

# 用 PTD 分析双弯曲反射面天线形变和穿孔的辐射特性<sup>1</sup>

董 涛 徐晓文 肖 疆

(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

**摘要:** 该文根据模型反射面天线的爆炸实验测试结果建立了反射面天线形变的数学模型, 应用物理光学(PO)法和物理绕射(PTD)理论计算了一种赋形反射面天线形变后的辐射特性, 同时还计算了反射面天线表面被爆炸破片穿孔后的辐射特性, 结果表明, 由于反射面的局部形变, 直接导致辐射方向图的恶化, 并且随着形变部分面积的增大, 水平面的副瓣抬高很大, 穿孔也会使水平面的副瓣抬高。

**关键词:** 反射面天线, 物理光学法, 物理绕射理论, 形变, 穿孔, 辐射特性

中图分类号: TN820 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2004)12-2002-04

## Analysis of the Radiation Characteristics of the Doubly Curved Reflector Antenna with Surface Distortion and Holes Using PTD

Dong Tao Xu Xiao-wen Xiao Jiang

(Dept of Electron. Eng., Beijing Institute of Tech., Beijing 100081, China)

**Abstract** The reflector antenna distortion model is built by exploding test results. The radiation characteristics of a kind of distorted shaped reflector antenna are computed by using PO and PTD method, and the radiation characteristics of the reflector antenna with holes on the surface are also computed. The simulation results show that because of the local distortion of the reflector the radiation patterns become degraded. The sidelobe level in the azimuth plane becomes higher as the distortion area becomes bigger. It can be seen that the sidelobe level in the azimuth plane also increases because of the reflector perforated with holes on the surface.

**Key words** Reflector antenna, PO, PTD, Surface distortion, Perforated holes, Radiation characteristics

## 1 引言

前人对反射面天线表面误差的研究主要集中在表面随机误差(Random surface error)对辐射特性的影响<sup>[1,2]</sup>, 还有反射面天线由于受到重力或者热效应所产生的微小形变对辐射特性的影响<sup>[3-5]</sup>, 而且所研究的形变都是假定其解析可知, 并非通过实验测得, 但是在实战中, 雷达的反射面天线会因为冲击波的影响产生大面积、大程度的形变, 运用随机误差方法不能处理这类形变。本文针对模型反射面天线在冲击波影响下的测试数据, 拟合出形变部分的数学表达式, 将形变部分和非形变部分单独处理, 运用物理光学法(PO)和物理绕射理论(PTD)计算了一种双弯曲赋形反射面形变后的辐射方向图, 既考虑了反射面的贡献, 又考虑到了反射面天线边缘的绕射贡献。

在实战中, 雷达的反射面天线会受到导弹、炮弹、炸弹、无人机等武器的攻击, 反射面的表面会被爆炸破片穿孔, 关于穿孔对反射面辐射特性的影响还未见公开报道。本文建立了反射面天线随机穿孔的模型, 运用PO和PTD分析了一种双弯曲赋形反射面天线表面随机穿孔对辐射特性的影响, PTD可以很好地考虑穿孔边缘地绕射作用。

<sup>1</sup> 2003-07-26 收到, 2004-01-05 改回

由于所研究的双弯曲赋形反射面天线关于水平面并不对称, 采用几何光学法和口径场积分法比较困难, 而采用 PO 具有物理概念清楚, 计算简单的特点, 对于边缘等绕射结构若采用几何绕射理论 (GTD), 则显得方法不匹配, 故采用 PTD。PO 和 PTD 的结合使用, 具有概念明确, 简单易行等特点, 有很高的计算精度。

