

文章编号: 0253-2239(2009)01-0192-05

高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析

钱义先^{1,2} 梁 伟¹ 高晓东¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 航空振动是影响动态高分辨率航空相机成像质量的主要因素。利用“运动的概率密度函数相当于光学系统的点/线扩展函数”这一概念,采用光学传递函数的理论,并运用调制传递函数(MTF)作为评价像质的工具,得到了动态调制传递函数的一般表达式。详细分析线性运动、正弦规律变化的振动和随机振动对像质的影响,并用 Matlab 软件进行仿真分析。结果表明,得到的结论与其它相关文献的分析结果和理论相吻合的,而且该方法可以推广到二维运动形式下的调制传递函数分析。对振动下系统 MTF 与静态情况下进行了实验比较,结果表明在相同奈奎斯特频率处下降 0.3 左右,与仿真结果一致。该方法可用于预估与评价航空相机和其他光电系统成像质量,该结果也可用于去卷滤波以实现图像复原。

关键词 应用光学; 航空相机; 调制传递函数; 振动; 像质

中图分类号 TN133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0192

Numerical Analysis of Dynamic Modulation Transfer Function for High-Resolution Aerial Camera

Qian Yixian^{1,2} Liang Wei¹ Gao Xiaodong¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Aerial vibration is a key factor affecting dynamic image quality of high-resolution aerial camera. Base on the theory of optical transfer function, dynamic modulation transfer function (MTF) is obtained by applying the conception that probability density function of motion is equal to point/line spread function of optical system. The influence of linear motion, sinusoidal vibration and random vibration is developed respectively. With the help of Matlab software, dynamic MTF is simulated, and the drawn conclusion is consistent with the results of the other literatures. This method can be expanded to two-dimensional motion. Vibrational MTF is compared with that under static condition, and the results are consistent with simulation curve with a 30% decrease at the Nyquist frequency. The method can be applied for forecasting and evaluating image quality on aerial camera and other optoelectronic systems, and the results can be used in deconvolution filter to realize image restoration.

Key words applied optics; aerial camera; modulation transfer function; vibration; image quality

1 引 言

随着航空技术的发展,对光电成像系统的分辨率要求越来越高,在许多高分辨率的航空光电成像系统中,尽管使用了高质量的传感器,但获得的像质并不好,限制高分辨率成像的主要因素往往不是因

电子学或光学系统^[1]引起的,这种图像模糊退化主要是航空振动引起的。因大叶片的涡轮发动机、电动机振动等影响,航空相机工作时,振动造成的模糊往往比航天更严重。

因振动引起的像移造成系统光学传递函数^[2]的

收稿日期: 2008-03-11; **收到修改稿日期**: 2008-08-02

基金项目: 中国科学院光电技术研究所创新基金(ck0308)资助课题。

作者简介: 钱义先(1974—),男,博士研究生,主要从事航空光电系统高分辨率成像技术方面的研究。

E-mail: sanmao1861@yahoo.com.cn

导师简介: 高晓东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空测量及光电探测技术等方面的研究。

E-mail: gxd536@yahoo.com

下降越来越受到人们的重视。国内相关研究所^[3~5]对光电系统的动态光学传递函数研究较多。国外 Sergey Raiter 等^[6]研究了振动引起的调制传递函数(MTF)下降的解析算法以及将其用于图像复原, Richard Vollmerhausen 等^[7]对多种运动下光轴的抖动引起 MTF 下降进行了研究。本文就多种振动形式如何影响系统 MTF 利用数值分析方法进行详细分析,运用“图像运动的概率密度函数相当于光学系统的点(线)扩展函数”这一概念,得到了运动状态光学传递函数的数值方法。并用 Matlab 软件对其进行仿真分析,所得结果十分具体、直观。用该分析方法,建立振动与 MTF 的模型关系来分析图像退化的原因及严重程度是十分有效的,可以预估和评价动态条件下像质的优劣。

