

镜面微振动时点扩散函数的仿真分析

薛博^{1,2,3}, 陈小梅^{1,2}, 毛冰晶^{1,2}, 倪国强^{1,2}

(1. 北京理工大学光电学院 北京 海淀区 100081; 2. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室 北京 海淀区 100081;
3. 中国空间技术研究院 北京 海淀区 100094)

【摘要】提出了一种高精度求解光学系统中镜面振动在曝光时间内形成的点扩散函数(PSF)的数值计算方法。传统方法计算镜面振动造成像点位移情况, 并仅由该值评估镜面振动时系统调制传递函数(MTF)下降情况。该方法忽略了光学系统镜面位置发生改变时其光学系统自身MTF也会同时变化的特性, 将导致误差产生。该误差在光学元件振幅较小时并不显著, 但随着振幅的加大, 该误差会变得不可忽略。该方法通过细分成像过程来计算每一个时刻的点扩散函数, 并将这些点扩散函数进行积分来消除该误差。该方法适用于计算任意角度入射的空间光线在经过一个不稳定的光学系统后形成的点扩散函数。

关键词 调制传递函数; 镜面微振动; 点扩散函数; 光线追迹

中图分类号 V447.3

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.026

Point Spread Function Simulation and Analysis when Optical Systems Encounter Micro-Vibration

XUE Bo^{1,2,3}, CHEN Xiao-mei^{1,2}, MAO Bing-jing^{1,2}, and NI Guo-qiang^{1,2}

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081;

2. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education of China,

Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081;

3. China Academy of Space Technology Haidian Beijing 100094)

Abstract This paper proposed a precise numerical method to calculate the point spread function (PSF) when optical systems encounter micro-vibration within a certain amount of exposure time. Conventional methods evaluate the modulation transfer function (MTF) degradation by using the image point displacement caused by micro-vibration. They ignore the change of MTF while the vibration is happening, which may cause errors if the amplitude of the vibration is large. The proposed method eliminates this error by integrating PSFs at each moment during the vibration. This method is well suited for computing the PSF of the spatial light propagating through an unstable optical system.

Key words MTF; optical surface micro-vibration; PSF; ray trace

随着对地观测卫星的分辨率越来越高, 其光学系统对振动越发敏感。目前国际上高分辨率对地观测卫星地面分辨率多为0.3~0.5 m, 如KH-11(0.3 m, 2001年)、Helios-2A(0.5 m, 2004年); 2005年美国发射的KH-12卫星分辨率高达0.1 m。高分辨率对整星光学系统的稳定性提出了很高的要求。1992年, 美国已开始部署高分辨率对地观测卫星, 同时有文献研究卫星姿态稳定度对成像质量的影响, 特别是对微振动导致成像模糊的机理进行了较为深入的研究。我国从2003年开始关注卫星平台微振动对成像质量的影像, 2009年成立了高分辨率对地观测系统

中的高精度实时运动成像基础研究项目^[1-5], 该领域的研究已经引起了广泛的重视。文献[6-7]提出, 星上器件微振动的频带很宽, 现有的隔振器件并不能完全消除星上机械装置传递到光学系统的振动。光学系统本身非常敏感, 镜面参数微小的变化, 都有可能对像空间发生巨大改变。因此, 研究光学系统内镜间振动对光学系统成像质量的影响有着非常重要的意义。

1 基于矢量追迹法的空间光线折射反射计算方法

光学系统镜面振动的表现形式可以分为偏心、

倾斜和镜间距离发生变化。由于这些变化是微小且快速的,所以需要通过成像积分时间内高频采样进行分析。传统方法^[8]在分析光学系统镜面的微振动时,通过计算像点在像面上的位移情况,并利用像点位移导致MTF下降公式^[2-3]来计算振动引入的 $MTF_{\text{vibration}}$,并计算出系统整体的MTF为:

$$MTF = MTF_{\text{vibration}} \times MTF_{\text{sys}} \quad (1)$$

一般地,当光学系统的镜面位置和倾角发生变化时,系统的MTF亦会发生变化。式(1)认为镜面位置发生变化时,光学系统的MTF为固定值,这样的假设与实际情况有较大出入。为了弥补该缺陷,本文采用一种在时域高频采样的方式进行大规模光线追迹的方法,用于计算当镜面偏心和倾斜时像面的点扩散函数(PSF),并将积分时间内所有时刻的PSF进行积分从而获得系统整体的PSF。本文在第3节计算了三反系统(three-mirror anastigmat, TMA)的次镜在子午方向上的偏心振动和倾斜时的系统点扩散函数,仿真结果表明将振动中的光学系统点扩散函数视为常量会带来较大的计算误差,通过本文提出的方法可消除该误差,使PSF及MTF值更加精确。

