

文章编号 1004-924X(2011)09-2146-08

空间相机的颤振成像调制传递函数及仿真实验

张 影*

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:为实现对卫星平台力学环境的合理约束,研究了空间相机颤振与成像调制传递函数(MTF)下降的关系。通过理论分析,建立了基于统计矩的颤振传递函数的数学模型,实现了在特定函数振动和已知振动曲线情况下对 MTF 下降曲线的计算。针对某空间相机,利用 MATLAB 软件的图形用户接口(GUI)编制了颤振成像 MTF 计算软件,计算了在有随机噪声的正弦型振动情况下不同振动幅值和频率对应的 MTF 值,得出该相机对于平台颤振的要求为:在 0.04 ms 积分时间内其振动角幅值小于 0.05",并避免相机产生 200 Hz 以上的振动。通过半物理仿真实验,对非函数形式的任意振动导致的传递函数下降进行深入分析,在图像的像质退化与振动传递函数之间建立了联系。用图像分析的方法计算了传递函数,结果与数学模型计算得到的传递函数趋势一致。

关键词:空间相机;颤振;调制传递函数;图像分析

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.2146

Imaging MTF of space camera under vibration and simulation

ZHANG Ying*

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhang ying5582366@sina.com

Abstract: The relationship between the vibration of a space camera and its Modulate Transfer Function (MTF) degeneration is investigated. A suitable limitation for a satellite platform is developed through this research. Mathematical modeling of a vibrating MTF is calculated based on a vibration moment method. The MTF curve can be deduced from the vibration functions or curves. The vibrating MTF calculations uses Graphic User Interface (GUI) to develop an software for some space cameras. MTF values under sinusoidal vibrations contain random noise and are calculated with different amplitudes and frequencies. Requirements of the satellite platform vibration is that the angle amplitude of vibration must be less than 0.05", and the vibration frequency should not be more than 200 Hz. MTF degeneration caused by random vibration is analyzed by simulation to relate image quality degeneration with MTF vibration. Image analysis for the MTF shows good agreements with the MTF calculated by the vibration model.

Key words: space camera; vibration; Modulation Transfer Function(MTF); image analysis

1 引言

随着空间相机的分辨率的提高和焦距的增长,对卫星平台角振动环境敏感程度的要求越来越高,由此深入研究相机振动与成像调制传递函数(MTF)下降的关系,从而对平台环境进行合理约束十分必要。

传递函数链理论表明,空间相机成像过程中振动的MTF因子具有可单独分离的特性。研制一般成像设备时,多采用正切函数描述低频振动引入的MTF,利用贝塞尔函数描述随机振动MTF^[1];但对安装于卫星平台的空间相机,由于其振动形式非常复杂,难以用单一函数精确表示其MTF的下降。

本文利用统计矩原理建立了振动成像的数学模型,利用振动数据或函数,精确计算得到了理论上的振动MTF。针对某空间相机编制了颤振MTF计算软件,得出了在不影响像质条件下,该相机对颤振的环境要求。在此基础上进行了探讨性的仿真实验研究,并对实验得到的刀口图像进行了分析,在振动形式与图像退化之间建立了直接联系。

2 空间相机颤振特点

空间相机振动的频谱特性取决于卫星平台空间环境的物理性质和其进行的特定操作^[2-5]。振源分为两种:卫星刚体运动引起的低频振动以及卫星的运载舱、有效载荷、姿态控制部件的操作引起的中频到高频的振动。例如由于太阳帆板的运动引起的振动一般属于低频振动,而飞轮或控制力矩陀螺的动不平衡引起的振动一般属于高频。

当振动的频率和幅值达到某一临界值,就会变得发散,从而发生颤振。颤振是一种很复杂的物理现象。从能量观点来讲,颤振是由运动产生的非正常力做正功而引起的。对于卫星平台,当扰动引起的卫星的颤振可能是某个部件的颤振,也可能是几个部件的耦合颤振,也可能是整个卫星的颤振。

