

文章编号 1004-924X(2015)01-0001-09

## 光电成像系统的性能优化

韩 昌 元

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**探讨了光学系统和阵列探测器构成的光电成像系统的整体性能和优化设计问题。针对阵列探测器的不断快速更新换代,研究了如何对光学系统进行改进以优化光电成像系统的性能。从采样成像系统的取样定理出发,研究了光电成像系统的传递函数特性,讨论了采样成像系统的相位平均传递函数,分析了光电成像系统的加工与使用误差对传递函数的影响。同时,给出了光电成像系统的信噪比计算公式。文中提出用于遥感观测的大型光电成像系统的光学系统传递函数的归一化空间频率等于 0.5 左右可与阵列探测器的奈奎斯特频率相匹配。结果显示,如此设计可在满足信噪比的同时使传递函数在奈奎斯特频率处达到 0.1 左右,分辨率达到奈奎斯特频率并且不产生频谱混叠效应。

**关键词:**光电成像系统;光学设计;像质评价;传递函数;信噪比

**中图分类号:**TH703;TP73 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0001

## Performance optimization of electro-optical imaging systems

HAN Chang-yuan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: hancy962@sohu.com

**Abstract:** The whole performance of an electro-optical imaging system consisting of optical systems and array detectors was explored and optimizing design of the system was discussed. As array detectors were developed and updated in a higher speed, how to improve the optical system to optimize the whole performance of electro-optical imaging system was researched. According to the sampling theory of the sampled electro-optical imaging system, the Modulation Transfer Function (MTF) characteristics of the electro-optical imaging system were studied and the MTF phase average concept for the sampled electro-optical imaging system was discussed. Then, the effect of fabrication and use errors of the electro-optical imaging system on the MTF was analyzed and the calculation formulas of the signal-to-noise ratio of the electro-optical imaging system were given. For a remote sensing electro-optical imaging system, it suggests that the optical system MTF normalized spatial frequency should be set to be 0.5 for matching with the Nyquist frequency of the array detector. By which the system satisfies the demand of the signal-to-noise ratio, the MTF at Nyquist frequency reaches 0.1, and the resolution power is close to Nyquist frequency without the spectrum aliasing.

**Key words:** electro-optical imaging system; optical design; image quality evaluation; Modulation Transfer Function(MTF); signal-to-noise ratio

收稿日期:2014-10-13;修订日期:2014-10-30.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20140101057JC)

## 1 引言

光电成像系统性能的评价主要涉及光学系统和阵列探测器构成的光电成像系统的整体性能和优化设计。一般来说,光电成像链路包括:目标和背景、大气传输、光学系统、探测器与电子线路、数据压缩与储存、数据传输、数据接收与处理、图像重构、图像的后处理、显示器和人眼观测等环节<sup>[1-2]</sup>。这些环节涵盖了光学、材料与机械学、探测器与电子学、无线电通信、光通信与网络、图像处理、热控和自动控制等多个前沿科学领域。光电成像系统的指标要求可分为功能指标和性能指标。功能指标包括:主要任务、使用环境条件、运输条件、尺寸、重量、功耗和寿命等;性能指标包括:分辨率、传递函数、信噪比、畸变、光谱特性、偏振特性、光辐射能量特性、灰度等级、取样的空间和时间间隔等<sup>[3-5]</sup>。

目前,阵列探测器的更新换代速度很快,为使光学成像系统跟上阵列探测器的发展趋势,本文对光电成像系统的重要性能指标:传递函数和信噪比进行了优化。

## 2 光电成像系统的物像关系

一般的 CCD 相机成像系统的物面光强(在所

使用的光谱范围内的积分值)分布  $o(x, y)$  和像面光强分布  $i(x, y)$  的关系为:

$$i(x, y) = [o(x, y) * h(x, y) * \text{rect}(x/a_x, y/a_y)] \times \text{comb}(x/d_x, y/d_y), \quad (1)$$

式中:  $h(x, y)$  为光学系统的点扩散函数;  $a_x, a_y$  表示 CCD 像元在  $x, y$  方向的尺寸;  $d_x, d_y$  表示 CCD 像元间距在  $x, y$  方向的值;  $*$  代表卷积。