传统的光线分析理论将光学系统简化为理想系统,通过拉格朗日-亥姆霍兹不变式计算物点在像面的成像位置。但该方法仅对近轴球面光学系统较为准确,用于计算非球面光学系统轴外光线会产生较大误差。点扩散函数是由入瞳面各处光线集体作用的结果,如果轴外点的像方位置计算不准确便无法准确计算此时像点的PSF。为此,本文基于矢量光线追迹方法建立了对于非球面光学系统的任意光线追迹方法,对覆盖整个入瞳区域光线进行追迹,用于获得物点在像面的准确位置以及PSF。

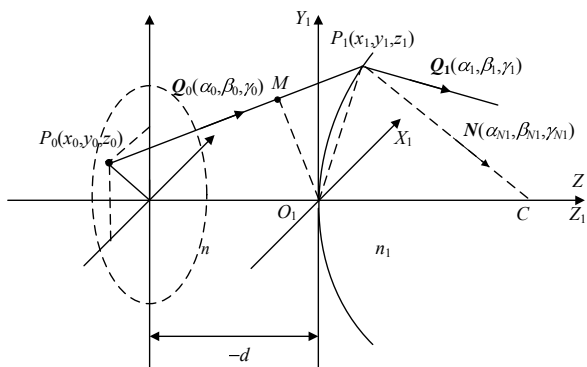


图1 光线追迹示意图

本文采用逐面追迹的方法对光线进行分析,以当前需要分析的镜面中心点为原点建立右手坐标系,其中X轴指向纸面内, Y轴由下至上, Z轴从左

至右。在进行光线追迹时,定义非球面镜面顶点为坐标原点,建立 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系如图1所示。

设入瞳中心与原点的距离为 d ,物方光线经过入瞳面上的点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$,入射光线方向用单位向量 $Q_0(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ 表示。入射光线与第一个面的交点为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$,折射光线为 $Q_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 。

则入射光可表示为:

$$\frac{x-x_0}{\alpha_0} = \frac{y-y_0}{\beta_0} = \frac{z-z_0}{\gamma_0} \quad (2)$$

光学镜面的半径为 r ,则其飞球面方程为:

$$F(x, y, z) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} - z = 0$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

式中, k 为曲率系数; c 为圆锥系数。式(2)和式(3)联立求解,利用数值方法可以求得光线到达该镜面的位置 (x_1, y_1, z_1) 。以 $F(x, y, z)$ 分别对3个自变量在 (x_1, y_1, z_1) 处求一阶偏导数,即得该点处的法线方向

$$N = \frac{\frac{\partial F}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial F}{\partial z} \mathbf{k}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}} =$$

$$\alpha_{N1} \mathbf{i} + \beta_{N1} \mathbf{j} + \gamma_{N1} \mathbf{k} \quad (4)$$

利用入射光线的向量和法线方向,可求得入射角 I_1 ,即:

$$\cos I_1 = |\alpha \alpha_{N1} + \beta \beta_{N1} + \gamma \gamma_{N1}| \quad (5)$$

利用折射定律求得折射角 I_1' ,其中 n 为入射介质折射率, n_1 为折射介质的折射率。

$$\cos I_1' = \sqrt{1 - \frac{n^2}{n_1^2} (1 - \cos^2 I_1)} \quad (6)$$

并获得参数 g_1 为:

$$g_1 = n_1 \cos I_1' - n \cos I_1 \quad (7)$$

则出射光线的方向 Q_1 为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{n}{n_1} \alpha + \frac{g_1}{n_1} \alpha_{N1} \\ \beta_1 = \frac{n}{n_1} \beta + \frac{g_1}{n_1} \beta_{N1} \\ \gamma_1 = \frac{n}{n_1} \gamma + \frac{g_1}{n_1} \gamma_{N1} \end{cases} \quad (8)$$

