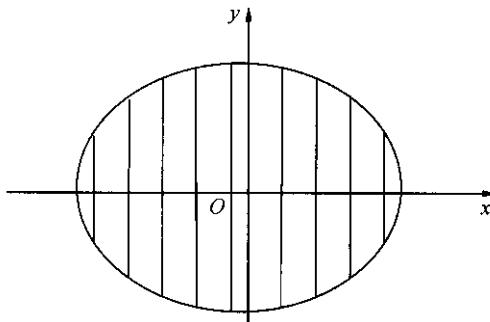


图 1 反射体轮廓示意图

Fig. 1 Profile of the reflector antenna

因为这种双弯曲赋形反射面天线是电大尺寸, 一般采用基于面电流近似的物理光学(PO)法进行分析计算<sup>[1~3]</sup>。而馈源采用 TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>11</sub> 模叠加激励的双模圆形喇叭, 垂直极化时馈源的辐射场表达式为

$$E_i = E_e \sin \varphi \theta + E_h \cos \varphi \varphi, \quad (1)$$

其中

$$E_e = E_o j \frac{kR^2}{4} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{J_1(\mu_{11})}{\mu_{11}} \frac{2J_1(u)}{u} \left[ \left( 1 + \frac{\beta'_{11}}{k} \cos \theta \right) - \alpha \frac{u^2}{\nu_{11}^2 - u^2} \left( 1 + \frac{k}{\beta_{11}} \cos \theta \right) \right]; \quad (2)$$

$$E_h = E_o j \frac{kR^2}{4} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{J_1(\mu_{11})}{\mu_{11}} \frac{2J_1(u)}{1 - u^2/\mu_{11}^2} \left( \cos \theta + \frac{\beta'_{11}}{k} \right); \quad (3)$$

式中  $r_1$  为场点到喇叭口面相位中心的距离;  $\theta$  为场点的偏轴角;  $\beta'_{11}$ ,  $\beta_{11}$  分别为 TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>11</sub> 模的传播常数;  $R$  为喇叭口径的半径;  $u = kR \sin \theta$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长;  $\alpha$  为 TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>11</sub> 模的模比复常

数。

根据物理光学法可得反射面的远区辐射场  $r$  处的表达式为<sup>[4,5]</sup>

$$\mathbf{E}_r(\mathbf{r}) = B \int_S (\mathbf{e}_r \times (\mathbf{e}_r \times \mathbf{J}_s)) e^{jkr_r} dS. \quad (4)$$

运用矢量运算公式得  $\mathbf{e}_r \times (\mathbf{e}_r \times \mathbf{J}_s) = (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{e}_r) \mathbf{J}_s - (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{J}_s) \mathbf{e}_r$ ,

系数

$$B = -\frac{j\omega\mu}{2\pi} \left[ \left( \frac{\epsilon}{\mu} \right) \frac{P}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{e^{jkr}}{r}, \quad (5)$$

电流

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H}_i = 2 \sqrt{\epsilon/\mu} \mathbf{n} \times (\mathbf{e}_i \times \mathbf{E}_i), \quad (6)$$

式中  $P$  为馈源的辐射功率;  $\mathbf{E}_i$  为馈源的辐射电场强度;  $\mathbf{n}$  为反射面上外法向矢量;  $\mathbf{e}_i$  为馈源照射极化单位矢量;  $r$  为源点到观察点之间的距离;  $\mathbf{e}_r$  为  $r$  的方向单位矢量;  $r'$  为馈源到反射面之间的距离;  $S$  为反射面的表面积。

## 1.2 反射体单孔毁伤后的天线分析与建模

由于一般对电大尺寸的反射体毁伤的典型形状可近似为圆形, 因此, 这里用球体和反射面相交就可以实现很好地逼近。确定毁伤圆位置, 也就是由相交球体的球心位置和半径确定<sup>[6]</sup>, 如图 2 所示。

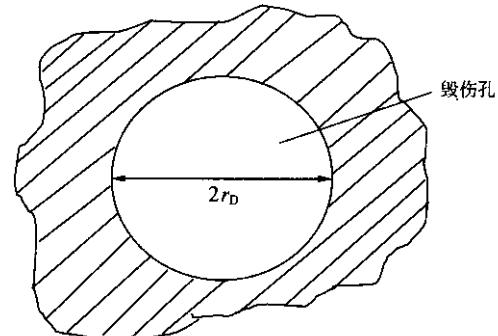


图 2 毁伤后反射面局部示意图

Fig. 2 Part of the reflector antenna with the damage

同样, 由基于表面感应电流的物理光学法知, 由于毁伤孔(如图 2)处没有电流, 电流只在其他完好实表面区域, 因此对毁伤后天线远区场辐射特性的求解是通过改变被积函数形式实现的。这样, 只要式(4)中被积函数的电流部分改变就可得到

$$\mathbf{E}_r(\mathbf{r}) = B \int_S (\mathbf{e}_r \times (\mathbf{e}_r \times \mathbf{J}'_s)) e^{jkr_r} dS, \quad (7)$$