对式(1)进行傅里叶变换,得到像和物空间频谱之间的关系:

$$I(f_x, f_y) = [O(f_x, f_y) \times H(f_x, f_y) \times \text{sinc}(a_x f_x, a_y f_y)] * \text{comb}(d_x f_x, d_y f_y), \quad (2)$$

式中:  $H$  表示光学系统的传递函数,  $\text{sinc}(a_x f_x, a_y f_y)$  表示 CCD 像元尺寸决定的 CCD 几何光学传递函数。这两项的乘积代表光学系统与 CCD 接收器总的光电成像系统的传递函数。而这个传递函数与梳状函数  $\text{comb}(d_x f_x, d_y f_y)$  的卷积要作用在物谱上,形成像的谱。在下面的讨论中假设  $a_x = a_y = a = d_x = d_y = d$ 。

## 3 取样定律<sup>[1-2]</sup>

设函数  $f(x)$  的截止空间频率为  $u_c$ , 图 1 表示带极限函数  $f(x)$  和频谱  $F(u)$ , 带极限图像的取样成像频谱如图 2 所示。

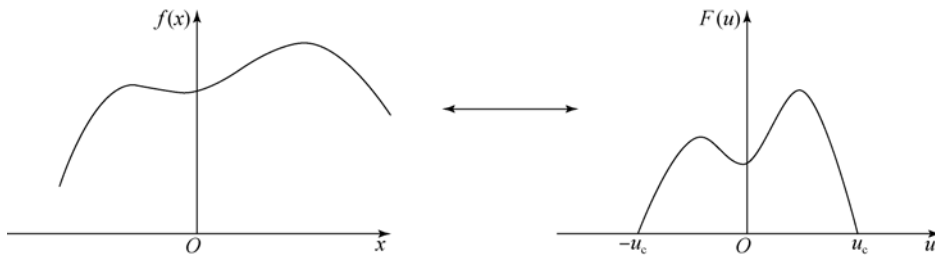


图 1 带极限函数和频谱

Fig. 1 Band limited function and frequency spectrum

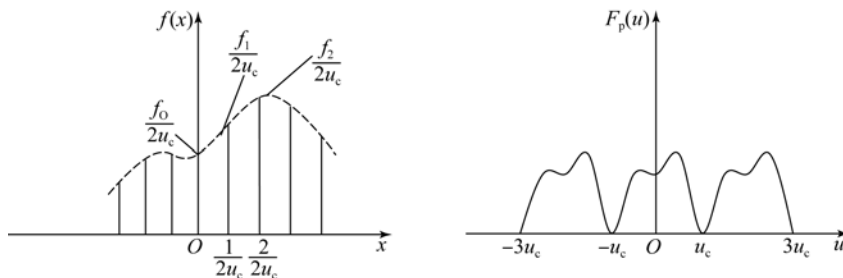


图 2 取样函数的周期谱

Fig. 2 Periodic spectra of sampling function

当像面的取样间隔  $d \leq 1/2 u_c$  时,空间频谱没有混叠,像不失真;当像面的取样间隔  $d > 1/2 u_c$  时,空间频谱产生混叠,导致像失真。带极限空间频率  $u_c$  称作奈奎斯特频率,  $u_c = 1/2d$ , 例如,像元间距  $d = 0.01 \text{ mm}$ , 则奈奎斯特频率  $u_c = 50 \text{ lp/mm}$ , 这是空间分辨率的极限(带极限)。

#### 4 理想光电成像系统的传递函数<sup>[1-2,5]</sup>

像元尺寸为  $d \times d$  的阵列探测器形成尺寸为  $d \times d$  的方形点扩散函数。光学传递函数是点扩散函数的傅里叶变换,设归一化的空间频率为:  $u_1 = u/2 u_c = du$ ,  $d$  为像元尺寸,探测器的截止空间频率为  $1/d$ ,  $u$  为没有归一化的空间频率。例如,  $d = 0.01 \text{ mm}$ ,  $u = 100 \text{ lp/mm}$ , 那么  $u_1 = du = 1$ ; 或  $d = 0.01 \text{ mm}$ ,  $u_c = 50 \text{ lp/mm}$ , 那么  $u_1 = du_c = 0.5$ 。探测器的几何传递函数为:

$$F(u) = \text{sinc}(du) = \frac{\sin(\pi du)}{\pi du}. \quad (3)$$

图 3 为探测器的几何传递函数曲线。

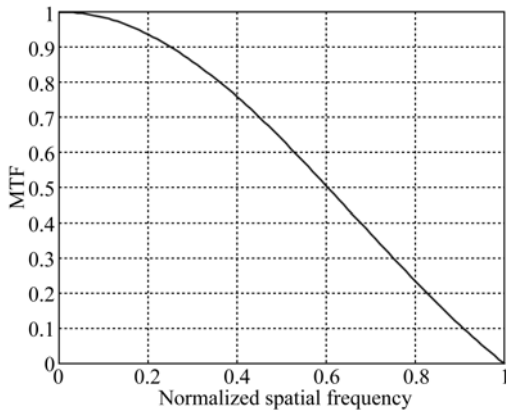


图 3 探测器几何传递函数曲线

Fig. 3 Geometrical Modulated Transfer Function(MTF) of detector

圆开口理想光学系统的光学传递函数表示为:

$$\text{OTF}(u) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \left( \frac{u}{2 u_c} \right) - \left( \frac{u}{2 u_c} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{u}{2 u_c} \right)^2} \right], \quad (4)$$

其中:  $2 u_c$  为光学系统的截止空间频率,  $2 u_c = \frac{1}{\lambda F}$ ,  $\lambda$  为波长,  $F$  为相对孔径数。

图 4 为理想光学系统的传递函数曲线。

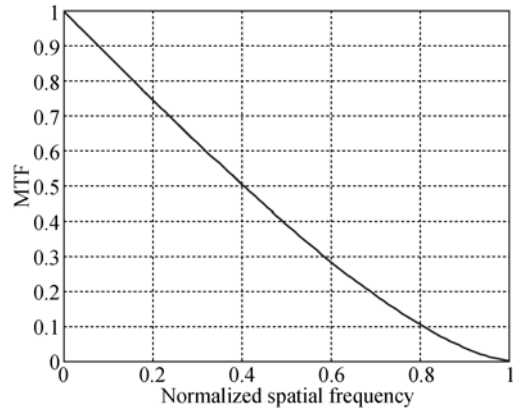


图 4 理想光学系统传递函数曲线

Fig. 4 Modulated Transfer Function(MTF) of perfect optical system

光电成像系统的传递函数是探测器和光学系统传递函数的乘积。当探测器的传递函数归一化为  $u_1 = du = u/2 u_c$ ; 理想光学系统的传递函数归一化为  $u_1 = u \lambda F = u/2 u_c$  时,探测器和理想光学系统具有相同的归一化频率。图 5 为探测器几何、理想光学系统和理想光电成像系统的传递函数曲线。

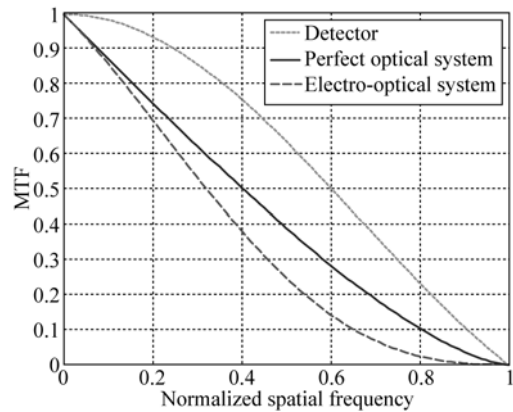


图 5 探测器几何、理想光学系统和理想光电成像系统的传递函数曲线

Fig. 5 MTF curves of perfect detector, perfect optical system and electro-optical system

归一化频率 0.5 处(奈奎斯特频率)探测器的传递函数为 0.637,理想光学系统的传递函数为 0.39,理想光电成像系统的传递函数为 0.25。如果探测器的像元尺寸  $d = 0.007 \text{ mm}$ ,光学系统的中心波长  $\lambda = 625 \text{ nm}$ ,则奈奎斯特频率  $u_c = 71.4 \text{ lp/mm}$ ,理想光学系统的相对孔径数  $F = 11.2$ 。