2 运动概率密度函数

若目标与像之间存在一维运动 $x(t)$, 图像的运动导致系统的成像脉冲响应在空间运动。光学成像系统曝光的过程就是空间运动脉冲响应对时间进行积分的过程。也就是说,对于某一给定的运动形式,脉冲响应经过任意一点的概率是 x 的函数,即概率密度函数。如图 1 所示。在像平面上的某一点,可能同时存在物点的几次成像,所成像点的数目决定于运动经过该点的次数,这些像的光强度在像平面上迭加。由此可见,当运动在某一点 $x(t)$ 发生频率越大,也就是物点在该点成像次数越多,所迭加的光强度越大,因此 $x(t)$ 的概率密度函数反映了像面上的光强分布。所以可以认为:曝光时间内 $x(t)$ 的概率密度函数等价于系统的点(线)扩展函数。

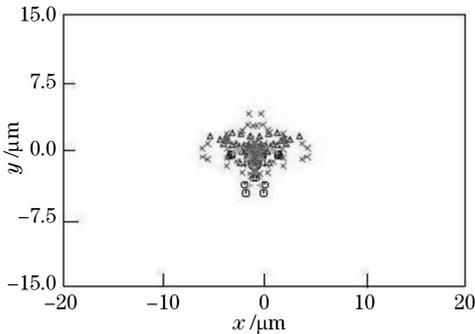


图 1 像点分布图

Fig. 1 Distribution of image

3 动态光学传递函数的数值算法

在航空光电成像系统中,外部激励通过连接节点将振动传递给整个相机或 CCD,造成在曝光时间

内目标和传感器的相对位移。其中根据振动的具体情况又可分为线性运动、高频振动、低频振动和随机振动。振动作正弦变化而引起像质的退化主要取决于曝光时间 t_e 与正弦振动周期 T_0 的比值 t_e/T_0 和曝光开始时刻 t_s 。根据比值 t_e/T_0 的不同又分为两种情况:1)高频振动:曝光时间 t_e 大于简谐振动周期 T_0 ($t_e > T_0$);2)低频振动:曝光时间 t_e 小于简谐振动周期 T_0 ($t_e < T_0$)。

假设曝光开始时刻为 t_s , 结束时刻为 $t_s + t_e$, 某一给定的位置 $x(t)$ 出现的概率是在曝光时间内的 t 的函数。因起始曝光时刻 t_s 是一个随机的,因此它在整个曝光时间内是均匀分布的,即: $f(t) = 1/t_e$, 在曝光时间内, $x_0 = x(t_1) = x(t_2) = \dots = x(t_n) = \dots$, 每点出现的概率相同。

则点扩展函数(PSF)可表示为

$$F_{\text{PS}} = f(t) \times \left[\frac{1}{|x'(t_1)|} + \dots + \frac{1}{|x'(t_n)|} + \dots \right] = \frac{1}{t_e} \times \left[\frac{1}{|x'(t_1)|} + \dots + \frac{1}{|x'(t_n)|} + \dots \right], \quad (1)$$

式中 $x'(t)$ 为 $x(t)$ 的导数。

而光学系统扩展函数的傅里叶变换就是光学系统的调制传递函数,因此,如果已知某动态条件下的运动概率密度函数,则可以方便求出系统的调制传递函数(OTF)

$$F_{\text{OT}}(f) = \mathcal{F}[F_{\text{PS}}(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\text{PS}}(x) \exp[-2\pi j f x] dx, \quad (2)$$

$$F_{\text{OT}}(f) = F_{\text{MT}}(f) \exp[iF_{\text{PT}}(f)],$$

式中 f 为空间频率, $\mathcal{F}[\dots]$ 表示傅里叶变换; $F_{\text{PS}}(x)$ 表示点扩展函数在位置 x 处的值, $F_{\text{PT}}(f)$ 表示相位调制传递函数, F_{MT} 表示光学传递函数模值。