3 理论推导

3.1 颤振传递函数的数学模型

光学系统对正弦物体成像时,物体可以看作是由无限多狭缝组合而成的,狭缝的宽度趋于零。振动造成的像移引起每一个狭缝所成的像能量分布发生扩散,即形成线扩散函数^[6]。从数学意义上讲,由亮度呈正弦分布的物体形成的无限多线扩散函数的迭加,是一种卷积计算。同理,光学系统的MTF也可以用线扩散函数的傅里叶变换来表示:

$$OTF(\omega) = F[LSF(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} LSF(x) \exp(-j\omega x) dx, \quad (1)$$

首先对一维的情况进行分析。对于像移而言,图像的线扩散函数即是运动的概率密度函数,因此,可用运动的概率密度函数对线扩散函数进行置换。由于线扩散函数LSF在有限域内非零,并可积分,因此传递函数可解析,可展开为泰勒级数的形式^[7]:

$$OTF(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left. \frac{\partial^n OTF(\omega)}{\partial \omega^n} \right|_{\omega=0} \omega^n, \quad (2)$$

由式(1),光学MTF在空间频率为0处的n阶偏导可表示为:

$$\left. \frac{\partial^n OTF(\omega)}{\partial \omega^n} \right|_{\omega=0} = \frac{\partial^n}{\partial \omega^n} \int_{-\infty}^{\infty} LSF(x) \exp(-j\omega x) dx \Big|_{\omega=0} = (-j)^n \int_{-\infty}^{\infty} x^n LSF(x) dx. \quad (3)$$

由于线扩散函数为运动的概率密度函数,因此可用运动的统计矩表示线扩散函数:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^n LSF(x) dx = E(x^n) = m_n, \quad (4)$$

式中 m_n 表示运动函数的n阶矩,将 m_n 用在时间 t_x 至 t_e 内的运动函数 $x(t)$ 表示:

$$m_n^x = E(x^n) = \int_{-\infty}^{\infty} x^n(t) f(t) dt = \frac{1}{t_e} \int_{t_x}^{t_x+t_e} x^n(t) dt, \quad (5)$$

其中, $f(t) = 1/t_e$,为时间的概率密度。综合式(2)、(3)、(5),得到

$$OTF(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m_n}{n!} (-j\omega)^n, \quad (6)$$

这样使光学 OTF 与运动函数建立了联系。

对于可用解析式表达的运动,很容易由式(5)求得各阶的统计矩。对于无法用解析式表达的运动,如无规律颤振等,需要对运动进行离散点采样。根据概率论可知:若曝光时间 t_e 内,得到运动的采样序列:

$$\{x_i\} \quad (i=1,2,3,\dots,S)$$

则运动的 N 阶统计矩可由下式进行计算:

$$m_n^x = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S x_i^n, \quad (7)$$

因此,将式(6)转换为

$$OTF(\omega) \approx \sum_{n=0}^N \frac{m_n}{n!} (-j\omega)^n, \quad (8)$$

求得各阶统计矩后,便可以利用式(8)求得光学传递函数。

3.2 传递函数的分离

根据空间相机动态成像链理论及 MTF 的定义,可知在振动条件下,得到图像的 MTF_i 可表示为振动的 MTF_v 与相机静态 MTF_c 的乘积,即:

$$MTF_i = MTF_v \times MTF_c,$$

因此,可以推出:

$$MTF_v = MTF_i / MTF_c.$$

在无振动的条件下,利用刀口像分析的结果作为相机的 MTF_c ,振动条件下刀口像分析的结果作为 MTF_i ,就可以用图像分析方法分离出振动带来的 MTF 下降。

3.3 二维传递函数的计算

前文对 MTF 的分析都是一维的,但实际上,成像系统的成像面是二维的,一般在复杂姿态因素影响下像移引起的空间相机 MTF 下降按沿轨和垂轨分为两个方向,因此,有必要将 MTF 进行二维表示。

由线扩散函数(LSF)与点扩散函数(PSF)的关系可知:

$$\begin{cases} LSF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x,y) dy \\ LSF(y) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x,y) dx \end{cases}. \quad (9)$$

根据概率论的边缘分布定义, $LSF(x)$ 和

$LSF(y)$ 分别为 (x,y) 关于 x 和关于 y 的边缘概率密度,且有:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x,y) dx dy &= \int_{-\infty}^{\infty} LSF(x) dx = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} LSF(y) dy = 1. \end{aligned} \quad (10)$$

