

doi: 10.3788/gzxb20144304.0411001

基于成像分辨率的光电成像系统抖动要求

谭碧涛^{1,2,3}, 陈洪斌¹, 王群书³

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要: 针对图像抖动导致光电成像系统的成像分辨率降低的问题, 提出了一种基于成像分辨率的光电成像系统抖动要求分析方法. 根据抖动频率将抖动分为高频抖动与低频抖动, 高频抖动按高斯、正弦、线性等三种抖动分布考虑, 低频抖动按线性抖动分布考虑, 给出了各抖动分布对应的调制传递函数模型, 进而建立了含抖动全系统调制传递函数模型. 基于成像分辨率要求与调制传递函数模型, 给出了抖动要求定量分析方法, 并给出了相应分析流程与算法. 根据流程, 结合特定系统参量, 进行了仿真分析, 结果表明: 在一定成像分辨率条件下, 低频视轴抖动可允许值最大, 其次为高频线性抖动可允许值, 最后为高频正弦与高斯抖动可允许值.

关键词: 光电成像系统; 分辨率; 视轴; 传递函数; 抖动; 高频; 低频

中图分类号: N945; O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0411001-5

Jitter of the Electro-optical System Based on Image-resolution

TAN Bi-tao^{1,2,3}, CHEN Hong-bin¹, WANG Qun-shu³

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Aiming at the issue that image-resolution of the electro-optical imaging system can be depressed by the image jitter, a ration analysis method of the requirement of jitter was proposed. The jitter was classified into high frequency jitter and low frequency jitter, the high frequency jitter divides into Gauss, sine and linear, the low frequency jitter was defined as linear jitter, the modulation transfer function of them was given, and the modulation transfer function of the whole system was built. Based on the resolution equal notion and the modulation transfer function model, the ration analysis method of the jitter was given, the analysis flow and arithmetic was also presented. At last, the method was simulated through computer based on specially appointed system parameter and the analysis flow. The simulation results indicate that the low frequency linear jitter tolerance is max, the high linear jitter tolerance is next, the high frequency Gauss jitter tolerance and the high frequency sine jitter tolerance is min.

Key words: Electro-optical imaging system; Resolution; Optical axis; Jitter; Transfer function; High frequency; Low frequency

OCIS Codes: 110.2970; 110.4850; 120.4570; 220.4830

0 引言

在光电成像系统成像过程中, 引起图像抖动的因素包括大气湍流、平台的稳定性、机架的震动、快速控

制反射镜的残差、目标本身的运动等^[1]. 国内外在图像抖动方面开展了大量的研究, 研究的重点主要分为两类: 第一类是针对图像抖动本身开展研究, 重点分析抖动本身特征, 再根据抖动特征研究给出抖动补偿方法,

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(No. 2012AA8083027) 资助

第一作者: 谭碧涛(1983-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为光电探测跟踪. Email: tanbitao@aliyun.com

导师: 陈洪斌(1953-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光学和光束控制技术. Email: chbin@ioe.ac.cn

收稿日期: 2013-07-19; 录用日期: 2013-08-27

<http://www.photon.ac.cn>

提高图像的质量^[1-5];第二类是针对抖动对系统探测跟踪性能的影响开展研究,分析抖动与探测概率、虚警率等之间的关系,并建立相应分析模型,给出分析结果^[6-12].但是,对于特定成像分辨率要求下的抖动定量分析还缺乏系统的研究.

本文根据抖动频率将抖动分为高频抖动与低频抖动,高频抖动按高斯、正弦、线性等三种抖动分布考虑,低频抖动按线性抖动分布考虑,进而给出了各抖动分布对应的调制传递函数模型.基于成像分辨率要求与传递函数模型,给出了抖动要求定量分析方法.在成像角分辨率为 $10 \mu\text{rad}$ 条件下,高频高斯、正弦、线性及低频线性四种抖动可允许的最大视轴抖动量分别为 3.75 、 3.88 、 9.97 、 $13.47 \mu\text{rad}$.在一定成像分辨率条件下,低频视轴抖动可允许值最大,其次为高频线性抖动可允许值,最后为高频正弦与高斯抖动可允许值.对于 10 Hz 频率可允许的最大低频抖动为 $13.47 \mu\text{rad}$,对于 1 Hz 频率可允许的最大低频抖动为 $134.73 \mu\text{rad}$;频率越低,可允许的抖动量越大.