## 5 光电成像系统的优化设计

优化设计的目标是在满足使用要求的前提下,折中光学设计和电学设计,使整个光电成像系统的成本最低,完工时间最短。

探测器的传递函数主要由探测器的几何尺寸、电荷扩散、电荷转移效率和位相时钟等决定<sup>[1]</sup>。光学系统的传递函数主要由光学系统设计、加工装配、环境试验、运输、使用环境(温度,湿度,气压,重力)、调焦误差、像移、姿态稳定性等决定<sup>[3-5]</sup>。而探测器和光学系统影响传递函数的因子各自独立,即各分系统的传递函数相乘得到最终光电成像系统的传递函数。

设计光学系统时,根据作用距离、成像倍率、像元尺寸和瞬时视场角的要求决定光学系统的焦距;根据信噪比和传递函数要求决定相对孔径;根据画面尺寸决定视场角;根据成像质量要求、加工难度和使用环境条件决定光学设计的传递函数余量。

先根据理想光学系统的艾里斑直径和阵列探测器像元尺寸的关系讨论理想光电成像系统的传递函数。然后再考虑设计、加工和使用中产生的传递函数,优化光电成像系统。

因为理想光学系统的艾里斑直径为  $2.44\lambda F$ ,探测器像元尺寸为  $d$ ,理想光学系统传递函数的截止频率为  $1/\lambda F$ ,探测器几何传递函数的截止频率为  $1/d$ ,当艾里斑直径占一个像元尺寸时,  $2.44\lambda F = d, 1/\lambda F = 2.44/d$ ,此时传递函数如图 6 所示。

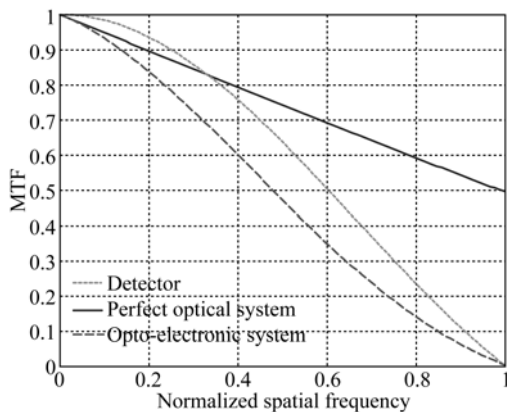


图 6 艾里斑直径等于 1 个像元时的传递函数

Fig. 6 MTFs for Airy disc equal to one element of detector

这是明显的欠采样系统,即探测器受限系统。奈奎斯特频率(归一化频率 0.5)以上有较大的传递函数,将产生频谱混叠效应,像会失真,例如基于红外大尺寸像元阵列探测器的红外光电成像系统。这时可以用增加空间采样频率的方法来提高分辨率。

图 7 为艾里斑直径等于 2 个像元时的传递函数。

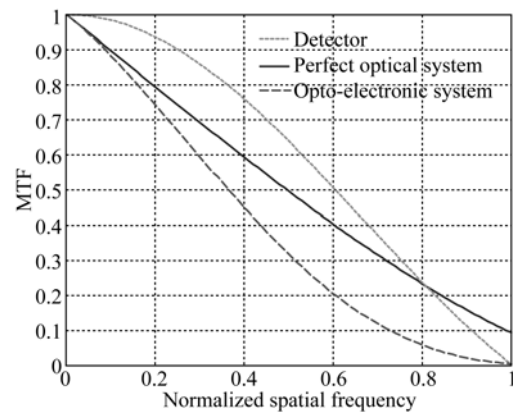


图 7 艾里斑直径等于 2 个像元时的传递函数

Fig. 7 MTFs for Airy disc equal to two elements of detector

这也是欠采样系统。一般的大口径长焦距光学系统,如空间相机、航空相机、大型光电跟踪经纬仪、天文望远镜等,因为加工装配和使用环境等条件限制,实际使用时传递函数要比设计值低很多,因此都采取这种设计方案。