## 2 天线完好时辐射方向图的计算

我们采用的是一种用于低空监视的赋形波束反射面天线<sup>[6-8]</sup>, 其辐射方向图在水平面为窄波束, 以确定目标的位置, 在俯仰面为余割平方赋形波束, 以使雷达的威力覆盖一定的高度、仰角和最大作用距离, 该反射面天线的馈源为 TE11 和 TM11 模叠加激励的双模圆形喇叭, 垂直极化。该天线的最大孔径为  $56\lambda$ , 由于这种双弯曲赋形反射面天线尺寸相对于工作波长属于电大尺寸, 一般采用 PO 法进行分析计算。根据 PO 可得反射面的远区辐射场为

$$\mathbf{E}_{\text{PO}} = B \int_s \frac{\mathbf{E}_i}{r} [\hat{n} \times (\hat{r} \times \hat{e}_i)] e^{-jk_r(1-\hat{r} \cdot \hat{R})} ds \quad (1)$$

其中系数  $B = -\frac{j\omega\mu}{2\pi} \left[ \left( \frac{\varepsilon}{\mu} \right) \frac{P}{2\pi} \right]^{1/2} \frac{e^{-jkR}}{R}$ ,  $P$  为馈源的辐射功率,  $\mathbf{E}_i$  为馈源的辐射电场强度,  $r$  是馈源相位中心 (坐标原点) 到反射面上一点的矢量,  $r$  是  $r$  的模值,  $\hat{r}$  是  $r$  的单位矢量,  $\mathbf{R}$  为坐标原点到观察点的矢量,  $R$  是  $\mathbf{R}$  的模值,  $\hat{R}$  是  $\mathbf{R}$  的单位矢量,  $\hat{n}$  为反射面上的单位法向矢量,  $\hat{e}_i$  为馈源照射极化单位矢量。

为了考虑反射面边缘的绕射作用, 采用 PTD 来计算绕射场, 根据 PTD 可得反射面边缘的远区绕射场为

$$\mathbf{E}_{\text{PTD}} = jk_0 \int_c [\eta_0 I(r') \hat{k}_s \times (\hat{k}_s \times \hat{t}) + M(r') (\hat{k}_s \times \hat{t})] \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} dl, \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad (2)$$

$I(r')$  和  $M(r')$  分别是边缘的等效电流和磁流<sup>[9-11]</sup>,  $\eta_0$  是自由空间波阻抗,  $\hat{k}_s$  为散射波矢量,  $\hat{t}$  为劈边缘的单位切向矢量,  $r'$  是劈边缘任意一点的位置矢量,  $r$  是观察点的位置矢量。所以, 总辐射场为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{PO}} + \mathbf{E}_{\text{PTD}} \quad (3)$$

计算结果和测试结果的对比如图 1, 图 2 所示。

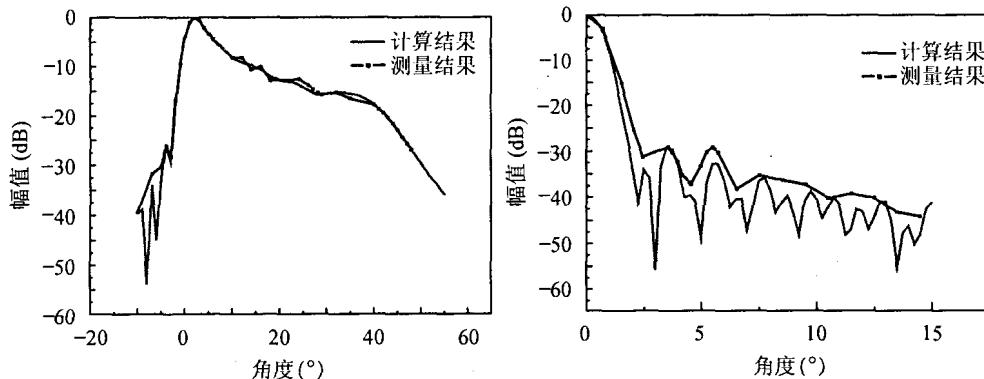


图 1 垂直面方向图

图 2 水平面方向图

可以看出测试曲线与计算曲线吻合较好，从而证明了我们计算方法的正确性。也可以看出 PO 和 PTD 的结合使用，能保证较高的计算精度。

### 3 天线形变时的分析和计算

反射面天线在爆炸冲击波的影响下会发生一定的形变。为了获得形变的参数，我们采用模型反射面天线进行了爆炸冲击波实验，根据实验测得的离散数据，我们拟合出形变部分的表达式。

