

具有局部凸起形变反射面天线的方向图仿真

宋微微¹, 张小苗¹, 袁方成²

(1. 西安电子科技大学 天线与微波重点实验室 陕西 西安 710071; 2. 中国人民解放军 63752 部队 陕西 渭南 714011)

摘要:针对反射面天线受撞击表面形变问题,利用二次曲面交截椭圆建立局部凸起形变的数学模型,运用基于表面电流积分的物理光学方法计算辐射方向图,研究了天线发生形变后辐射特性随形变面积和形变位置的变化规律。结果表明,随着形变面积的扩大,副瓣电平逐渐升高;形变位于中心位置时,对方向图的影响最为显著。

关键词:反射面天线;局部凸起形变;辐射方向图;副瓣电平

中图分类号:TN823+.27

文献标识码:B

文章编号:1004-373X(2008)07-001-03

Radiation Pattern Simulation of the Offset Reflector Antennas with Local Protuberant Distortion

SONG Weiwei¹, ZHANG Xiaomiao¹, YUAN Fangcheng²

(1. National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an, 710071, China;

2. 63752 Military Units of CPLA, Weinan, 714011, China)

Abstract: The computational mathematic model, which is a kind of local protuberant distorted offset reflector antenna, is established considering reflector antennas impacted. The local distorted model is described making use of elliptical section generated by quadric intersection, and the radiation patterns are obtained using the method of Physical Optics (PO) based on surface current integration. The infection of protuberant distorted radiation patterns is discussed as the distorted area and distorted position are changed. As a result, the larger the area and the closer the position of the protuberant distortion to the reflector center, the higher will be position of the side- lobe level.

Keywords: reflector antenna; local protuberant distortion; radiation pattern; side- lobe level

1 引言

由于受到加工、重力、温度和振动等环境因素的影响,反射面天线表面存在形变。随着频率越来越高的使用需求,现代反射面天线越来越多地工作于Ka及以上毫米波频段,原先在Ku及以下频段可以初步估算的形变影响,由于形变的范围和幅度可以与波长相比,需要精确预计对天线电性能的影响,并为其补偿提供数据。

形变分为全局和局部形变两种,文献[1]针对地面大型反射面天线因重力作用使支撑结构变形,进而影响反射面的形状和电性能,采用了补偿技术;文献[2]针对星载轻量化薄膜反射面天线的结构形变问题,采用非周期函数模型来描述,分析了形变的影响与补偿方法;文献[3]描述了冲击波作用后的多孔毁伤形变,采用物理光学绕射方法(PTO)分析其电性能,得出一定的规律。

本文研究反射面天线受撞击引起的局部形变,基于圆锥曲面和旋转抛物面的交截椭圆建立凸起形变的数学模型。采用物理光学(PO)法计算抛物面和形变面的感应电流,用面电流积分方法计算方向图,在固定形变幅度情况

下,讨论了凸起形变的面积和位置对方向图的影响。以一典型偏置反射面为例,计算了天线的电参数。与无形变的方向图相比,形变位于反射面中心、面积为口径面积的10%时,副瓣电平上升较为显著。

2 天线模型的建立

偏置抛物反射面天线的焦距为F,直径为D,偏置高度为H。在xoy平面上的投影是个半径为D/2的圆。馈源置于焦点,如图1(a)所示。天线坐标系设为x, y, z, 原点位于焦点;馈源坐标系设为x_f, y_f, z_f, 原点同样位于焦点, z_f指向反射面的中心。已知反射面上的任意一点A(x_A, y_A, z_A)和角度α。以A点和原点的连线为轴,α角为张角形成的圆锥与反射面相交,从文献[4]可知交线是一平面椭圆曲线。值得注意的是椭圆的中心并不是轴线与椭圆的交点。设椭圆的中心为Q(x_Q, y_Q, z_Q),轴线与椭圆的交点为S(x_S, y_S, z_S)。以椭圆平面为x_doy_d面,Q点为原点建立形变坐标系x_d, y_d, z_d, z_d轴指向反射面内。