式中

$$\mathbf{J}'_s = \begin{cases} \mathbf{J}_s & \text{完好表面处} \\ 0 & \text{毁伤孔处} \end{cases}. \quad (8)$$

这里可以通过改变毁伤孔的位置和毁伤孔的孔径,建立在各种情况下反射面单孔毁伤的天线远场辐射特性模型。

## 2 计算结果与讨论

根据上述计算方法,作者编制了相应的计算机程序,对由投影尺寸约为  $56\lambda \times 36\lambda$  反射体和低交叉极化的双模喇叭馈源组成的雷达天线,进行反射体为完好实表面和表面单孔毁伤两种情况下的数值模拟与仿真。

图 3、图 4 分别为天线完好时垂直面与水平面方向图的计算和测试曲线对比(由于测试仪器精度限制,不能测很低的副瓣电平,这里交叉极化只有较小的角度范围)。可以看出,角度测试曲线和计算曲线,在垂直面和水平面主极化和交叉极化的波瓣图吻合较好。副瓣的差别是因为未考虑馈源的球面误差、测试环境干扰、馈源和支架遮挡、边缘散射、测量设备误差等因素产生的。

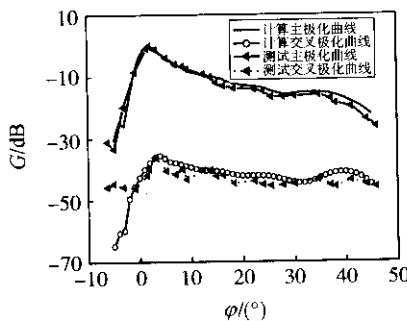


图 3 垂直面计算曲线和测试曲线对比

Fig. 3 Calculated and measured pattern in the lever plane

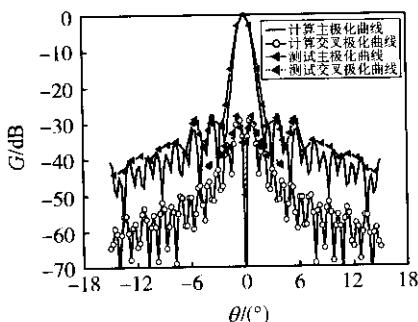


图 4 水平面计算曲线和测试曲线对比

Fig. 4 Calculated and measured pattern in the elevator plane

图 5、图 6 分别为水平面孔径变化时主极化和交叉极化曲线。图中 3 条曲线分别为完好时,毁伤孔位于反射体中半径为  $0.8\lambda$  和  $1.6\lambda$  的曲线。可以看出,在水平面,毁伤穿孔的孔径越大,副瓣电平提

高越多。当孔径扩大到  $1.6\lambda$  时,主极化变化很明显,最高副瓣电平由  $-28.00$  dB 提高到  $-25.00$  dB,交叉极化副瓣电平也可提高到  $2.00$  dB。可以说明毁伤孔越大对雷达的抗干扰性能的影响越大。

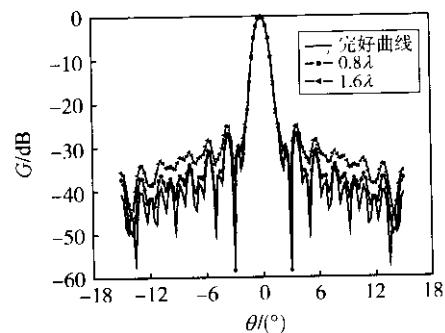


图 5 水平面孔径变化时主极化曲线

Fig. 5 Level principal pattern with the size of hole

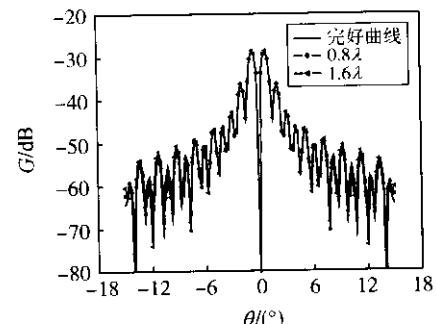


图 6 水平面孔径变化时交叉极化曲线

Fig. 6 Level cross pattern with the size of hole

图 7、图 8 分别为水平面孔位置纵向移动时主极化和交叉极化曲线。图中 3 条曲线分别为毁伤穿孔半径为  $1.6\lambda$ ,孔中心位置在反射体的中心轴线上,及相对中心轴线纵向偏移  $10^\circ$  和  $30^\circ$  时的曲线。在水平面,当孔径位置变化时,主极化最高副瓣电平从孔位于中心时的  $-25.12$  dB 下降到纵向偏移  $30^\circ$  时的  $-27.50$  dB,副瓣电平最大下降到  $4.50$  dB。