计算形变后天线的辐射场时，我们将形变部分和未形变的部分的辐射场分别计算，然后进行矢量叠加，最后得到考虑了形变效应的总的辐射场。

在上述测试结果的形变条件下，形变的面积对辐射方向图有很大的影响，我们分别计算了以馈源直射到反射面中心位置为对称中心，形变是关于中轴线对称的，2% 和 5% 的面积发生形变时辐射方向图的变化，并与反射面天线完好时的辐射方向图进行了对比，结果如图 3，图 4 所示。

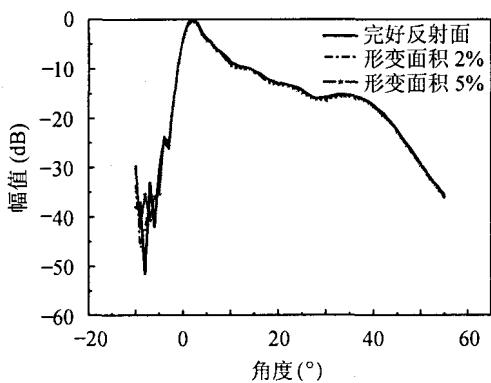


图 3 垂直面方向图

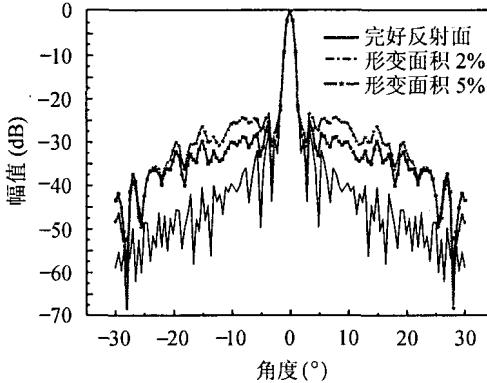


图 4 水平面方向图

从对比的结果可以看出，随着形变面积的增大，垂直面辐射方向图并未发生明显的变化，而水平面辐射方向图的副瓣明显抬高，并且随着形变面积的增大副瓣不断抬高。

### 4 天线穿孔时的分析和计算

当爆炸破片打到反射面天线上时，天线的表面会被破片穿孔，这样会对反射面天线的辐射特性产生一定影响。在考虑反射面穿孔效应时，根据 PO 认为穿孔区域的表面电流  $J_s = 0$ ，完好处，电流仍为原来的  $J_s$ ，即

$$J_s = \begin{cases} 2\hat{n} \times H_i, & \text{完好处} \\ 0, & \text{穿孔处} \end{cases} \quad (4)$$

根据实验，反射面天线表面的随机穿孔可分为两种类型：均匀分布和正态分布。由于两者的处理方法基本相同，我们只考虑穿孔正态分布的情况。当穿孔较小时，穿孔可近似为圆形，该圆由圆心坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  和半径  $\rho$  来确定。为了实现穿孔在反射面表面以正态分布的密度随机分布，我们在反射面天线尺寸所允许的范围产生一定数量的服从标准正态分布（均值  $\mu = 0$ ，方差  $\sigma = 1$ ）的随机数作为孔心坐标，对于赋形反射面天线，决定其反射面方程的自变量是  $x$  坐标和入射角  $\theta, y, z$  坐标是可以通过自变量来计算的。为了简化计算，我们计算最简单的情况，我们就先让  $\theta = 0$ ， $x$  以标准正态分布的密度函数随机分布，将反射面的中轴线作为正态分布的对称轴。这样反射面表面的随机穿孔就可以确定了。我们计算了穿孔数为 20，孔径为  $\lambda$  和  $2\lambda$  两者情况下该反射面天线的辐射方向图，并与完好时的情况进行了对比，如图 5 和图 6 所示。

