

卡塞格伦光学天线的热变形及偏轴性能分析

陈梓浩，王心洋，王婧

(电子科技大学 物理电子学院，成都 610054)

摘要：本文建立了一个数学模型来描述径向温度变化和热应力对镜片表面热变形的影响，利用该数学模型分析了卡塞格伦光学天线系统在温度变化的热环境下的光传输特性，并用 ANSYS 软件绘出了镜体热变形时的点扩散函数图和在 x, y, z 方向的热变形位移图，由此分析了镜面的热变形对光束的传输特性影响。最后分析了偏轴对卡塞格伦光学天线系统性能的影响。

关键字：卡塞格伦天线； 镜体的热变形； 光束传输特性； 偏轴

Analysis of Cassegrain antenna thermal deformation and inclined optical axis

CHEN Zi-hao, WANG Xin-yang , WANG Jing

(College of Physics and electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A mathematical model was established to describe the influence which temperature gradient and thermal stress have on the thermal deformation of the lens surface and used to analyze the optical transmission characteristics of the Cassegrain optical antenna system in the thermal environment. And then ANSYS Software was used to draw the point spread function diagram and thermal deformation shift diagram in the x, y, z direction of thermal deformation of the lens. The influence which the thermal deformation of the lens surface has on the transmission characteristics of the beam was analyzed. Finally, the properties of the axis-off Cassgrain optical system were analyzed.

Key words: Cassegrain optical antenna; Thermal deformation; Transmission characteristics; Off-axis

0 引言

光学天线是当代空间光通信发展的重要组成部分，其成像质量和温度的变化有着密切的关系，温度变化最终会导致焦距的变化，降低图像的成像质量。同时，偏轴也会对相应的天线增益、天线耦合效率、通信距离等产生影响。本文对双曲型镜片在均匀温度分布条件下的热变形进行了理论研究，建立了简化的数学模型，并用 ANSYS 软件分析了卡塞格伦天线在

热变形时的传输特性，画出了镜体热变形时的点扩散函数图和在 x, y, z 方向的位移图。最后讨论了偏转角和功率衰减的关系。

1 天线的热变形对光束传输的影响

1.1 假设

(1) 由于镜片单元和固定圈的径向长度比光学

收稿日期：2010-10-02

作者简介：陈梓浩（1989-），女，电子科技大学物理电子学院电子信息科学与技术专业 2007 本科生

王心洋（1988-），女，电子科技大学物理电子学院电子信息科学与技术专业 2007 本科生

王婧（1988-），女，电子科技大学物理电子学院电子信息科学与技术专业 2007 本科生

镜片的径向长度小，可认为镜片的边缘温度在接触点和镜片单元的温度相等。

(2) 对单个镜片而言，仅仅考虑径向温度梯度和周围温度梯度。在镜片和镜片之间才考虑轴向温度。

(3) 用光学元件的热膨胀系数计算热变形的程度。

1.2 径向温度分布

卡塞格伦光学天线结构，如图 1 如示。本文设计的卡塞格伦天线参数是：主镜直径 150mm，厚度 35mm；次镜直径 30mm，厚度 10mm。

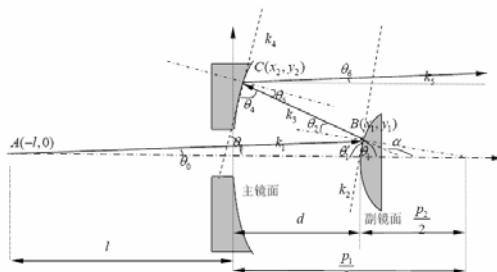


图 1 卡塞格伦光学天线结构图

由热传输理论，得到一个贝塞尔微分方程如下^[1]：

$$\left[\left(\frac{1}{d} \frac{dd(r)}{dr} + \frac{1}{r} \right) \frac{dT}{dr} - \frac{\alpha_T}{\lambda_T d} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dP_1}{dr} \right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{dP_2}{dr} \right)^2} \right) \right] T(r) + \frac{d^2 T}{dr^2} = - \frac{\alpha_T}{\lambda_T d} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{dP_1}{dr} \right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{dP_2}{dr} \right)^2} \right] T_u \quad (1)$$