由于上述关系的存在,因此一维的振动 MTF 计算可以很方便的推广到二维。将式(1)中的线扩散函数 LSF 改写为点扩散函数,可以得到二维的光学 MTF 表达式:

$$OTF(f_x, f_y) = F[PSF(x,y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x,y) \exp[-2\pi j(f_x x + f_y y)] dx dy. \quad (11)$$

采用跟 2.1 节类似的方式进行推导,利用多重泰勒级数展开并将上式代入,其偏微分项同样可以表示为与 LSF(即运动的概率密度函数)有关的表达式,从而由运动统计矩表示二维振动光学 MTF。受篇幅所限,本文不具体给出二维的振动光学 MTF 的推导过程,仅以线性运动引起的像移为例,说明二维 MTF 的计算。在线性像移情况下,设 CCD 像元尺寸 $a=8.75 \mu\text{m}$,积分级数 $M=96$ 级,在偏流角(引起垂直轨道的像移)为 $18'$,速度匹配(引起)为 0.5%时,计算得到二维 MTF 如图 1 所示。

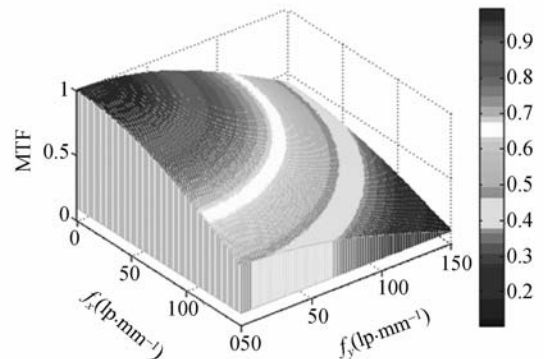


图 1 空间相机的二维像移 MTF

Fig. 1 2D MTF of space camera

4 空间相机的颤振 MTF 计算软件

通过 MTF 方法对颤振引起的某长焦距空间

光学相机像质退化进行了研究。利用上一节算法,使用 MATLAB 软件的 GUI(图形用户接口),编制的计算软件如图 2 所示。

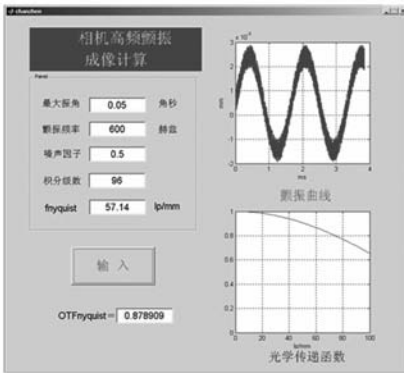


图 2 空间相机颤振成像 MTF 计算软件

Fig. 2 MTF calculation software of space camera imaging during vibration

根据上一节的论述,一维振动对 MTF 的影响可以推广至二维,因此,在数学仿真分析中,可使用一维情况作为典型,讨论颤振对 MTF 的影响,

由于缺少平台动力学特性、结构动力特性两方面的基础数据,因此使用数学手段简单构造颤振函数,使用正弦函数作为基底构造一个颤振函数为:

$$A(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} T(t)\right) + N(t), \quad (12)$$

其中: A 为峰值, T_0 为周期, $T(t)$ 为振动时刻, $N(t)$ 为随机噪声。

该相机行转移时间非常短,仅为 0.04 ms,当使用 96 级积分时曝光时间也仅有 $0.04 \times 96 = 3.84$ ms,因此,频率较低的振动引起像点的线性移动,可使用传统的 SINC 函数法计算 MTF 的下降,而频率较高时,需要由前述统计矩方法进行处理。通过对振动进行密集采样,可获得像点分布的 N 阶统计矩,与 N 阶泰勒级数相对应;当 N 大于 20 时,可较精确地计算出 100 lp/mm 以内的传递函数值。该相机在 96 级 TDICCD 积分时,颤振引起的 Nyquist 频率 57.14 lp/mm 处的 MTF 计算结果如表 1 所示。