1 调制传递函数理论分析

光电成像系统对空间目标的成像过程由目标、大气、光学系统、光电探测器、信号处理和提取等多环节组成,每一环节都将影响到系统对目标信号的提取质量,即影响到最终的探测能力,系统探测成像过程如图 1. 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是一种从频率域出发,可较全面地评价系统的成像质量,给出系统的空间分辨率,系统 MTF 的高低直接影响到成像质量的好坏^[13].

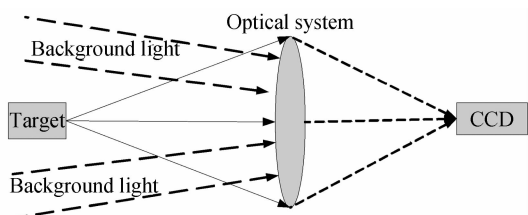


图 1 光电系统成像过程示意

Fig. 1 The sketch map of the imaging process

当整个系统幅值响应具有线性或相移不变性时,系统 MTF 可表示成是各个分系统 MTF 的乘积^[13].

$$\text{MTF} = \prod_{i=1}^n \text{MTF}_i = \text{MTF}_o \cdot \text{MTF}_d \cdot \text{MTF}_e \cdot \text{MTF}_m \quad (1)$$

式中, MTF_o 为光学系统的 MTF; MTF_d 为探测器的 MTF; MTF_e 为电子学系统的 MTF, MTF_m 为抖动引起的 MTF.

1.1 光学系统的 MTF

影响光学系统 MTF 的因素有:孔径衍射极限的限制、中心遮拦、光学设计残余像差、制造装配误差等.按照线性系统理论,光学系统的 MTF_o 为

$$\text{MTF}_o = \text{MTF}_{o1} \text{MTF}_{o2} \quad (2)$$

式中, MTF_{o1} 为光学系统孔径衍射极限下的 MTF; MTF_{o2} 非衍射受限的光学系统 MTF.

光学系统孔径衍射极限 MTF, 是理想的可能达到的最高 MTF, 对于圆形孔径可表示为

$$\text{MTF}_{o1} = 2 \{ \arccos(f) - f[1-f^2]^{1/2} \} / \pi \quad (3)$$

式中, f 为归一化空间频率; D 为光学系统的入瞳直径.

对于非衍射受限的光学系统 MTF, 将取决于系统的特定像差. 由像差引起的弥散圆的能量分布为高斯分布, 具有圆对称形式, 若其标准偏差为 σ_r (μrad), 对应的非衍射受限光学系统 MTF_{o2} 表示为

$$\text{MTF}_{o2} = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 f^2) \quad (4)$$

式中, $\sigma = \sigma_r D / \lambda$.

1.2 探测器的 MTF

通常, 假设探测器在空间域的点扩散函数是矩形函数, 则空间响应 MTF_d

$$\text{MTF}_d = \text{sinc}(\pi f \Delta x) \quad (5)$$

式中, Δx 是考察方向光学系统的瞬时视场.

1.3 电子学系统的 MTF

探测器产生的信号通常为模拟信号, 目的是消除大的背景基准电平. 它可以模拟成简单的 RC 高通滤波器, 前置放大器, MTF_{qz} 为

$$\text{MTF}_{qz}(f) = \frac{f}{[1+f^2]^{1/2}} \quad (6)$$

式中, $f = f_0 / f_{on}$, 截止频率 f_{on} 是前置放大器响应 3 dB 的频率值.

后置放大器可以模拟成 RC 低通滤波器, 后置放大器 MTF_{hz} 为

$$\text{MTF}_{hz}(f) = \frac{1}{[1+f^2]^{1/2}} \quad (7)$$

式中, $f = f_0 / f_{off}$, 截止频率 f_{off} 是后置放大器响应 3 dB 的频率值.

于是, 电子学系统的 MTF_e 可以表示为

$$\text{MTF}_e = \text{MTF}_{qz}(f) \text{MTF}_{hz}(f) \quad (8)$$

1.4 抖动引起的 MTF

对于光电成像系统的图像抖动, 可以根据其周期特征与成像器件积分时间之间的关系进行分类. 定义周期小于或等于积分时间的抖动为高频抖动; 周期大于积分时间的抖动为低频抖动. 对于高频抖动主要有高斯分布抖动、正弦分布抖动、线性分布抖动三种模型, 低频抖动为线性分布抖动模型. 高频线性运动来源于空间目标与成像系统的相对运动; 正弦运动来源于平台的震动; 随机运动主要来源于大气湍流引起的积分时间内图像随机漂移; 低频线性运动来源于机架的抖动. 为此, 抖动引起的 MTF 可表示为^[9]

$$\text{MTF}_m = \text{MTF}_{\text{linear}} \cdot \text{MTF}_{\text{random}} \cdot \text{MTF}_{\text{sing}} \cdot \text{MTF}_{\text{singd}} \quad (9)$$