在方程 (1) 中， λ_T 是镜片材料的热传导率， α_T 是镜片材料的热转移因子， T_u 是周围温度， $d(r)$ 是厚度方程 (2) :

$$d(r) = 20 \sqrt{1 + \frac{r^2}{2727}} \quad (2)$$

对玻璃镜片而言，偏微分 $\frac{dP_1(r)}{dr}$ ， $\frac{dP_2(r)}{dr}$ 和

$\frac{dd(r)}{dr}$ 等于 0。代入偏微分方程 (1)，可得

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{R} \frac{dT}{dr} - \frac{2\alpha_T}{\lambda_T d_0} T = - \frac{2\alpha_T}{\lambda_T d_0} T_u \quad (3)$$

这个方程是可积的，因此其解为

$$T(r) = T_0 + (T_0 - T_u) \cdot I_0 \sqrt{\frac{2\alpha_T}{\lambda_T d_0} r} \quad (4)$$

在上述公式中 T_0 是轴向温度， I_0 是零阶贝塞尔函数， T_u 是外界温度。将零阶贝塞尔函数展开之后，我们可以得到：

$$T(r) \approx T_0 + (T_0 - T_u) \left[\frac{1}{8} \frac{\alpha_T}{\lambda_T d_0} r^2 + \frac{1}{256} \left(\frac{\alpha_T}{\lambda_T d_0} \right) r^4 + \dots \right] \quad (5)$$

令 $\beta = \frac{(T_0 - T_u) \alpha_T}{8 \lambda_T d_0}$ ，所以径向温度梯度的近似表达式如下：

$$T(r) \approx T_0 + \beta r^2 \quad (6)$$

当 $r = r_1$ ， $\beta = \frac{T(r_1) - T_0}{r_1^2} = \frac{\Delta T(r_1)}{r_1^2}$ ，表明温度分布和半径的平方成线性关系的。

系数 β 可以由轴向和外界温度，热传导率 λ_T ，热转移因子 α_T 和透镜中心厚度来解出。实际上，这些参数是不容易确定的，因此 β 是由轴向和边缘的温差来解得：

$$\beta = \frac{\Delta T(r_1)}{r_1^2} \quad (7)$$

给定参考温度是 30°C，根据公式 (2)，温度变化和半径的关系如图 2 所示：

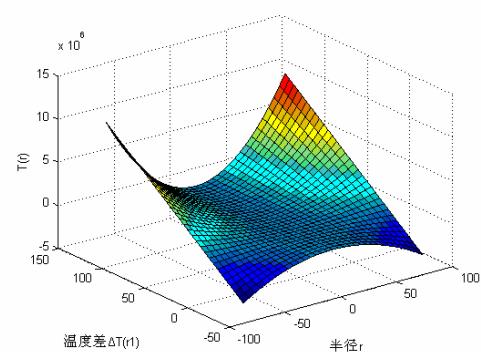


图 2 温度梯度分布的三维仿真曲线

1.3 光学元件的热变形建模

根据热弹性力学理论，镜体由于温度的改变而产

生的形变, 主要由三部分组成: 镜体材料温度升高而产生的自由热膨胀、边界固定后不能自由膨胀而引起的和材料的泊松比有关的形变、热应力而产生的形变。

当在光学元件中温度变化是一样的时, 光学元件热变形可以由以下方程解出:

$$D(r) = (1 + \alpha)d(r)$$

这个方程描述了镜片的尺寸变化; $d(r)$ 是光学元件的原始尺寸; $D(r)$ 是温度变化后的新尺寸, α 是镜片材料的线性热膨胀系数。曲率半径和透镜的厚度可以由这个方程算出。