考虑TMA为反射系统,则令 $n=1$, $n_1=-1$ 即可带入计算。

2 镜面振动的光线追迹方法

光学系统一般由多个光学元件组成, 经过优化设计后, 能在像面获得较好的成像质量, 但同时光学系统内存在蝴蝶效应, 即某一个光学元件的参数发生一些微小的改变, 就会对最终的成像质量产生巨大的影响。

由于卫星平台存在多种机械运动部件, 这些部件的运行会产生振动并且传递到光学系统中, 导致光学系统内部镜面产生位移以及倾斜。镜面的变化破坏了光学系统内元部件的关系, 并直接导致光学系统成像特性发生变化, 因此对于同一方向的一组入射覆盖入瞳面的光线, 每一个不同的时刻, 其主光线在像面上的位置不同, 同时该组光线形成的PSF也会发生变化。故有必要分析每一个时刻的光学系统的成像特性。

2.1 镜面偏心振动光线追迹方法

由于振动, 造成了镜面在 X 或 Y 方向上的位置发生微小变化称为镜面的偏心振动。考虑计算的简便性, 定义未偏心的镜面顶点位置为 O_1 , 以该点为中心建立 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系, 定义偏心移动后的镜面顶点的位置为 O_1' , 以此点为中心建立 $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ 坐标系。定义镜面在 X 方向上偏心移动 δx , 在 Y 方向上偏心移动 δy , 在 Z 方向上偏心移动为 δz 。则该曲面入射光线位置 $P(x, y, z)$ 在 $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ 坐标系下的坐标为 $P'(x', y', z')$, 其中 $x' = x - \delta x$, $y' = y - \delta y$, $z' = z - \delta z$; 入射方向矢量 $Q(\alpha, \beta, \gamma)$ 在 $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ 保持不变, 如图2所示。

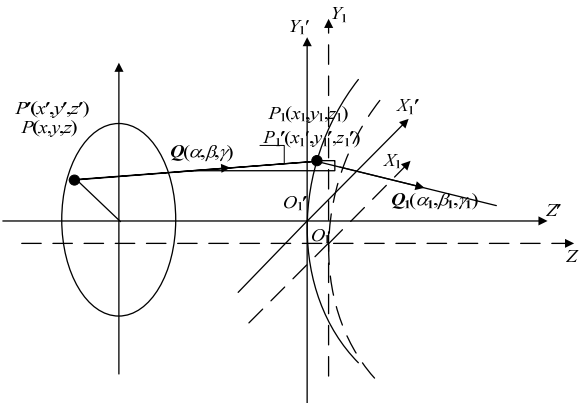


图2 镜面偏心位移坐标变换示意图

通过第1节的方法, 可以计算获得在 $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ 坐标系下的出射光线 $P_1'(x_1', y_1', z_1')$, 出射光线的方向矢量 $Q_1'(\alpha_1', \beta_1', \gamma_1')$ 。将该坐标变换到 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系下获得 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, 其中, $x_1 = x_1' + \delta_x$, $y_1 =$

$y_1' + \delta_y$, $z_1 = z_1' + \delta_z$ 。 P_1-Q_1 即为下一个面的入射光线。

2.2 镜面倾斜振动光线追踪方法

镜面倾斜光线追迹示意图如图3所示。

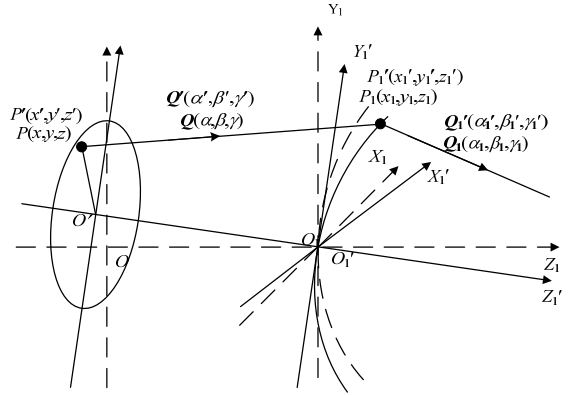


图3 镜面倾斜光线追迹示意图

本文定义坐标旋转为联动轴旋转, 依次绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转。定义以右手螺旋为正方向。 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系旋转后为 $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$, 其中 O_1 与 O_1' 为同一个点。则入射光线 $P-Q$ 在 $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ 坐标系下的计算公式为:

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = RP = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$Q' = \begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix} = RQ = R \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

坐标系进行旋转后, 由式(9)获得在 $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ 坐标系 $P'-Q'$, 此时运算状态回到了第1节的状态, 即可由式(2)~式(6)获得出射光线 $P_1'-Q_1'$, 继续将 $P_1'-Q_1'$ 转换到 $O_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系下, 由于旋转矩阵的特性, $R^{-1} = R^T$, 由式(8)即可获得出射光线 P_1-Q_1 。

$$\begin{cases} P_1 = R^{-1}P_1' = R^T P_1' \\ Q_1 = R^{-1}Q_1' = R^T Q_1' \end{cases} \quad (10)$$

3 镜面振动仿真

3.1 镜面振动仿真过程

成像过程中, 光学系统内元件的振动可以由6

个自由度上若干余弦振动组合而成, 每个镜面的偏心和倾斜可表示为:

$$\begin{cases} \delta_x = \sum_{n=1}^N A_{xn} \cos(2\pi f_{xn} t + \varphi_{xn}) + \delta_{x0} \\ \delta_y = \sum_{n=1}^N A_{yn} \cos(2\pi f_{yn} t + \varphi_{yn}) + \delta_{y0} \\ \delta_z = \sum_{n=1}^N A_{zn} \cos(2\pi f_{zn} t + \varphi_{zn}) + \delta_{z0} \\ \theta_x = \sum_{n=1}^N \Theta_{xn} \cos(2\pi f_{\theta xn} t + \varphi_{\theta xn}) + \Theta_{x0} \\ \theta_y = \sum_{n=1}^N \Theta_{yn} \cos(2\pi f_{\theta yn} t + \varphi_{\theta yn}) + \Theta_{y0} \\ \theta_z = \sum_{n=1}^N \Theta_{zn} \cos(2\pi f_{\theta zn} t + \varphi_{\theta zn}) + \Theta_{z0} \end{cases} \quad (11)$$

式中, δ_x 、 δ_y 、 δ_z 为镜面在 X 、 Y 、 Z 轴上的位移偏心; θ_x 、 θ_y 、 θ_z 为镜面绕 X 、 Y 、 Z 轴的倾斜角度; A 为偏心位移振动幅度; Θ 为绕轴倾斜振动幅度; f 为振动频率; φ 为成像起始时刻振动初始相位。本文在计算镜面振动时, 坐标变换的顺序为 δ_x 、 δ_y 、 δ_z 、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z , 逆变换的顺序相反。

成像期间每一个特定时刻 t , 以某角度入射的覆盖整个入瞳的平行光经过该时刻的光学系统后在像面形成一个点扩散函数 $PSF(t)$, $PSF(t)$ 的中心为通过入瞳中心位置的光线的像点。对整个成像过程的 $PSF(t)$ 进行积分, 即可获得在镜面振动情况下最终 PSF 为:

$$PSF = \int_0^T PSF(t) dt \quad (12)$$

3.2 镜面振动仿真实验流程

在成像过程中, 由于振动的存在, 导致光学系统内光学元件的关系在不断改变, 文献[8]研究分析了外部作用下星上TMA光学系统内镜面振动的情况。本文基于该数据, 利用图4所示的TMA光学系统进行分析, 该光学系统焦距为5 000 mm。

分析两组入射光线, 第一组为正入射光线, 其向量为 $\mathbf{Q}_A(0, 0, 1)$, 以下简称为 A 光线; 第二组为与 X 轴夹角为 0.1° 并与 Y 轴夹角为 0.1° 的倾斜空间光线, 其向量为 $\mathbf{Q}_B(0.001745, 0.001745, 0.99997)$, 以下简称为 B 光线。设置两类不同的振动于光学系统的次镜, 其振幅如表1所示。

设像面传感器尺寸为 $5 \mu\text{m}$, 当对地观测卫星轨道高度为500 km, 此时星下点分辨率为0.5 m。考虑大部分对地观测卫星成像积分时间为几毫秒到几十毫秒之间(受速高比及TDICCD积分级数影像总体成