线性运动来源于目标和系统的相对运动, 由于成

像积分时间很小,加速度对分辨率的影响在此忽略不计,MTF_{linear}可表示为

$$MTF_{linear} = \text{sinc}(\pi d f) \quad (10)$$

式中, d 为运动引起的模糊大小, $d = vt$, v 为像相对于传感器的相对速度, t 为积分时间.

对于随机运动,抖动属于高斯分布,MTF_{random}可表示为

$$MTF_{random} = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 f^2) \quad (11)$$

式中, σ 为图像抖动的相对于空间频率的归一化标准差, $\sigma = \sigma_0 D/\lambda$.

图像高频正弦抖动引起的 MTF_{sing} 定义为

$$MTF_{sing} = J_1(2\pi a f) \quad (12)$$

式中, a 为归一化正弦波的振幅, J_1 是第一类零阶贝塞尔函数.

以上为均假定抖动发生在一个象元的积分时间内.对于低频抖动,可以成正弦分布抖动,周期 T_s .超过积分时间 T_{int} 的正弦抖动所引起的图像抖动取决于 T_{int} 与 T_s 之比,线性抖动的状态参量为

$$d_{sind} \approx 3.77(T_{int}/T_s)a_d \quad (13)$$

式中, a_d 为归一化正弦波的振幅.

则低频正弦抖动可以看成线性抖动的平均效应进行估计,其引起的 MTF_{sind} 定义为

$$MTF_{sind} = \text{sinc}(\pi d_{sind} f) \quad (14)$$

2 抖动定量分析方法

为了对各种抖动引起的成像模糊量进行定量的分析,选择成像分辨率作为分析标准,文中以瑞利判据($1.22\lambda/D$)作为依据.对于一个非相干成像系统,其截止角频率为 λ/D ,可以看出瑞利角分辨率比截止角频率大1.22倍.此时,瑞利判据对应的空间频率比空间截止频率小1.22倍.对于光电成像系统的分辨率分析,采用MTF,只需了解实际的空间截止频率,为此对空间频率进行了归一化处理.

为了更简洁说明抖动定量分析方法,假设光电成像系统为衍射极限系统.瑞利极限对应的归一化空间频率为0.82,相应衍射极限系统的MTF为0.09.在理论分析中,已将抖动的影响折算在系统的MTF中,各种水平的图像抖动将引起系统传递函数的下降,为此,含抖动影响后全系统MTF为0.09时对应的归一化空间频率将产生改变,此空间频率对应的分辨率即为有效分辨率,乘于 λ/D 即为系统成像角分辨率,为此,已知系统成像角分辨率,采取逆向顺序,根据系统成像角分辨率得到对应的MTF,与衍射系统MTF比较确定MTF下降值,此值即为抖动引起的MTF,进而可定量确定相应抖动分布下的抖动量.

抖动要求定量分析流程见图2.

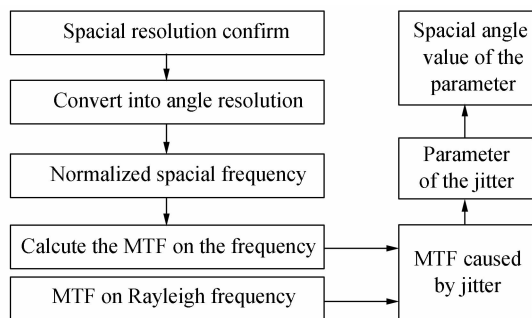


图2 抖动要求定量分析流程

Fig. 2 The flow of ration analysis on jitter requirement

具体流程为:

- 1)将空间分辨率要求转换为角分辨率;
- 2)用截止分辨率 λ/D 除以角分辨率,确定与分辨率相对应的归一化空间频率;
- 3)计算此归一化空间频率下的在系统MTF MTF_1 (不含抖动)中对应的调制值 M_1 ,瑞利极限归一化空间频率对应的调制值 M_2 , MTF_1 计算方法为

$$MTF_1 = MTF_0 \cdot MTF_d \cdot MTF_e \quad (15)$$
- 4)用 M_2 除以 M_1 的值 M_3 ,即为 MTF_m ;
- 5)根据 MTF_m ,解方程(10)、(11)、(12)、(14),即可得到相应的参量值(σ 、 d 、 a 或 d_{sind});
- 6)将参量值乘于截止分辨率 λ/D ,得到相应的物空间角度值.