1.4 应用实例

利用上文提到的数学模型分析卡塞格伦天线。天线模型如图3所示。

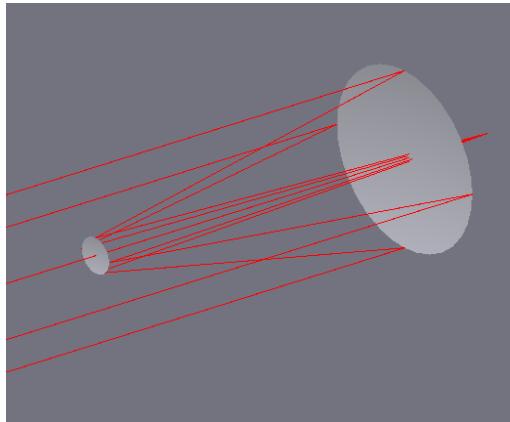


图3 卡塞格伦天线的模型仿真图

卡塞格伦天线采用主镜为抛物面、次镜为双曲面的最佳组合方式。主镜直径150mm, 厚度35mm; 次镜直径30mm, 厚度10mm。

考虑在热变形分析过程中所有的参数, 并分析了镜头的热变形, 用ANSYS对其仿真模拟, 变形结果如下图所示:

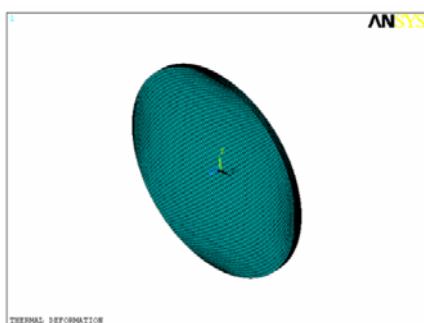


图4 镜头的有限元模型

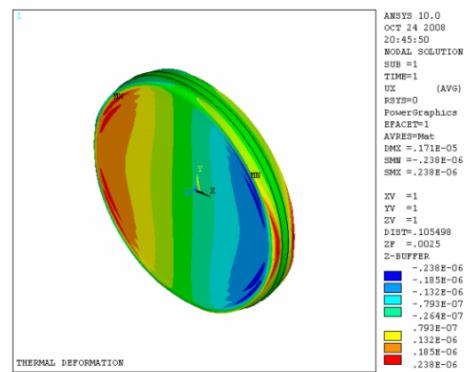


图5 温度增加100°C时镜体X方向的位移

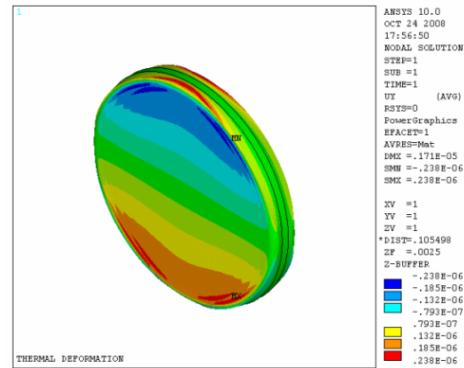


图6 温度增加100°C时镜体Y方向的位移

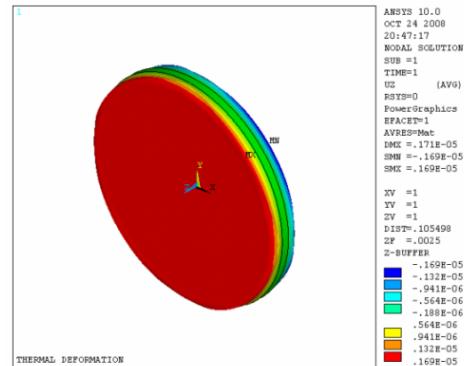


图7 温度增加100°C时镜体Z方向的位移

以常温(20°C)为起始温度、压圈法固定镜体为例, 分析了镜体随温度的升高而发生的形变。图4表示镜头的有限元模型, 图5、图6和图7分别表示温度增加100°C时镜体在X、Y、Z方向的位移。从图中可以看出, 镜体在轴向方向(Z方向)的变化, 对光束的传输影响最大。升温时, 天线系统的反射镜面向外鼓起, 当温度变为100°C时, 轴向方向(Z方向)的变形量为0.6μm。而当温度降低时, 天线系统的反射