分析此表可以得出,当该相机拍照期间振动的振角大于 $0.05''$ 时,MTF 下降明显;振动的频

率越高,对像质影响越严重;在振角较大和频率较高的情况下,像质受到的影响最大。经综合误差分析,认为该相机对于平台颤振提出的指标要求为:0.04 ms 内振角 $< 0.05''$,并有效隔除 200 Hz 以上的振动。

表 1 颤振 MTF 计算结果

Tab. 1 Result of MTF for vibrating

最大振角($''$)	f/Hz			
	100	200	400	600
0.02	0.996	0.981	0.982	0.980
0.05	0.976	0.883	0.890	0.877
0.10	0.907	0.590	0.610	0.561
0.15	0.803	0.269	0.298	0.181
0.20	0.679	0.260	0.235	0.193

最大振角($''$)	f/Hz			
	800	10^3	10^4	10^5
0.02	0.980	0.980	0.980	0.980
0.05	0.881	0.876	0.878	0.876
0.10	0.570	0.552	0.560	0.560
0.15	0.184	0.152	0.159	0.166
0.20	0.146	0.187	0.165	0.163

5 半物理仿真实验

5.1 实验搭建

通过前文的推导和计算可以得知,只要知道了振动的数学描述或者通过采样得到了成像期间的振动曲线,就可以计算得到由振动环节引入的传递函数。

通过半物理仿真实验,对非函数形式的振动导致的 MTF 下降进行了进一步研究。使用一维情况对 MTF 进行讨论,其目的是获得振动图像的同时记录光学系统的振动采样,将图像的像质退化与通过振动 MTF 数学模型得到的振动 MTF 进行对比。

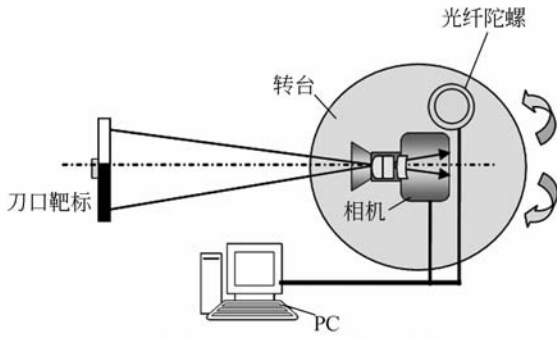
实验原理如图 3(a)所示,将测试相机和光纤陀螺放置在同一个转台上,测试相机对一定距离外的刀口靶标成像,在测试相机曝光的同时,转台在水平方向来回振动,由光纤陀螺记录转台的角速度,通过串口送入计算机处理,便可得到角度随时间变化的振动曲线。相机、光纤陀螺和转台均连接到 PC 进行同步控制和数据采集。

振动成像仿真测试实验的现场照片如图 3

(b)所示。装置的主要指标如下：

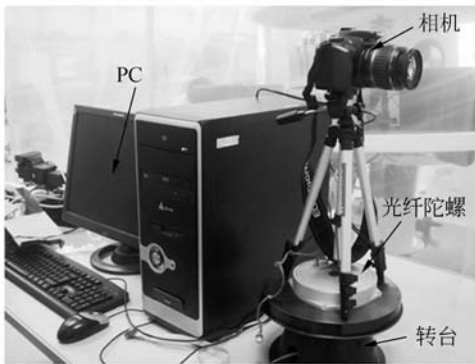
- (1) 镜头焦距:55 mm;
- (2) 相对孔径:1/20;
- (3) 曝光时间:1 s;
- (4) 像元尺寸:5.7 μm ;
- (5) 光纤陀螺采样间隔:3.33 ms。

使用 1 s 的较长曝光时间,模拟正常成像时高频振动对成像的影响。假设正常成像使用 1 ms 的快门速度,那么仿真实验的振动就等效于 100 Hz 频率振动对正常成像的影响。