为了计算需要还需要一个坐标系x', y', z', 他的原点位于焦点, z'轴与z轴重合, y'轴与椭圆的长轴共面,如图1(b)所示,在这里设y'oz'为经线面。

β是轴线与z轴的夹角:

收稿日期:2007-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60671056)

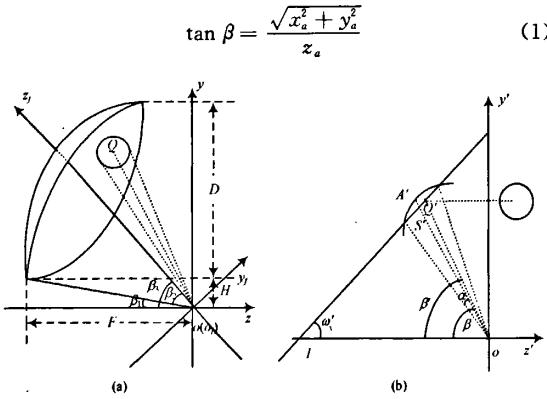


图 1 不同坐标系中的凸起形变反射面模型

在 x', y', z' 坐标系中:

$$x_Q' = 0 \quad (2)$$

$$y_Q' = \frac{2 \sin \beta}{\cos \beta + \cos \alpha} F \quad (3)$$

椭圆长轴所在的直线设为 l , 方程表达式为:

$$y' = \frac{\cos \beta + \cos \alpha}{\sin \beta} z' + \frac{2 \cos \alpha}{\sin \beta} F \quad (4)$$

所以:

$$z_Q' = \frac{\sin \beta}{\cos \beta + \cos \alpha} (y_Q' - \frac{2 \cos \alpha}{\sin \beta} F) \quad (5)$$

要想得到 x, y, z 坐标系下 Q 的值, 需要进行坐标转换。根据文献[5], 最终的表达式可以写为:

$$\begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_z & \sin \omega_z & 0 \\ -\sin \omega_z & \cos \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_Q' \\ y_Q' \\ z_Q' \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\omega_z = \arctan \frac{x_A}{y_A}$ ($y_A \neq 0$)。椭圆曲线在 xy 面上的投影是一个圆, 半径设为 a , 则:

$$a = \frac{2 \sin \alpha}{\cos \beta + \cos \alpha} F \quad (7)$$

那么, 椭圆的短轴 a' 和长轴 b' 就为:

$$a' = a \quad (8)$$

$$b' = a \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \beta}{(\cos \beta + \cos \alpha)^2}} \quad (9)$$

在形变坐标系 x_d, y_d, z_d 中, 设凸起形变的形状为一个余弦幕函数:

$$z_d = \Delta A \cos^p \left(\frac{\pi}{2r_0} r \right) \quad (10)$$

其中,

$$r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (11)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{a'^2 x_d^2 b'^2 + a'^2 y_d^2 b'^2}{a'^2 y_d^2 + b'^2 x_d^2}} \quad (12)$$

 ΔA 表示形变幅度, p 表示形变锥削度 ($p > 0$)。为了得到天线坐标系 x, y, z 下的形变函数, 需要经过

两次坐标转换, 其过程如下:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_x & -\sin \omega_x \\ 0 & \sin \omega_x & \cos \omega_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} x + x_Q \\ y + y_Q \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_z & \sin \omega_z & 0 \\ -\sin \omega_z & \cos \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