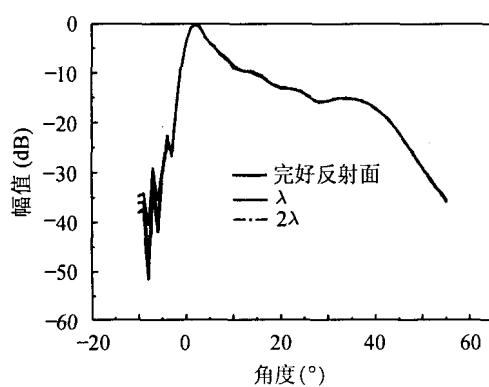


图 5 垂直面方向图

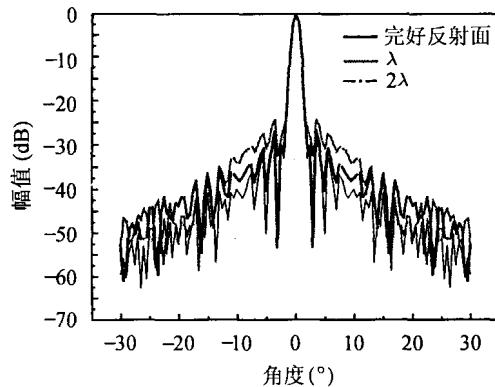


图 6 水平面方向图

从对比的结果可以看出, 随着穿孔孔径的增大, 垂直面辐射方向图并未发生明显的变化, 而水平面辐射方向图的副瓣明显抬高, 并且随着穿孔孔径的增大峰值副瓣不断抬高。

## 5 结论

运用物理光学法和物理绕射法相结合, 来分析双弯曲反射面天线在爆炸毁伤条件下的形变效应和穿孔效应, 具有概念清晰明确, 简单易行的特点, 这样不但考虑了反射面天线的辐射贡献, 还考虑了天线边缘的绕射作用, 能保证较高的计算精度。本文的分析处理方法还可以用来分析其他类型反射面天线的形变、穿孔等毁伤效应对辐射特性的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Samii Y R. An efficient computational method for characterizing the effects of random surface error on the average power pattern of reflectors[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1983, AP-31(1): 92-98.
- [2] Rusch W V T, Wohlleben R. Surface tolerance loss for dual-reflector antennas[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1982, AP-30(4): 784-785.
- [3] Duan Dah-Weih, Samii Y R. A generalized diffraction synthesis technique for high performance reflector antennas[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1995, AP-43(1): 27-40.
- [4] 陈少平. 喂源偏离焦点及反射面变形情况下抛物面天线辐射场的计算 [J]. 中南民族学院学报, 1995, 14(1): 24-26.
- [5] 王五兔, 徐国华. 反射面变形对天线辐射方向图的影响. 电子学报, 1994, 22(12): 46-49.
- [6] 胡明春, 李建新. 赋形波束双弯曲反射面探讨. 现代雷达, 1996, 18(5): 64-68.
- [7] 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, 9(4): 56-66.
- [8] 尹家贤, 等. 用 FDTD 和物理光学混合法分析毫米波抛物面天线 [J]. 电子学报, 2002, 30(6): 791-793.
- [9] 阮颖铮. 雷达散射截面与隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 118-125.
- [10] 崔索民, 吴振森. PTD 和 PTDEEC 算式的奇异点处理 [J]. 电波科学学报, 1997, 12(4): 369-374.
- [11] Arie Michaeli. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation[J]. *IEEE Trans. on AP*, 1984, AP-32(3): 252-258.

董 涛: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为反射面天线的毁伤效应、超低副瓣相控阵天线以及遗传算法在天线阵优化设计中的应用。

徐晓文: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超低副瓣相控阵天线、微带天线、智能天线等。

## 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>