(a) 实验原理

(a) Arrangement of experiment



(b) 实验照片

(b) Photograph of experiment

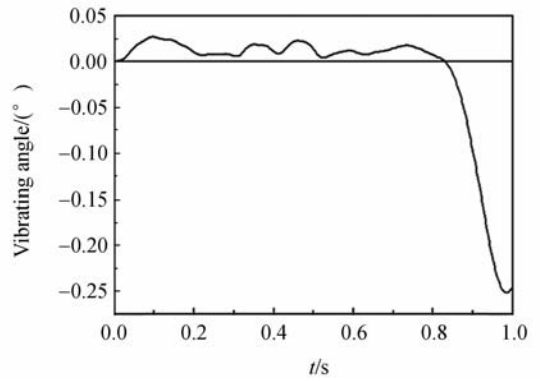
图 3 振动 MTF 测试仿真实验

Fig. 3 Simulation experiment of vibrating MTF test

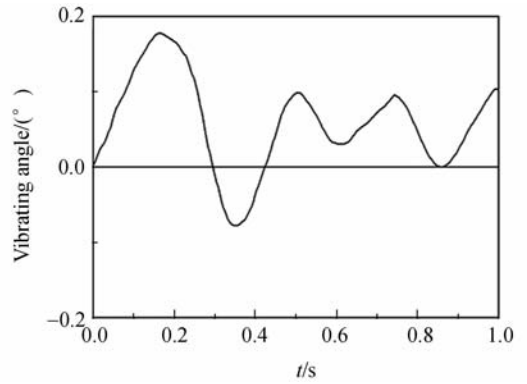
5.2 实验结果

进行了三组实验,通过人为随机地在水平方向来回转动转台,由光纤陀螺采集到的振动曲线如图 4 所示。

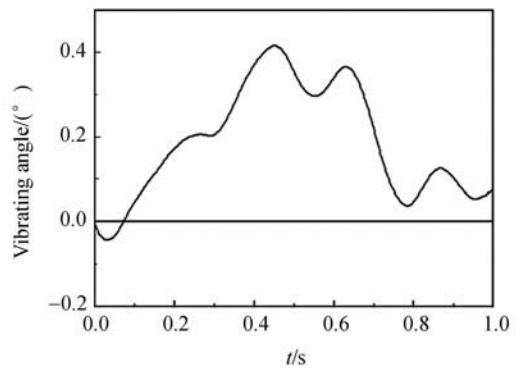
使用前文推导的振动 MTF 的数学模型对采



(a)



(b)



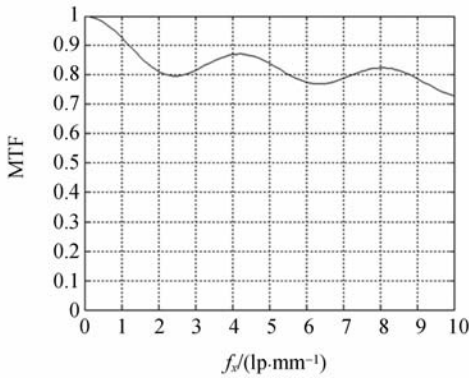
(c)

图 4 采集到的振动曲线

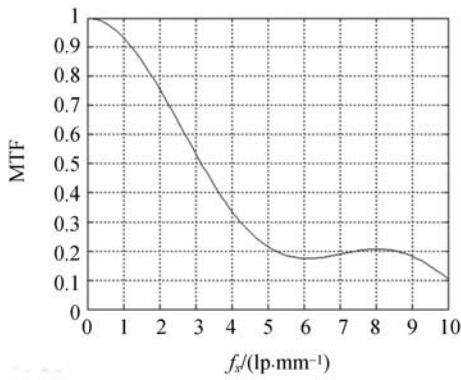
Fig. 4 Measured vibration curves

集到的振动曲线进行计算,分别得到 3 组实验的振动 MTF 如图 5 所示。

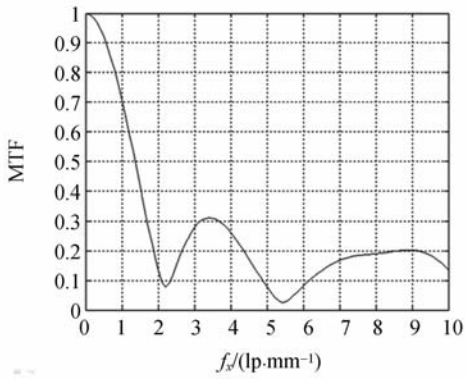
测试相机采集到的振动退化刀口像如图 6 所示。可以看出,随着振动幅度的增大,刀口像也逐渐模糊。