3 仿真计算分析

3.1 抖动引起的MTF仿真分析

设各抖动量 σ 、 d 、 a 、 a_d 均为0.4,成像积分时间为20ms,低频抖动为10Hz;根据式(10)~(12)及(14),仿真得到各抖动下的MTF见图3.可以看出,低频正弦抖动引起的MTF值远大于高频抖动引起的MTF值,即其对系统MTF的衰减最小;高频正弦抖动与线性抖动的MTF值出现负值,说明相位发生了反转;在空间频率低频段,高频高斯抖动对全系统的MTF值影响相对较大,在空间频率高频段,高频线性抖动对全系统的MTF值影响相对较大.

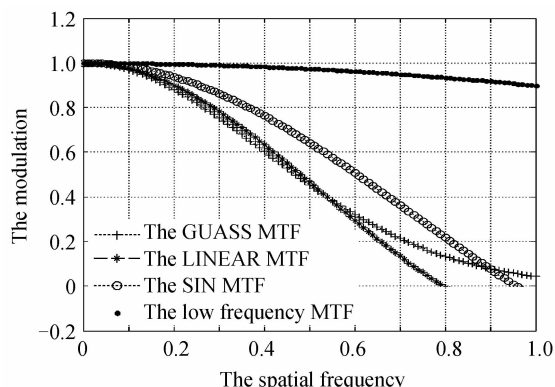


图3 抖动引起的MTF

Fig. 3 The MTF caused by jitter

3.2 抖动定量分析

光电成像系统口径为 0.6 m, 成像中心波段为 $0.6 \mu\text{m}$, 角分辨率选取范围为 $10 \sim 50 \mu\text{rad}$, 对应于 100 km 的分辨率为 $1 \sim 5 \text{ m}$, 成像积分时间为 20 ms, 低频抖动为 10 Hz. 根据抖动定量分析方法, 对不同分辨率下的抖动进行了分析, 分析结果见图 4.

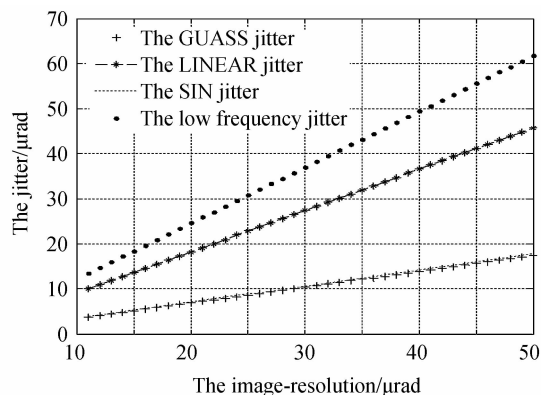


图 4 不同成像分辨率下的抖动

Fig. 4 The jitter on different image-resolution

在成像角分辨率为 $10 \mu\text{rad}$ 条件下, 高频高斯、正弦、线性及低频线性四种抖动可允许的最大视轴抖动量分别为 $3.75, 3.88, 9.97, 13.47 \mu\text{rad}$; 在成像角分辨率为 $50 \mu\text{rad}$ 条件下, 高频高斯、正弦、线性及低频线性四种抖动可允许的最大视轴抖动量分别为 $17.37, 17.77, 45.73, 61.79 \mu\text{rad}$. 可以看出, 在一定成像分辨率条件下, 低频视轴抖动可允许值最大, 其次为高频线性抖动可允许值, 最后为高频正弦与高斯抖动可允许值.

成像积分时间为 20 ms 不变, 根据式(13), 可得到在角分辨率为 $10 \mu\text{rad}$ 下, 不同频率下的低频视轴抖动可允许值见图 5, 对于 10 Hz 频率可允许的最大低频抖动为 $13.47 \mu\text{rad}$, 对于 1 Hz 频率可允许的最大低频抖动为 $134.73 \mu\text{rad}$. 可以看出, 频率越低, 可允许的抖动量越大.