3.1 线性运动

在像平面内,因线性运动造成的图像退化可由匀速直线运动表示,则引起的模糊大小可由下式表示: $d = v_0 t_e$, 式中 v_0 为像相对于传感器的相对速度,因此,点扩展函数(即概率分布密度函数)为

$$f_x(x) = \frac{1}{v_0 t_e} = \frac{1}{d}, \quad 0 < x < d, \quad (3)$$

式中 d 为像模糊大小。根据光学系统扩展函数的傅里叶变换即调制传递函数 MTF, 即

$$F_{\text{MT}}(f) = \left| \frac{1}{d} \int_0^d \exp(-i2\pi f x) dx \right| = \text{sinc}(\pi f d), \quad (4)$$

利用 Matlab 软件仿真可以得到其归一化曲线图 2, 图中不同的曲线代表不同像移的 MTF 曲线。

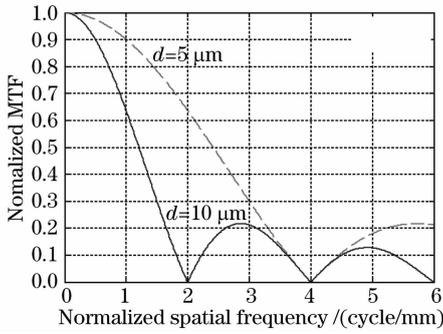


图 2 线性运动下的 MTF

Fig. 2 MTF with linear motion

3.2 高频正弦运动

因涡轮发动机、电机等引起的高频正弦运动是很重要的另一种形式。高频振荡的情况一般定义为在曝光时间内含有至少一个或多个振荡周期,如图 3。在这种情况下 $t_e > T_0$,在不同的曝光时刻,像模糊大小均表现为峰-谷之间的最大位移 $2D$ 。

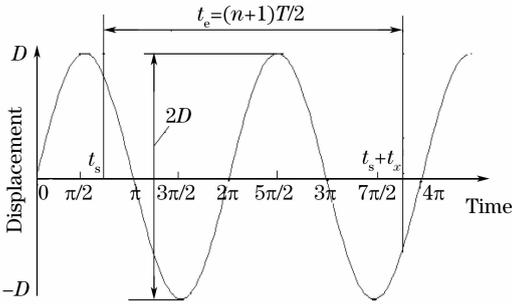


图 3 高频振动

Fig. 3 High-frequency vibration

为简单起见,假设在曝光时间 t_e 内含有 n 个(n 为正整数)高频周期 T_0 ,则运动函数为

$$x(t) = D\cos \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}. \quad (5)$$

根据假设 $t_e = nT, t_s = 0$,曝光时间 t 在区间 $(0, nT_0)$ 是一个随机分布,因此分布函数 $f(t)$ 为

$$f_t(t) = \frac{1}{t_e} = \frac{1}{nT_0}, \quad (6)$$

把上式代入点/线扩展函数的表达式(1)中可得

$$f_x(x) = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{D^2 - x^2}} \sum f_i(t_n) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{D^2 - x^2}},$$

经变量代换可得到

$$f_x(x) = F_{LS} = \frac{1}{\pi D \cos \varphi}, \quad (7)$$

则扩展函数的傅里叶变换为

$$F_{MT} = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\pi D \cos \varphi} \cos(2\pi f D \sin \varphi) D \cos \varphi d\varphi = J_0(2\pi D f), \quad (8)$$