像积分时间的影响), 将成像积分时间设置为15.504 ms(该曝光时间与次镜振动周期相等), 每0.001 ms进行镜面振动离散采样。在一个周期内共有15 500个光学系统状态。在每一时刻对入瞳处空间光线位置进行均分, 设置 128×128 采样点, 考虑该光学系统入瞳面直径为500 mm, 每个采样点的间隔为3.9 mm, 每个光学系统状态追踪16 384根光线, 由这些光线在像面的位置构造 t 时刻的光学系统的 PSF 。最后累加生成的15 500个 PSF , 即可获得当前振动状态条件下的 MTF 。

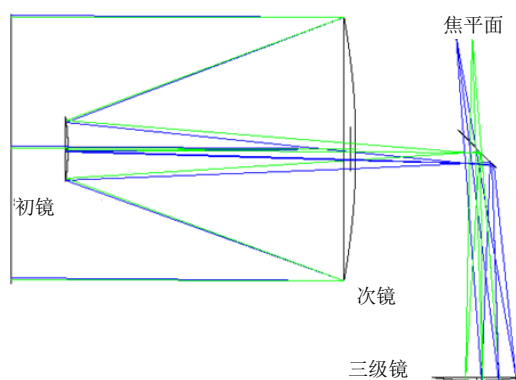


图4 TMA系统

表1 振动参数表

振动类型	频率/Hz	振幅
Y轴上偏心振动	64.5	20 μm
绕X轴倾斜振动	64.5	$1 \times 10^{-4}^\circ$

PSF仿真计算过程为:

- 1) 建立 t 时刻带有振动偏心及倾斜的光学系统。
- 2) 设置主光线为 $P_0(0, 0, -d) - \mathbf{Q}_0(\alpha, \beta, \gamma)$ 。主光线经过光学系统逐表面后到达像面位置为 $P_1(x_0, y_0, z_1)$, 以此点为 PSF 的中心。
- 3) 分别追踪入瞳面的每一根光线, 记录其在相面的位置, 获得一组点集。
- 4) 将点集按照分布集中程度, 计算出点扩散函数, 即为该光学系统在某一扰动状态下的 PSF 。
- 5) 重复步骤1)~步骤4)直到获得所有时刻的 PSF 将所得的点扩散函数相加, 即可获得系统最终的 PSF 。

3.2 仿真结果

当次镜处于不同状态时, 利用逐面光线追迹的方法可得到 A 光线以及 B 光线的 PSF , 如图5所示。当次镜没有位移时, A 光线的点扩散函数尺寸为 3×3 像元, 中心像元的归一化能量为0.990 5。当次镜偏移20 μm 时, A 光线点扩散函数的尺寸为 7×7 像元, 中心像元归一化能量为0.284 9, 中心点下方一个像元能量为0.462 2; B 光线的点扩散函数的尺寸为 7×7 像元, 中心像元归一化能量为0.276 7, 中心点下方一

个像元能量为0.462 0。当次镜倾斜 10^{-4} °时, A 光线点扩散函数的尺寸为 3×3 像元, 中心像元归一化能量为0.987 9; B 光线的点扩散函数的尺寸为 3×3 像元, 中心像元归一化能量为0.988 9。

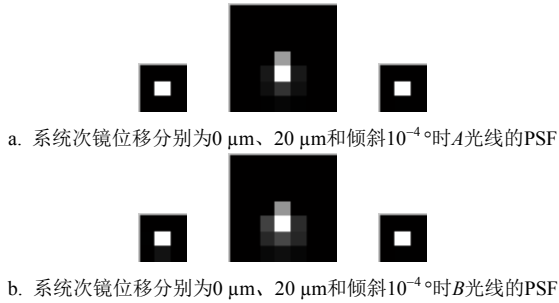


图5 系统中次镜偏移到最大位置时的PSF

当次镜偏心 $20 \mu\text{m}$ 时, A 光线和 B 光线的点扩散函数的形态发生较大的变化; 当次镜倾斜 10^{-4} °时, 其点扩散函数没有发生较大的变化。点扩散函数改变的同时, 像点位置发生了较为明显的变化, 表2列出了次镜不同状态时的像点位置以及变化。次镜沿着 Y 轴偏心移动 $20 \mu\text{m}$ 时, A 光线和 B 光线的像点在 X 轴上几乎没有发生位移, Y 轴上的位移约为 $113.5 \mu\text{m}$ 。次镜沿 X 轴倾斜 1×10^{-4} °时, 像点在 X 轴的位置亦保持稳定, 在 Y 轴上的位移约 $2.5 \mu\text{m}$ 。