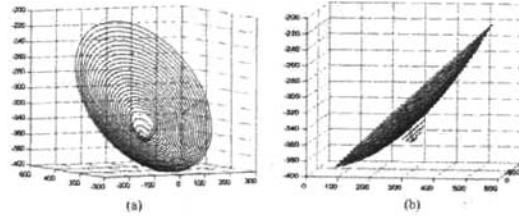
这里, $\omega_x = \frac{\pi}{2} - \omega_x'$, ω_x' 由式 $\tan \omega_x' = \frac{\cos \beta + \cos \alpha}{\sin \beta}$ 得出。 x_Q, y_Q, z_Q 即 Q 点的值和 ω_z 前文已经求出。 x_0, y_0, z_0 是转换过程中的一个中间坐标系, 为了方便从形变坐标系转换到天线坐标系。这样就得到完整的具有局部凸起形变反射面天线的模型, 如图 2 所示, 是一个具有代表性的形变天线模型。

图 2 不同角度的凸起形变反射面天线模型

3 天线特性的分析和计算

当抛物面的焦距和反射面口径大于波长, 且反射面位于馈源的远区场时, 可以近似地把反射面的入射波和反射波看成平面波, 从而可以用物理光学(PO)方法来求反射面上的表面电流。馈源的方向图为 $\cos^q(\theta)$, 他的远区电场和磁场分别为^[6]:

$$\vec{E}_f(\vec{r}_f) = [-\sin(\varphi_f) \cos^q(\theta_f) \hat{\theta}_f - \cos(\varphi_f) \cos^q(\theta_f) \hat{\varphi}_f] \frac{e^{-jkr_f}}{4\pi r_f} \quad (15)$$

$$\vec{H}_f(\vec{r}_f) = \frac{1}{\eta} [\cos(\varphi_f) \cos^q(\theta_f) \hat{\theta}_f - \sin(\varphi_f) \cos^q(\theta_f) \hat{\varphi}_f] \frac{e^{-jkr_f}}{4\pi r_f} \quad (16)$$

为了得到天线坐标系 x, y, z 下的馈源磁场表达式, 经过坐标转换, 最后结果如下:

$$\begin{bmatrix} H^{inc}(\vec{r}) \\ H^{inc}(\vec{\theta}) \\ H^{inc}(\vec{\varphi}) \end{bmatrix} = \mathbf{B}^T \cdot \begin{bmatrix} \cos \omega_z'' & \sin \omega_z'' & 0 \\ -\sin \omega_z'' & \cos \omega_z'' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_x'' & \sin \omega_x'' \\ 0 & -\sin \omega_x'' & \cos \omega_x'' \end{bmatrix} \cdot \mathbf{B} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\varphi_f) \cos^q(\theta_f) \\ -\sin(\varphi_f) \cos^q(\theta_f) \end{bmatrix} \frac{e^{-jkr_f}}{4\pi r_f} \quad (17)$$

其中, $\omega_z'' = \pi + \beta_3$, $\omega_x'' = \pi$, \mathbf{B} 是球面坐标系到直角坐标系的转换矩阵, 且 \mathbf{B}^T 是 \mathbf{B} 的转置矩阵。

面电流 \vec{J} 可以写成:

$$\vec{J} = \begin{cases} 2\hat{n} \times H^{inc}(\vec{r}) & (\text{无形变区域}) \\ 2\hat{n}_d \times H^{inc}(\vec{r}) & (\text{形变区域}) \end{cases} \quad (18)$$

这里, \hat{n} 是无形变区域反射表面的单位矢量, \hat{n}_d 是形变区域反射表面的单位矢量, $H^{inc}(\vec{r})$ 是天线坐标系下的入射磁场表达式。

4 计算结果分析

本文运用 Matlab 作为仿真工具计算局部凸起形变反射面天线的方向图, 焦距 F 取 375 mm, 直径 D 取 500 mm, 偏置高度 H 为 25 mm。工作频率在 30 GHz, 边缘照射电平在 -10 dB。

表 1 不同面积形变电参数的比较

面积比	3%	5%	10%
H 面的 $\Delta SLL(\text{left})/\text{dB}$	5.82	8.05	11.68
H 面的 $\Delta SLL(\text{right})/\text{dB}$	5.81	8.05	11.69
H 面的 $\Delta HPBW$	0.977	0.962	0.917
E 面的 $\Delta SLL(\text{left})/\text{dB}$	4.54	6.57	9.80
E 面的 $\Delta SLL(\text{right})/\text{dB}$	4.64	6.66	9.90
E 面的 $\Delta HPBW$	0.977	0.955	0.917