镜面向内凹陷。

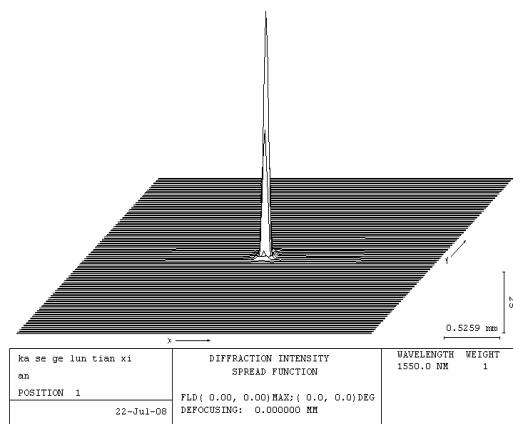


图 8 镜体变形前的天线系统的点扩散函数图

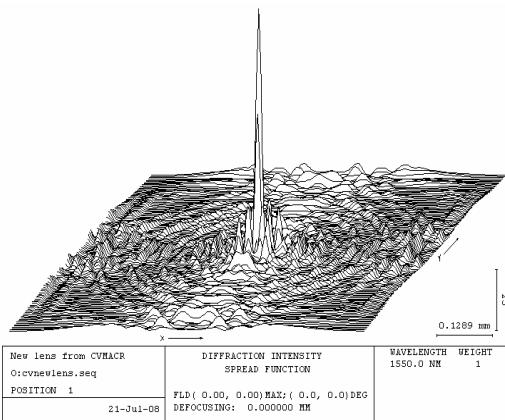


图 9 镜体变形后天线系统的点扩散函数图

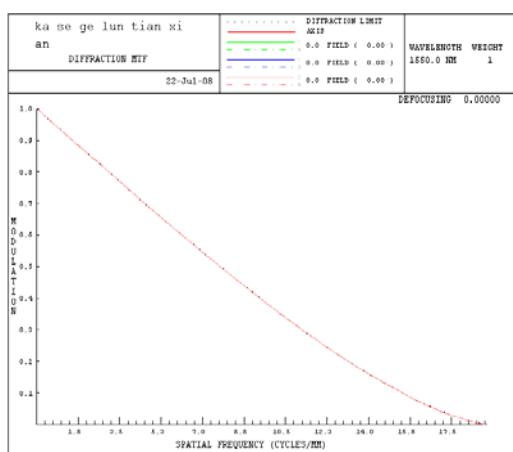


图10 镜体变形前天线系统的MTF分析图

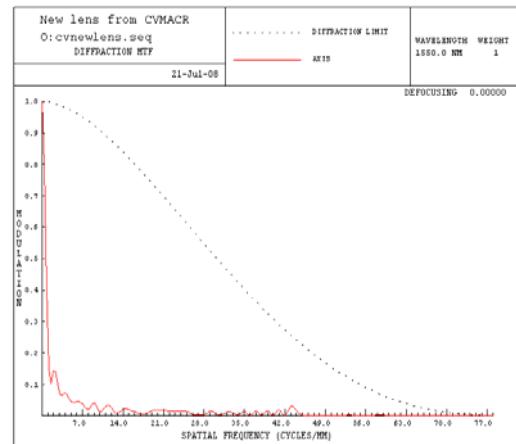


图11 镜体变形后天线系统的MTF分析图

图 8、图 9 分别描述了镜体变形前后天线的点扩散函数图。图 10、图 11 分别描述了镜体变形前后天线系统的 MTF 图，可以看出变形后 MTF 明显下降，这意味着径向温度梯度对光学系统的影响是非常严重的，仅使用无热技术不能完全消除这种影响，还需要使用热控制技术减小径向温度变化。图 8、图 10 表明镜体变形前，光束能量集中，发射光束发散角小，光线分布均匀。图 9、图 11 表明，镜体变形后，光束在卡塞格伦天线中传输时，天线系统的传输特性变差。相应地，卡塞格伦天线的效率发生了明显的变化，光束的传输达不到镜体温度变化前的理想值。本文设计的卡塞格伦天线采用了大量的反射镜面，所以镜面的热变形对光束的传输影响很大。

2 偏轴对光学天线性能的影响

本文采用几何光学法，对天线不同偏转角和相应的功率衰减 $= P_r / P$ 的关系进行了分析。设偏转角为 γ ，并设接收天线入口处与接收天线主镜的距离为 l ，根据光传输理论，通过接收天线后出射光斑的面积为图中两光斑的重叠部分。接收光斑中的阴影是由中心遮挡而形成，椭圆光斑为偏轴情形下发射天线发出的光斑在接收探测器上的投影，圆光斑是轴对准时接收探测器上所获得的光斑^[4]。图 12 为实验原理图。