(a)



(b)



(c)

图 5 数学模型计算得到的 MTF

Fig. 5 MTF calculated by mathematic model



(a) (b) (c)

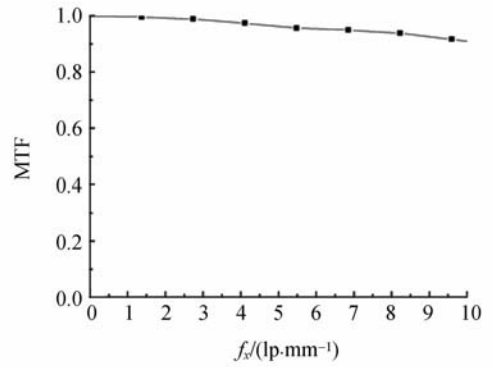
图 6 拍照得到的刀口像

Fig. 6 Edge image acquired by camera

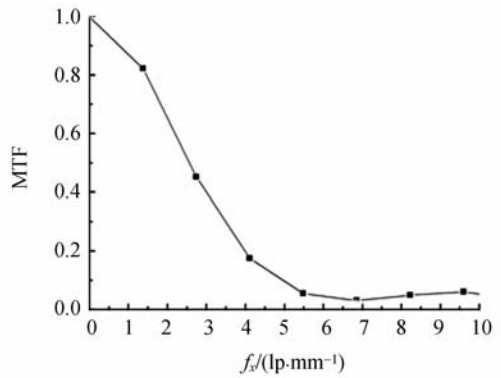
5.3 从刀口图像分析计算 MTF

目前,利用图像计算空间相机的 MTF 受到该研究领域的关注^[8-12]。因此,本文尝试利用简单的刀口图像 MTF 算法与实验中的理论计算 MTF 进行了对比。根据图像计算 MTF 需要对图像进行处理。其典型流程为:(1)将刀口图像进行去噪拟合等处理,得到边缘扩展函数;(2)将边缘扩展函数进行微分,得到一维点扩散函数;(3)点扩散函数进行傅里叶变换,得到近似的 MTF。

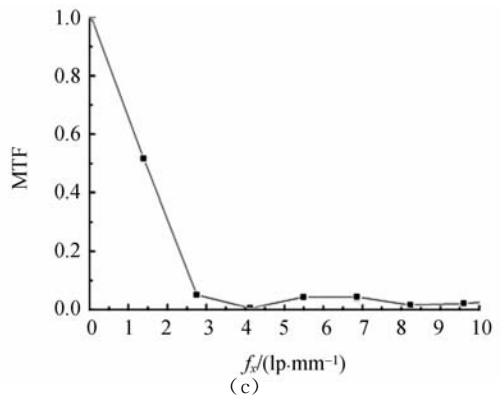
通过以上步骤对图 5 得到的 3 幅图像进行处理,得到的 MTF 曲线如图 7 所示。



(a)



(b)



(c)

图 7 刀口图像分析得到的 MTF

Fig. 7 MTF deduced by edge image analysis

可以看出,通过数学模型计算得到的 MTF 曲线和图像分析得到的 MTF 曲线在形状和趋势上是一致的。图像分析法的精度与处理算法关系较大,本论文的实验由于时间关系,采用图像处理算法比较简单,没有考虑刀口的倾斜、点扩散函数的对称性等,并且在点扩散函数处理时,完全依靠离散数据进行傅里叶变换,如果将数据进行多项式拟合,这部分处理误差也可消除。

6 结 论

本文建立了振动成像 MTF 的数学模型,实现了振动 MTF 因子的分离。利用编制的软件计

算得到了某长焦距空间相机在颤振情况下在 Nyquist 频率处的 MTF,并得到该相机对于平台颤振的指标要求为 0.04 ms 内振角小于 0.05",且避免相机产生 200 Hz 以上的振动。此外,本文的半物理仿真实验得出了不同振动曲线对应的 MTF 理论曲线及其相应的图像,并利用图像分析法验证了 MTF 下降与理论结果的一致性。因此利用本文方法,一方面可以有效检验图像分析法测 MTF 的精度,并作为改进依据;另一方面,通过对空间相机振动离散采样的统计矩计算,还可以得到光学系统像平面上任意方向的 MTF,这对于空间相机的振动模糊图像的恢复算法研究也是十分有益的。