注: 表 1 与图 3 相对应, ΔSLL 形变与无形变反射面天线副瓣电平的差值, $\Delta HPBW$ 形变与无形变反射面天线半功率波瓣宽度的比值。

设形变锥削度固定不变, 形变幅度为椭圆长轴长度的一半, 在中心位置改变形变的面积, 分别取整个面积的 3%, 5%, 10% 发生形变, 计算其方向图, 并与无形变的方向图曲线相比较, 如图 3 所示。

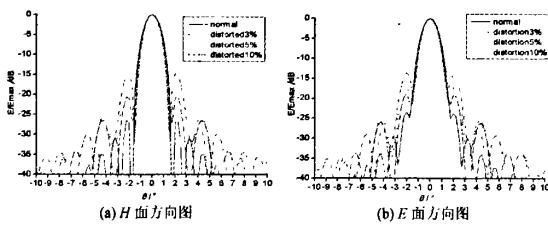


图 3 不同面积形变方向图与无形变方向图的比较

从图 3 及表 1 可以看出, 无论是 H 面还是 E 面的方向图中, 形变反射面的辐射方向图与无形变的辐射方向图比较, 变化显著。形变面积达到总面积的 10% 时, 副瓣升高了约 11.7 dB, 半功率波瓣宽度最窄。可以得出, 随着形变面积的扩大, 最高副瓣电平逐渐升高, 半功率波瓣宽度逐渐最窄。

另一个讨论的因素是凸起形变的位置。形变幅度和锥削度设置不变, 形变面积取整个面积的 5%。在以下三个位置设置形变: 位置 1 是反射面的中心, 位置 2 和位置 3 分别是在中心位置向 y 轴正向移动 $D/4$ 和向 x 轴正向移动 $D/4$ 处, 将他们的方向图曲线与无形变反射面方向图曲线相比较, 如图 4 所示。

表 2 不同位置形变电参数的比较

形变位置	位置 1	位置 2	位置 3
H 面的 $\Delta SLL(\text{left})/\text{dB}$	8.05	5.09	2.02
H 面的 $\Delta SLL(\text{right})/\text{dB}$	8.05	5.11	1.69
H 面的 $\Delta HPBW$	0.962	0.985	1.023
E 面的 $\Delta SLL(\text{left})/\text{dB}$	6.57	-1.12	5.03
E 面的 $\Delta SLL(\text{right})/\text{dB}$	6.66	-1.37	5.11
E 面的 $\Delta HPBW$	0.955	1.030	0.970

注: 表 2 与图 4 相对应, ΔSLL 形变与无形变反射面天线副瓣电平的差值, $\Delta HPBW$ 形变与无形变反射面天线半功率波瓣宽度的比值。

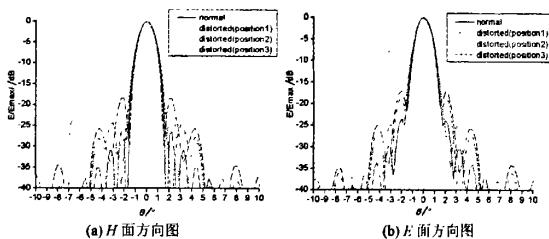


图 4 不同位置形变方向图与无形变方向图的比较

从图 4 及表 2 数据可以看出, 在中心位置的形变方向图的副瓣电平在两个面 (E 面和 H 面) 上变化都是最显著的, 半功率波瓣宽度也是最窄的, 说明中心位置的形变对反射面辐射特性的影响最大, 这是因为越接近天线的中心部位, 辐射场强越强。