表2 次镜不同状态时的像点位置 单位: mm

	次镜在 原始位置	次镜沿 Y 轴 移动 $20 \mu\text{m}$	次镜沿 X 轴 倾斜 10^{-4} °
A 光线位置	$x: 0$ $y: 0$	$x: 0$ $y: 0.113\ 542$	$x: 0$ $y: 0.002\ 504$
B 光线位置	$x: -8.727\ 588$ $y: -8.727\ 588$	$x: -8.727\ 560$ $y: -8.613\ 994$	$x: -8.727\ 588$ $y: -8.725\ 083$
A 光线像点位移	N/A	$x: 0$ $y: 0.113\ 542$	$x: 0$ $y: 0.002\ 504$
B 光线像点位移	N/A	$x: 0.000\ 028$ $y: 0.113\ 594$	$x: 0$ $y: 0.002\ 505$

图5仅为单一时刻的PSF, 如果要计算整个积分时间内振动造成的点扩散函数, 则需要将所有时刻的点扩散函数进行叠加, 利用式(9)即可求得振动时系统的点扩散函数, 如图6所示。

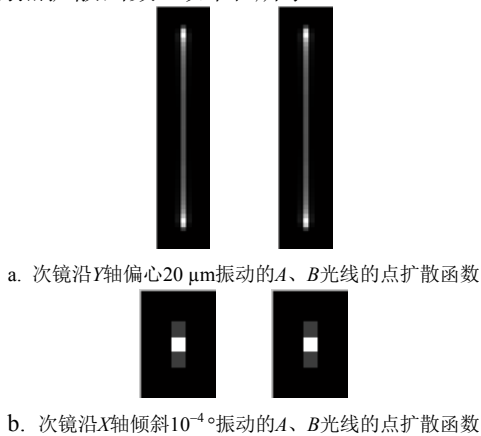
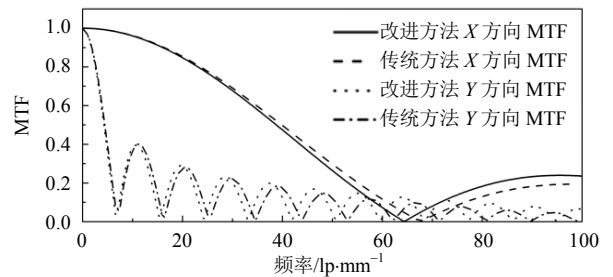


图6 通过本文方法计算出的点扩散函数

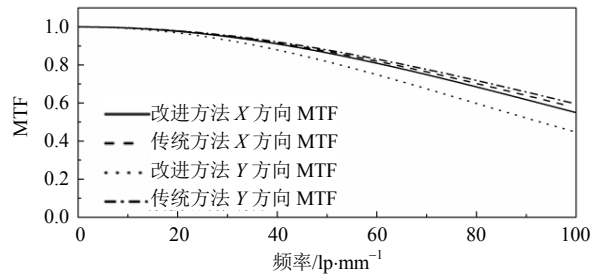
由图可知, 当次镜发生 $20 \mu\text{m}$ 的偏心振动时, 系统的点扩散函数尺寸达到了 9×55 像元, 其像点在 Y 方向的移动范围约 $230 \mu\text{m}$, 相当于 $20 \mu\text{m}$ 的振幅放大了约6倍, 能量分布呈现两端高中心低的趋势。当次镜发生 1×10^{-4} °的倾斜时, 点扩散函数尺寸为 5×7 像元, 其像点在 Y 方向的移动范围约 $5 \mu\text{m}$, 大致为一个像素的尺寸, 所以此时点扩散函数的能量仍然集中在中心区域, 未呈现能量向两端分布的效果。在后续实验中, 随着倾斜程度增大, PSF仍然会表现出在两端分布的趋势。