图 8 为艾里斑直径等于 3 个像元时的传递函数。

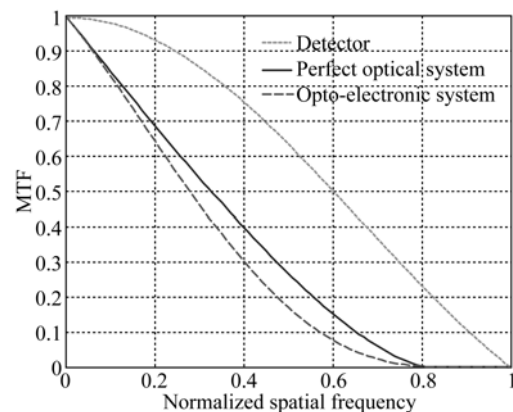


图 8 艾里斑直径等于 3 个像元时的传递函数

Fig. 8 MTFs for Airy disc equal to three elements of detector

一般中小型光电成像系统认为这是比较合适的采样。此时光电成像系统的传递函数在奈奎斯特频率处(归一化空间频率为 0.5 处)较容易达到 0.1。

图 9 为艾里斑直径等于 4 个像元时的传递函数。

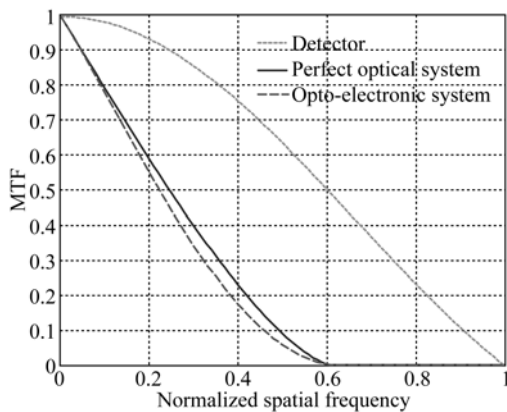


图 9 艾里斑直径等于 4 个像元时的传递函数

Fig. 9 MTFs for Airy disc equal to four elements of detector

这是采样间隔足够密的光学受限系统,光电成像系统的分辨率达到了光学系统的分辨率。这时奈奎斯特频率以上的传递函数很低,可忽略频谱混叠效应。一般短焦距镜头配备阵列探测器,及在实验室等较好的环境下使用的光电成像系统均可采用这种设计。

在弹道相机和星敏感器等应用中,不考虑分辨率,主要考虑目标的定位精度。用目标在多个像元形成的灰度值,通过质心计算确定目标的亚像元精度的位置。为此采用像方远心光路光学系统和离焦的像面法。这时弥散斑直径占阵列探测器的 3~5 个像元,而且要求光学系统的弥散斑对称。显然,如果像点尺寸在阵列探测器一个像元之内,则目标的定位精度只能达到一个像元精度,达不到亚像元精度。

## 6 光电成像系统的加工与使用误差对传递函数的影响

实际的光电成像系统由于设计、制造和使用误差等,传递函数要下降。光学方面主要因素有波像差、像面的离焦和像移。

### 6.1 波像差与传递函数<sup>[1,5]</sup>

光学系统的最终波像差是设计、加工装调、环境模拟试验、运输、使用环境变化等引起的总的波像差。总的波像差均方根  $W_{rms}$  由各独立产生的波像差均方根的值平方相加后开方得到。在实际使用状态下  $W_{rms}$  与光学系统传递函数的下降因子  $ATF(\nu)$  的关系为:

$$ATF(\nu) = \left\{ 1 - \left[ \frac{W_{rms}}{0.18} \right]^2 \right\} [1 - 4(\nu - 0.5)^2] \quad (5)$$