5 结语

针对反射面天线受撞击的情况, 提出了一种具有局部凸起形变的反射面天线。利用圆锥曲面和旋转抛物面的交截椭圆建立了局部凸起形变反射面天线的数学模型, 并运用物理光学 (PO) 方法计算了形变反射面的辐射场方向图。通过讨论形变对辐射方向图的影响, 得出随形变面积的扩大, 副瓣电平升高, 半功率波瓣宽度变窄, 且中心位置的形变对辐射方向图的影响最大的结论。这为反射面天线在卫星通讯中的应用提供了很大的帮助。

参 考 文 献

- [1] Alessandro Orfei, Marco Morsiani, Giampaolo Zucchini, et al. An Active Surface for Large Reflector Antennas. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2004, 46(4).
- [2] Keyvan Bahadori, Yahya Rahmat-Samii. Characterization of Effects of Periodic and Aperiodic Surface Distortions on Membrane Reflector Antennas. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2005, 53(9).
- [3] Dong Tao, Xu Xiao Wen, Xiao Jiang. Analysis of the Radiation Characteristics of the Reflector Antenna with Distortion and Holes Using PTD. 2003 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2003: 145-148.

(下转第 7 页)

为 -18° 或者 14° 的时候,极化比幅度近似为1,天线在扫描过程中遍历到了圆极化状态。

参考文献

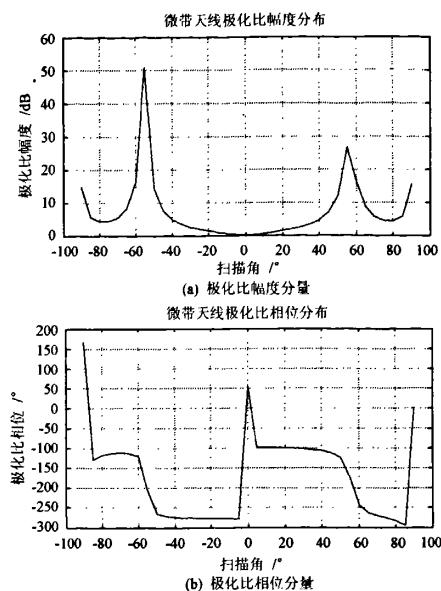


图5 天线空间极化比分布示意图

4 结语

本文给出了一种新型的空域变极化微带天线,详细分析了变极化和宽波束的原理,并对其进行了计算机仿真,结果表明该天线在空域扫描范围内较好地满足了从垂直极化经过圆极化向水平极化过渡的要求,使得天线本身在空域范围内,通过控制扫描角的变化改变天线的极化状态。该方法效果明显,规律性强,简单易行,具有很好的工程应用价值。该微带天线单元的加工制作和特性测量工作正在进行之中,本文的研究结果为空域变极化特性在电子侦察、电子对抗等多极化信息处理领域的应用提供可靠的基础和实例佐证。

(上接第3页)

- [4] Jamnejad - Dailami V, Yahya Rahmat - Samii. Some Important Geometrical Features of Conic - section - generated Offset Reflector Antenna. *IEEE Trans. , Antennas and Propagat.*, 1980, AP - 28(6).
- [5] Rahmat - Samii Y. Useful Coordinate Transformations for Antenna Applications. *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, 1979, AP - 27(4).
- [6] Yahya Rahmat - Samii, Victor Galindo - Israel. Shaped Reflector Antenna Analysis Using the Jacobi - Bessel Series. *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, 1980, AP - 28(4).
- [7] 魏文元,宫德明,陈必森.天线原理[M].北京:国防工业出版社,1985.
- [8] 杨可忠,杨智友,章日容.现代面天线新技术[M].北京:人民邮电出版社,1993.

作者简介 宋微微 女,1983年出生,西安电子科技大学电磁场与微波技术专业在读硕士。主要从事反射面天线和共形相控阵天线的研究。

张小苗 男,1967年出生,西安电子科技大学教授,硕士生导师。主要从事移动通信天线技术、相控阵天线技术、共形相控阵天线技术和反射面天线技术的研究。

袁方成 男,1982年出生,63752部队助理工程师。

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)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)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),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>