(8)式即零阶贝塞尔函数,同样通过 Matlab 软件可以仿真得到高频振动下的归一化曲线图 4。

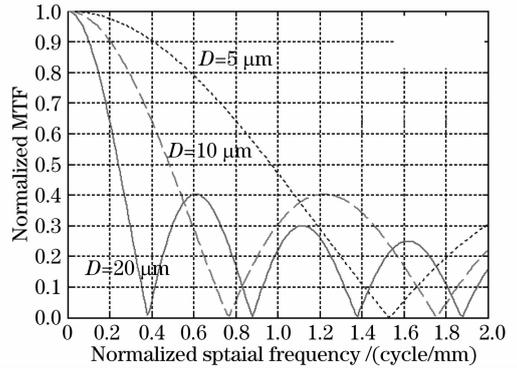


图 4 高频振动下的 MTF

Fig. 4 MTF of high-frequency vibration

3.3 低频正弦运动

低频正弦振动定义为其具有相对较长的振动周期 T_0, T_0 比 t_e 大的多,这意味着像模糊发生在一个振动周期的某段地方。在低频振动下的像模糊是一个随机的过程,在这种情况下,在相同的曝光时间内模糊半径的大小取决于瞬间曝光时刻的位置,而开始曝光时刻点是随机的,如图 5 所示。

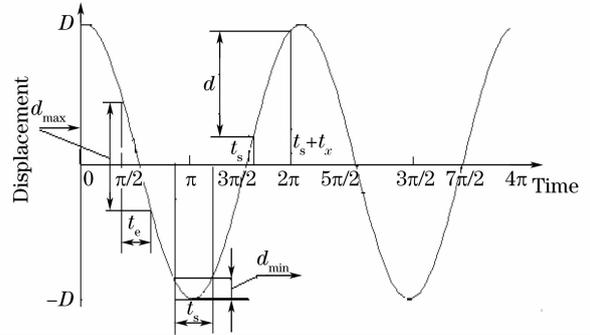


图 5 低频振动

Fig. 5 Low-frequency vibration

从图 5 可以看出, d_{\min} 发生在斜率较缓的地方,斜率越大,模糊半径越大。最大和最小的模糊半径是一个平均值,可有以下式表示:

$$d_{\min} = D\{1 - \cos[(2\pi/T_0)(t_e/2)]\}, \quad (9)$$

$$d_{\max} = 2D\sin[(2\pi/T_0)(t_e/2)]. \quad (10)$$

对低频振动是一个随机的过程,经详细分析和计算,对于低频振动下的模糊半径根据不同的曝光时刻可以分为六种情况,分别有如下的具体情况:

- 1) $d = D\{\cos(2\pi/T_0)t_x - \cos[(2\pi/T_0)(t_x + t_e)]\};$

$$t_x \in [0, T_0/2 - t_e)$$

- 2) $d = D\{1 + \cos[(2\pi/T_0)t_x]\};$

$$t_x \in [T_0/2 - t_e, T_0/2 - t_e/2)$$

- 3) $d = D\{1 + \cos[(2\pi/T_0)(t_x + t_e)]\};$

$$t_x \in [T_0/2 - t_e/2, T_0/2)$$

$$4) d = D\{\cos[(2\pi/T_0)(t_x + t_e)] - \cos[(2\pi/T_0)t_x]\};$$

$$t_x \in [T_0/2, T_0 - t_e)$$

$$5) d = D\{1 - \cos[(2\pi/T_0)t_x]\};$$

$$t_x \in [T_0 - t_e, T_0 - t_e/2)$$

$$6) d = D\{1 - \cos[(2\pi/T_0)(t_x + t_e)]\};$$

$$t_x \in [T_0 - t_e/2, t_e)$$

假设振动周期 $T_0 = 40$ ms, 曝光时间 $t_e = 4$ ms, 振幅 $D = 1$ mm。因篇幅有限在此仅将第一种情况进行具体的说明, 其他情况类似。第一种情形的模糊半径可用下式表示:

$$d_1 = D\left\{\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}t_s\right) - \cos\left[\frac{2\pi}{T_0}(t_s + t_e)\right]\right\}. \quad (11)$$

很短的曝光时间内速度变化不大, 可相当于直线性运动, 故 MTF 可用 sinc 函数表示, 用 d 代替 vt_e 即可, 但是 d 是随着 t_s 的不同而变化的 (另外 t_e/T_0 不同, MTF 也有不同的结果)。扩展函数形式与匀速直线运动相同, 则概率密度函数

$$f_x(x) = 1/d_1, \quad (12)$$

则低频正弦调制传递函数与线性运动类似有

$$F_{MT} = \text{sinc}(\pi f d_1). \quad (13)$$

图 6 给出了 $D = 1$ mm 下低频振动最大和最小模糊分别为 $d = 6.18 \mu\text{m}$ 与 $d = 0.5 \mu\text{m}$ 下的 MTF 曲线图。