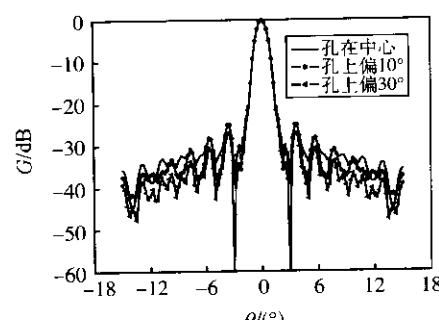


图 7 水平面孔位置纵向移动时主极化曲线

Fig. 7 Level principal pattern with longitudinal position of hole

dB; 而交叉极化副瓣电平变化较小, 约 0.50 dB, 故穿孔在中心位置比在边界的主极化副瓣电平抬高较大。

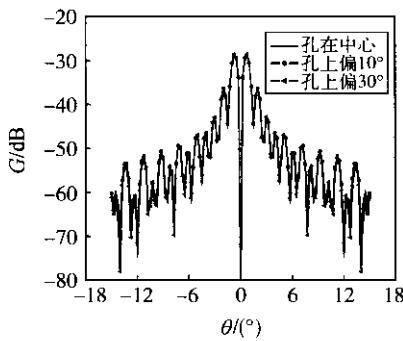


图 8 水平面孔位置纵向移动时交叉极化曲线

Fig. 8 Level cross pattern with longitudinal position of hole

图 9、图 10 分别为水平面孔位置横向移动时主

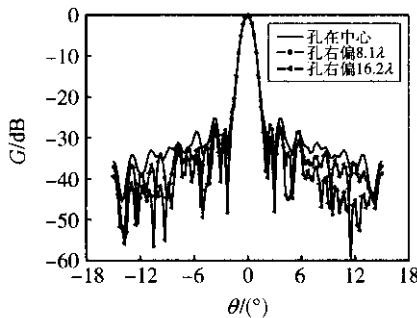


图 9 水平面孔位置横向移动时主极化曲线

Fig. 9 Level principal pattern with latitudinal position of hole

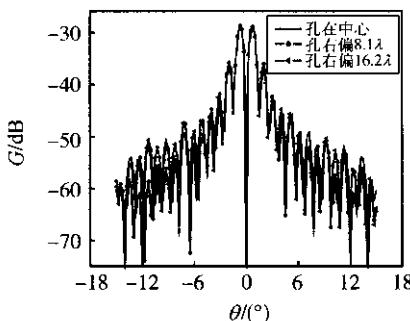


图 10 水平面孔位置横向移动时交叉极化曲线

Fig. 10 Level cross pattern with latitudinal position of hole

极化和交叉极化曲线。图中, 3 条曲线分别为毁伤穿孔半径为  $1.6\lambda$  位置在反射体中间, 向边界横向偏移  $8.0\lambda$  和  $16.0\lambda$  时的曲线。可以看出, 在水平面内, 毁伤孔在中心比横向偏移  $16.0\lambda$  的电平高出  $10.00\text{ dB}$ , 而交叉极化电平相反, 毁伤孔在中心比横向偏移  $16.0\lambda$  电平低  $3.50\text{ dB}$ 。还可以看出, 如果毁伤孔不以天线轴对称时, 天线的左右辐射波瓣也

不对称, 孔偏向一个方向时的主极化副瓣电平提高较大, 而且只要毁伤孔不对称于天线轴但越接近中心, 那一边的主极化副瓣电平提高越大。这也证明了如果在反射面上毁伤孔不对称时, 会破坏天线水平面辐射方向图的对称性。

在上面天线反射面毁伤分析中, 只给出了水平面的方向性曲线。由于垂直面的方向性随孔径的变化较小, 影响最大的增益也只有当孔径大到为  $1.6\lambda$  时才下降  $0.17\text{ dB}$ , 曲线很难表示出来。

### 3 结 论

作者利用基于面电流近似的物理光学法对双模喇叭激励的双弯曲反射体天线进行了建模与仿真。通过计算曲线与测试曲线的结果对比表明, 两者具有很好的一致性, 从而验证了作者提出的反射面分析的数学模型是正确的。通过对赋形天线的实表面被导弹等反雷达武器造成的单孔毁伤后的辐射特性建模, 分析了天线的电性能指标随着毁伤孔径以及孔的位置变化的规律, 得到了一些有用结论, 为实战雷达提供了有效的理论依据。

#### 参考文献:

- [1] Carberry T F. Analysis theory for the shaped-beam doubly curved reflector antenna[J]. IEEE Trans AP, 1969, 17: 131—138.
  - [2] Winter C F. Dual vertical beam properties of doubly curved reflectors[J]. IEEE Trans AP, 1971, 19: 174—180.
  - [3] Duan D W, Yahya R S. A generalized diffraction synthesis technique for high performance reflector antenna [J]. IEEE Trans AP, 1995, 43: 27—40.
  - [4] 胡明春, 李建新. 赋形波束双弯曲反射面探讨[J]. 现代雷达, 1996(6): 64—68.  
Hu Mingchun, Li Jianxin. Research on doubly curved reflector antenna with shape beam[J]. Modern Radar, 1996(6): 64—68. (in Chinese)
  - [5] 林世明. 赋形波束双弯曲反射器天线理论研究[J]. 电子学报, 1981(4): 56—66.  
Lin Shiming. Study on doubly shape-beam reflector antenna theory[J]. Acta Electronica Sinica, 1981(4): 56—66. (in Chinese)
  - [6] 数学手册编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979. 428.
- Editing Team of Math Manual. Math manual[M]. Beijing: Higher Education Publishing House, 1979.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>