设入射光束为高斯光束，波长 $\lambda=830 \times 10^{-12} \text{ mm}$ ，

$$E(z) = \frac{c}{\omega(z)} \exp(-\frac{r^2}{\omega^2(z)}) \exp\{-i[k(z + \frac{r^2}{2R}) - \arctan \frac{z}{f}]\}$$

则光束在横截面上的能量为：

$$|E(r)|^2 = \frac{c^2}{\omega^2(z)} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right)$$

$$|E(x,y)|^2 = \frac{c^2}{\omega^2(z)} \exp\left[-\frac{2(x^2+y^2)}{\omega^2(z)}\right]$$

发射的能量为：

$$P = \int_0^{2\pi} d\theta \int_b^a |E(r)|^2 r dr$$

图13表示功率衰减随偏转角变化的曲线。仿真结果表明：当偏转角逐渐变大时,探测器上接收到的信号功率会越来越小,当 γ 超过0.49时,探测器上就接收不到任何信号,也就无法进行通信。

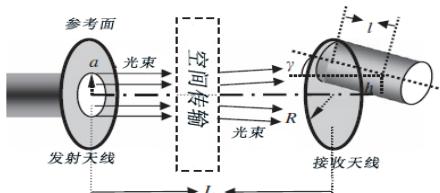


图 12 偏轴实验原理图

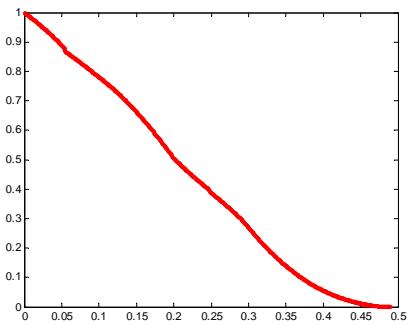


图 13 偏转角-功率衰减曲线

3 结 论

本文给出了用ANSYS软件绘制的镜体热变形时的点扩散函数图和在 x, y, z 方向的热变形位移图,由此分析了径向温度变化和热应力对卡塞格伦天线镜片形状的影响,可以得出镜体在轴向方向(z 方向)的变化对光束的传输影响最大。进一步讨论了天线的热变形对光束传输的影响。在实际应用时,应尽量减小由于温度变化对镜体产生的应力,以避免出现像差增大和天线镜面破裂等现象。本文也给出了偏转角-功率衰减曲线,随着偏转角 γ 的增加,功率衰减得很快。当 $\gamma=0.49$ 时,功率将衰减到零,也就无法进行通信。因此当光通信中光学平台实际工作时,需要通过检测功率衰减来判断出轴偏离程度,再调整控制系统使得捕获、跟踪、对准(ATP)系统能进行光轴的精确对准,从而提高系统的增益、耦合效率和增加对准精度,以确保通信的顺利进行。

参 考 文 献:

- [1] LI Lin, AN Lian-sheng. Theory and Application of Computer Aided Optical Design Application[M]. National Defense Industry Press, Beijing, 214-250 (2002)
- [2] Zhang Hua,Li Xiao-feng, Yang Wen-shu.Research on thermal distortion of mirror used for satellite-borne laser communication and its impact on optical system[J](张华,李晓峰, 杨文淑.星载激光通信光学反射镜镜面热变形及其对光学系统影响的研究[J].2008,4:30.)
- [3] Yang Hua-jun. Space optical communication systems and optical alignment of laser beam antenna design and implementation(杨华军.空间光通信系统中激光束准直与光学天线设计与实现.博士学位论文[D].成都:电子科技大学, 2007: 117—120)
- [4] Ran Ying-hua, Yang Hua-jun, Xu-Quan, Xie Kang, Huang Jing. Properties of Cassegrain optical antenna with inclined optical axis(冉英华,杨华军,徐权,谢康,黄金.卡塞格伦光学天线偏轴及性能分析[J].2009, 9)
- [5] Bernard J-Klein, John J-Degnan. Optical Antenna Gain. 1: Transmitting Antennas[J]. Applied Optics, 1974:2134-2141

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>