式中:  $W_{rms}$  的单位是波长,  $\nu$  为光学系统的归一化空间频率。

当  $W_{rms} = 0.05, 0.07, 0.1, 0.125$  时,  $ATF(\nu)$  的计算结果如图 10 所示。

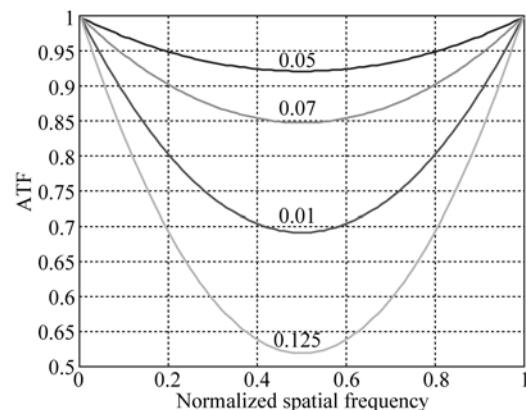


图 10 波像差均方根对传递函数下降因子的影响

Fig. 10 Effect of rms wave-front error on coefficient of MTF

从计算结果看,归一化空间频率为 0.5 时传递函数下降最大。一般大型工程光学中认为:接近衍射极限光学系统的波像差均方根的值  $0.07\lambda$ ;在第一个衍射环内集中点像能量的 80%;中心点亮度为 0.8。由图 10 中可知,这时归一化空间频率 0.5 处的传递函数下降至 0.85。以空间相机为例,光学系统总的波像差均方根  $W_{rms}$  值应该满足这个公差指标的要求。

### 6.2 离焦的传递函数<sup>[2,5]</sup>

在实际使用中,光电成像系统的调焦误差对系统的传递函数影响很大,必须严格控制<sup>[6]</sup>。当离焦的弥散斑直径为  $d$  时,离焦的传递函数

MTF( $u$ )为:

$$MTF(u) = \frac{2J_1(\pi ud)}{\pi ud}, \quad (6)$$

式中: $ud$ 为归一化的空间频率。离焦的弥散斑直径分别为探测器像元尺寸 $d$ 的10%,20%,30%,40%,50%,100%时,离焦的传递函数如图11所示。

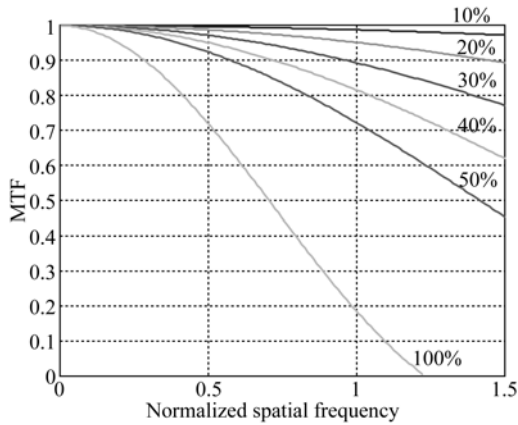


图 11 离焦的传递函数

Fig. 11 Defocus and MTFs

从计算结果看,离焦的弥散斑直径必须控制在探测器像元尺寸的30%以内。这时奈奎斯特频率处的传递函数下降至0.98。由此可得出调焦公差。

### 6.3 像移与传递函数<sup>[1-3]</sup>

在实际应用中,曝光时间内像在像面内移动会引起像移,使光电成像系统的传递函数下降<sup>[7]</sup>。典型的像移包括线性移动<sup>[8-9]</sup>、高频随机振动<sup>[1,10]</sup>和正弦振动<sup>[1]</sup>。

线性像移为 $d$ 时像移传递函数表示为:

$$MTF(u) = \frac{\sin(\pi ud)}{\pi ud} = \text{sinc}(ud), \quad (7)$$

式中: $ud$ 为归一化空间频率。当线性像移分别为探测器像元尺寸 $d$ 的10%,20%,30%,40%,50%,100%时,像移传递函数如图12所示。

用线阵 CCD 扫描成像的空间相机和航空相机沿飞行方向有一个像元尺寸的像移,从图12中对应100%的曲线看出,沿飞行方向的传递函数将在奈奎斯特频率降至0.637。用TDICCD扫描成像时,由于像移速度与探测器的行转速率不匹配而引起的像移也可用类似的方法处理<sup>[9]</sup>。用面

阵 CCD 凝视成像时,像移补偿误差产生的传递函数也可用这个公式计算。

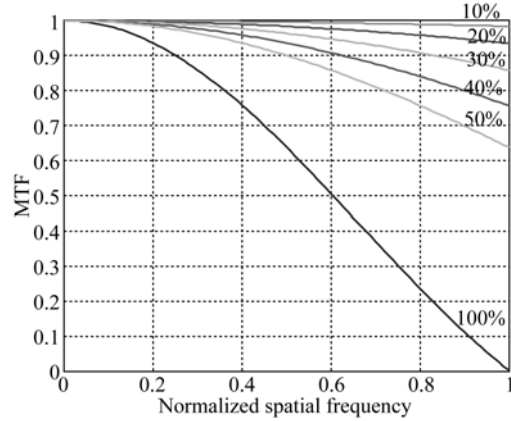


图 12 线性像移的传递函数

Fig. 12 Linear motions and MTFs

视轴高频随机振动引起的传递函数为:

$$MTF_{\text{random}}(u) = \exp[-2(\pi\sigma u)^2], \quad (8)$$

式中: $\sigma$ 表示像点随机移动形成的弥散斑均方根直径,空间频率 $ud$ 已归一化为探测器的截止频率。 $\sigma$ 与探测器像元尺寸 $d$ 的比值分别为10%,20%,30%,40%,50%,100%时,传递函数如图13所示。