3.3 数据分析

MTF为光学系统性能考量的关键指标。数据分析采用刃边法^[9-10]进行分析。利用3.2节计算所得PSF, 与标准刃边图像进行卷积, 测得 X 方向与 Y 方向的MTF并进行比较。考虑到 A 光线与 B 光线在MTF表现上差异不大, 这里只给出 B 光线像点的MTF数据, 如图7所示。



a. 次镜沿 Y 轴偏心 $20 \mu\text{m}$ 振动的 B 光线的MTF



b. 次镜沿 X 轴倾斜 10^{-4} °振动的 B 光线的MTF

图7 B 光线像点的MTF数据

由MTF曲线可知, 改进方法计算所得MTF低于传统方法的MTF, 下降幅度达到了0.1。产生该差异的原因为: 光学系统处于理想状态时, 其PSF也是能量集中程度最好的状态; 当光学元件受到扰动后, 像点的位置发生变化的同时, 其PSF也会相应降低, 即光学系统MTF会随之动态降低。传统方法计算时仅考虑了像点位移而未考虑光学系统MTF降低的情况, 故获得的MTF曲线要高于改进方法。

依照文献[8]的TMA系统次镜振动数据, 系统次镜发生偏心振动时, 像点位移幅度将该振动幅度放

大了若干倍,从而导致了MTF下降非常剧烈;镜面倾斜带来的像点位移并未带来明显的位置变化,故MTF依然保持了较好的水平。因此在光学系统元部件隔振设计时需要将元部件的偏心扰动控制在一个较低的水平。

4 结 论

本文提出了一种基于光线追踪的光学系统镜面微振动导致PSF变化的高精度数值仿真方法,该方法可以计算出光学系统元件在不同的振动条件下的PSF状态。与传统的点扩散函数卷积分析方法相比,本文精确考虑光学元件在每个时刻的位置,并在此基础上通过光线追迹的方法获得了像点的所在位置和PSF,最终通过叠加PSF的方式获得了精确的点扩散函数。该方法比传统方法提高了计算精度。

通过仿真实验,发现原有的点扩散函数卷积方法适用于镜面振动造成的像点位移较小的情况,否则会产生较大的误差。考虑到目前星上成像传感器的像元尺寸越来越小,对振动成像仿真系统精度要求越来越高,故本文提出的仿真计算方法更加适用于现有及未来的星上高分辨率光学系统。

参 考 文 献

- [1] 徐鹏, 黄长宁, 王涌天, 等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 259-263.
XU Peng, HUANG Chang-ning, WANG Yong-tian, et al. Modulation transfer function in push-broom camera limits resulting from mechanical vibration[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 259-263.
- [2] HADER O, FISHER M, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: Numerical calculation of modulation transfer function[J]. Optical Engineering, 1992, 31(3): 581-589.
- [3] RODOLER S, HADER O, FISHER M, et al. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part 2: Experiment[J]. Optical Engineering, 1992, 30(5): 577-588.
- [4] HADER O, DROR I, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: Real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification[J]. Optical Engineering, 1994, 33(2): 566-578.
- [5] 徐鹏. 航天光学遥感器的系统仿真技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006
XU Peng. Study on system simulation technologies for space-borne optical remote sensors[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006.
- [6] 张振华, 杨雷, 庞世伟. 高精度航天器微振动力学环境分析[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 528-534.
ZHANG Zheng-hua, YANG Lei, PANG Shi-wei. Jitter environment analysis for micro-precision spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 528-534.
- [7] 庞世伟, 杨雷, 曲广吉. 高精度航天器微振动建模与评估技术最近进展[J]. 强度与环境, 2007, 34(6): 1-9.
PANG Shi-wei, YANG Lei, QU Guang-ji. New development of micro-vibration integrated modeling and assessment technology for high performance spacecraft[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(6): 1-9.
- [8] 张博文, 王小勇, 胡永力. 微振动对高分辨率空间相机成像影响的集成分析[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(2): 60-66.
ZHANG Bo-wen, WANG Xiao-yong, HU Yong-li. Integrated analysis on effect of micro-vibration on high resolution space camera imaging[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(2): 60-66.
- [9] International Organization for Standardization. ISO 12233:2000, Photography-Electric Still Picture Camera-Resolution Measurements[S]. 2000.
- [10] 赵占平, 付兴科, 黄巧林, 等. 基于刃边法的航天光学遥感器在轨MTF测试研究[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(2): 37-43.
ZHAO Zhan-ping, FU Xing-ke, HUANG Qiao-lin. On orbit MTF test research of remote sensors based on knife-edge method[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(2): 37-43.

编辑 漆蓉