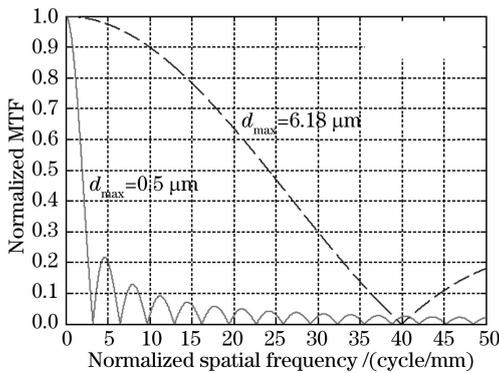


图 6 低频振动下的 MTF

Fig. 6 MTF with low-frequency vibration

3.4 随机振动

扩展函数的分布是随机的且服从高斯分布如为

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (14)$$

$$F_{MT} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) \exp(-i2\pi f x) dx \right| = \exp(-2\sigma^2 \pi^2 f^2).$$

σ 为振动均方根值, 同样可得其 MTF 表达式和曲线图 7。

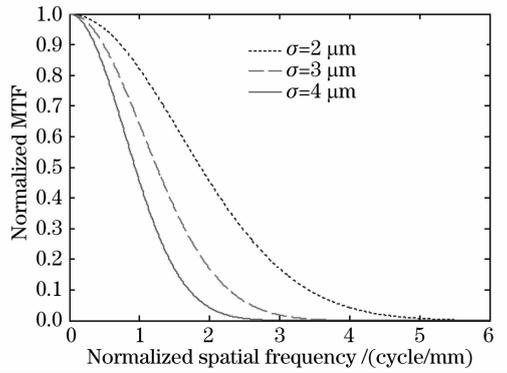


图 7 随机振动下的 MTF

Fig. 7 MTF with random vibration

4 结果与分析

上述讨论方法同样可以推广到二维运动, 二维方向运动 MTF 可表示为: $MTF = MTF_x \times MTF_y$ 。假设 x 与 y 的运动形式均为高频振动, 且振幅 $D = 1$ mm, 则可以得到其二维调制传递函数如图 8。

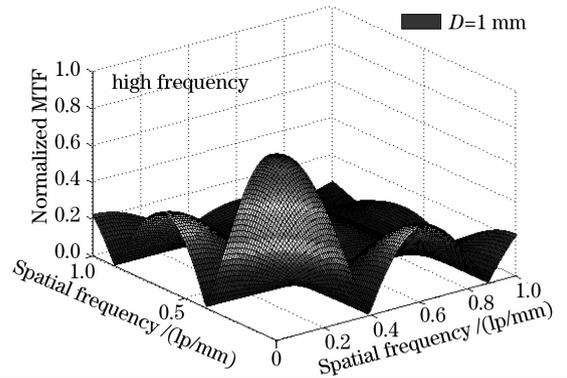


图 8 二维高频振动 MTF

Fig. 8 MTF with two-dimensional high-frequency vibration

为了评价振动对某航空 MTF 影响, 进行了振动分析实验。以高频振动为例, 某航空相机固定于激振台上, 激振台提供高频正弦振动, 振幅 10 mm, 如图 9 所示。