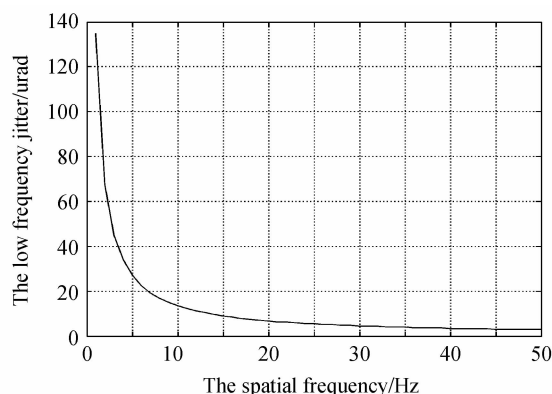


图 5 不同频率下的低频抖动

Fig. 5 The low frequency jitter on different frequency

4 结论

本文建立了含抖动的光电成像系统的全系统 MTF 模型. 提出了一种基于成像分辨率的光电成像系统抖动要求分析方法, 给出了该方法的基本原理和具体实现流程, 从而解决了特定成像分辨率下系统抖动定量分析难题. 结合特定光电成像系统参量仿真分析结果可以看出: 在一定成像分辨率条件下, 低频视轴抖动可允许值最大, 其次为高频线性抖动可允许值, 最后为高频正弦与高斯抖动可允许值; 频率越低, 可允许的抖动量越大, 验证了该方法的可行性、合理性. 该方法实现了抖动要求的定量分析, 给出了一定成像分辨率下高频高斯、正弦、线性及低频线性四种抖动最大允许值, 为系统设计与实际工作开展提供一定的科学依据.

参考文献

- [1] TITLERTOR P J. Power reduction and fluctuation caused by narrow laser beam motion in the far field[J]. *Apply Optics*, 1973, **12**(4): 423.
- [2] ZHANG Yi-xin. Probability distribution of beam-centre wanders of laser beam in atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **6**(6): 636-641.
张逸新. 激光大气传输束心抖动概率分布[J]. *光学学报*, 1994, **6**(6): 636-641.
- [3] SUCCARY R, ROTMAN S R. Dim point target detection[J]. *Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 2002, **1**: 330-332.
- [4] DING Shuai, KUANG Hai-peng, WANG De-jiang, et al. Influence of detector sampling frequency to optics diffraction frequency ratio on aviation image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 828-831.
丁帅, 匡海鹏, 王德江, 等. 探测器采样频率与光学系统衍射截止频率比值对航空图像质量的影响[J]. *光子学报*, 2013, **42**(7): 828-831.
- [5] ZHU Ke-zheng, ZHAO Bao-sheng, ZOU Yuan-xin, et al. Optical transfer function of motive image for the photo-electronic imaging Systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1465-1460.
朱克正, 赵宝升, 邹远鑫, 等. 光电成像系统动像光学传递函数[J]. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1456-1460.
- [6] LI Yun-chuan, LIN Bin, CAO Xiang-qun. Optical transfer function of the optical low-pass filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1693-1696.
李云川, 林斌, 曹向群. 光学低通滤波器的光学传递函数分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1693-1696.
- [7] WU Yun-long, SHAO Li, ZHANG Kai. Image metric analysis of laser jamming effect based on wavelet energy and spot size[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 832-838.
吴云龙, 邵立, 张恺. 基于小波能量和光斑尺寸的干扰图像尺度分析[J]. *光子学报*, 2013, **42**(7): 832-838.
- [8] SIEINVALLO O. Performance of laser tracking of small targets during turbulence and beam jitter[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(7): 1609-1621.
- [9] ACITO N, CORSINI G, DIANI M. Detection performance loss due to jitter in naval IRST systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, **44**(1): 326-338.

- [10] HADAR O, ROTMAN S R, KOPEIKA N S. Target acquisition probability for image motion and vibration[C]. SPIE, 1994, **2224**: 108-119.
- [11] SCHNEE BERGER T J. Limits on line-of-site jitter derived from image resolution requirements[C]. SPIE, 1994, **2221**: 704-710.
- [12] AL-HABASH M A, ANDREWS L C, PHILIPS R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(8): 1554-1562.
- [13] TAN Bi-tao, JING Chun-yuan, ZHANG Xin, *et al.* Research on imaging simulation of electro-optical system for space target[J]. *Computer Simulation*, 2009, **29**(5): 240-243.
- 谭碧涛,景春元,张新,等. 光电系统对空间目标成像仿真技术研究[J]. 计算机仿真, 2009, **29**(5):240-243.