参考文献:

- [1] 耿文豹,翟林培,丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2):314-320.
GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):314-320. (in Chinese)
- [2] ZHAN G L J, LEE C M, WAN G Y S. A study on non-stationary, random vibration of a vehicle in time and frequency domains [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2002, 3(3): 101-109.
- [3] 陈丁跃. 光学精密航天仪器运载中的环境振动试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(7):711-714.
CHEN D Y. Research on environment vibration experiment upon optical precision space flight apparatus during transportation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(7): 711-714. (in Chinese)
- [4] 王晶,高利民,姚俊峰. 机载测量平台中的坐标转换误差分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2):388-394.
WANG J, GAO L M, YAO J F. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 388-394. (in Chinese)
- [5] JOEL A, PAUL S. Effects of base motion on space based precision laser tracking in the relay mirror experiment [J]. *SPIE*, 1991, 1482:170-181.
- [6] 王俊,王家骏,卢铿. 图像二维运动时的光学传递函数计算[J]. 光学学报, 2001, 21(5):581-585.
WANG J, WANG J Q, LU E. Calculation of optical transfer function with two-dimensional image motion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(5):581-585. (in Chinese)
- [7] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Numerical calculation of MTF for image motion: experimental verification [J]. *SPIE*, 1992, 1697:183-197.
- [8] LEGER D, DUFFAUT J, ROBINET F. MTF Measurement using spotlight [C]. *IEEE Proceedings of IGARRS*, 1994:2010-2012.
- [9] RAUCHMILLER R F, SCHOWENGERDT R A. Measurement of landsat thematic mapper modulation transfer function using an array of point sources [J]. *Optical Engineering*, 1988, 27(4): 334-343.
- [10] LENCIONI D E, DIGENIS C J, BICLRNELL W E, et al.. Design and performance of the EO-1 Advanced land imager [C]. *SPIE Conference on Sensors, Systems and Next Generation Satellites III, Florence, Italy, September, 1999:1-12.*

[11] SCHOWENGERDT R A, BASEDOW R W, COLWELL J E, *et al.*. Measurement of the HYDICE system MTF from flight imagery [J]. *SPIE*, 1996, 2821:127-136.

[12] SCHOWENGERDT R A, ARCHWAMETY C, WRIGLEY R C. Landsat thematic mapper image-derived MTF [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51(9):1395-1406.

作者简介:



张影(1977—),女,吉林榆树人,博士,1999年于长春理工大学获得学士学位,2010年于长春理工大学获博士学位,主要从事自动控制、通信等方面的研究。E-mail: zhangying5582366@sina.com.cn

●下期预告

激光外差干涉中声光器件非均匀声场特性

霍雷,曾晓东

(西安电子科技大学技术物理学院,陕西西安710071)

针对声光晶体内部声波来回反射形成驻波,使晶体内声场分布混乱造成分布不均匀,影响衍射效率和衍射光场分布,导致光束质量下降,降低激光外差干涉效率的现象,提出了以不改变声光设备为前提的光切趾方法。以 TeO_2 晶体为基底,理论分析了声光器件的声场分布、体光栅衬度及对衍射光效率的影响。提出非均匀光栅衬度模型,并利用光切趾法控制空间声场非均匀分布。通过理论仿真结合实验测量,证明该方法的传输性能。实验结果表明:声光器件的超声频率符合AOM中心频率在100~105 MHz时,使用切趾法前,衍射光斑呈现双峰,光强未均匀分布并且在光斑中心不呈现光强极大值,衍射光束出现串扰并携带大量噪声,外差信号功率为-1.7 dBm。使用切趾法后,改善了声场非均匀现象对光束质量的影响,光强分布均匀呈高斯结构,声场衍射效率提高到98%,传输带宽达到总衍射带宽的50%~60%。外差信号功率达到3.8 dBm。实验结果表明,在满足声光器件的工作要求的条件下,通过该方法可在优化传输容量抑制光串扰同时,提高激光外差干涉效率,使外差中频信号电压增益为11 dB。