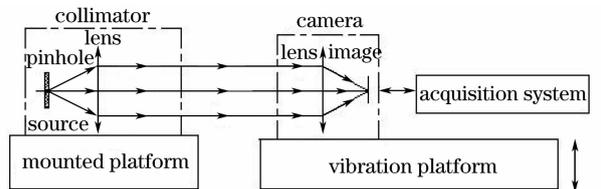


图 9 MTF 实验

Fig. 9 MTF experiment

测试所获得传函曲线如图 10, 在 50 lp/mm 处的 MTF 值比静态时下降约 0.3 左右, 测试曲线与仿真结果基本一致。

通过上述分析, 可以得出: 1) 高、低频振动的是

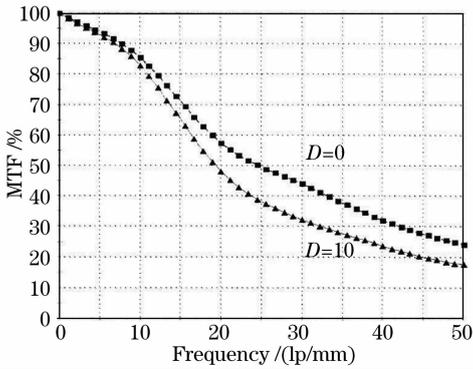


图 10 实验结果

Fig. 10 Experimental results

相对于 t_e/T_0 的比值而言,而不是某一固定频率,因此隔离高频振动要看曝光时间长短而定;2)线性运动的 MTF 在其他条件不变的情况下,取决于曝光时间的长短,时间越短,MTF 值越高;3)从图 4 和图 6 可看出高频和低频正弦振动下的 MTF 在相同的空间频率处随着振幅的增大而迅速降低,但高频振动可用唯一表达式分析 MTF;而低频正弦振动情况分析较为复杂,不能用单一的表达式给出唯一的 MTF,主要因为 T_0 比 t_e 大得多,曝光开始时刻 t_s 是随机的, t_s 在不同的时刻有不同的模糊大小,因此不同的曝光时刻有不同的 MTF;4)另外从(9)式可以分析出低频 MTF 与比值 t_e/T_0 有关,振幅相同条件下相对曝光时间越小,MTF 越高。

5 结 论

采用数值计算方法,利用“图像运动的概率密度函数相当于系统的扩展函数”这一概念,运用光学传递函数理论,分析了航空相机在不同形式振动下的调

制传递函数,得到了其动态调制传递函数的数值解,得到的结果与相关文献一致。通过 Matlab 软件对其进行仿真分析,结果简洁、直观。可以推广到任何已知概率密度函数运动形式,同样该方法适用于二维运动形式。该方法可用于航空相机和其他动态光电成像系统预估与评价,该结果可用于去卷滤波以实现图像复原。

参 考 文 献

- Xu Peng, Huang Changqing, Wang Yongtian. Modulation transfer function in push-broom camera limits resulting from mechanical vibration[J]. *J. Astronautics*, 2003, **24**(3): 259~263
- 徐 鹏,黄长宁,王涌天. 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
- Mai Weilin. Optical Transfer Function and Mathematic Foundation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979
- 麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979
- Wang Jun, Wang Jiaqi, Lu E. Calculation of optical transfer function with two dimensional image motion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 581~585
- 王 俊,王家骐,卢 镔. 图像二维运动时的调制传递函数计算[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 581~585
- Li Hongzhuang, Han Changyuan, Ma Dongmei. Assessment method of modulation transfer function of on-orbit space optical remote sensor using neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 631~637
- 李宏壮,韩昌元,马冬梅. 航天光学遥感器在轨调制传递函数神经网络评价方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 631~637
- Yang Hua, Jiao Wenchun, Zhu Yonghong. Modulation transfer function of CCD camera at Nyquist frequency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 313~316
- 杨 桦,焦文春,朱永红. CCD 相机在系统奈奎斯特频率处调制传递函数[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 313~316
- Sergey Raiter, Ofer Hadar, Norman S. Kopeika. Influence of motion sensor error on image restoration from vibrations and motion[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(12): 3276~3282
- Ruchard Vollmerhausen, Mel H. Friedman *et al.*. Modeling the blur associated with vibration and motion[C]. *SPIE*, 2007, **6543**: 65430u-1~65430u-9