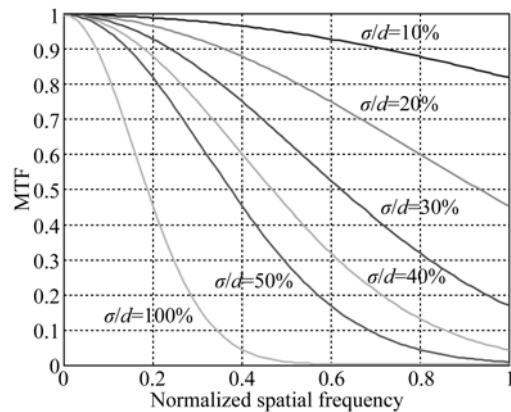


图 13 随机振动引起的传递函数

Fig. 13 Random motions and MTFs

从计算结果看,视轴高频随机振动引起的均方根弥散斑直径不应超过探测器像元尺寸的10%,这时在奈奎斯特频率处传递函数下降至0.95。

视轴高频正弦振动引起的传递函数为:

$$MTF_{\text{sinusoidal}}(u) = J_0(2\pi u), \quad (9)$$

式中:  $a$  表示正弦振动的振幅, 空间频率  $ud$  已归一化为探测器的截止频率。  $2a$  与探测器像元尺寸  $d$  的比值分别为 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 100% 时, 传递函数如图 14 所示。

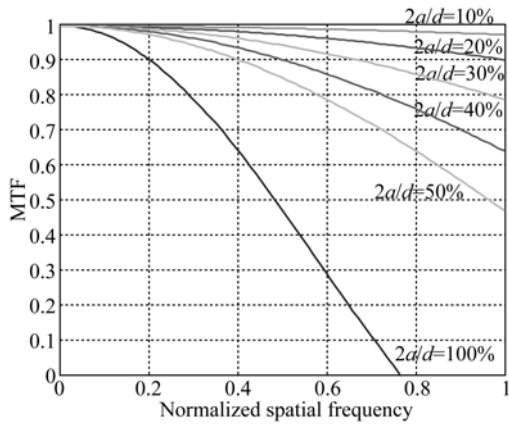


图 14 正弦振动引起的传递函数  
Fig. 14 Sinusoidal motions and MTFs

从计算结果来看, 要控制视轴高频正弦振动的振幅  $a$ , 把  $2a$  控制在探测器像元尺寸的 30% 以内, 则在奈奎斯特频率处的传递函数下降至 0.95。

总的光学系统的传递函数由光学设计、波像差、离焦和像移产生的传递函数相乘得到。

对于光学遥感中的大型光电成像系统, 建议光学系统传递函数的归一化空间频率在 0.5 左右, 并与阵列探测器的奈奎斯特频率相匹配。最终阵列探测器和相关电子学系统在奈奎斯特频率处的传递函数能够控制到 0.5 左右; 光学系统加工后实际使用时在奈奎斯特频率处的传递函数控制到 0.2 左右; 最终光电成像系统在奈奎斯特频率处的传递函数控制到 0.1 左右。此时如果目标的调制对比度为 0.3, 则显示像的调制对比度为 0.03, 人眼可以分辨这个调制对比度, 所以能满足一般的使用要求。

## 7 光电成像系统的平均传递函数<sup>[1-3]</sup>

光学传递函数应该用于线性空间不变系统, 但阵列探测器取样成像系统不满足空间不变条件。为了满足空间不变条件, 采用相位平均的传递函数。相位平均传递函数随空间频率的变化表示为  $\text{sinc}(du)$ , 奈奎斯特频率等于 0.637, 如图 15 表示。

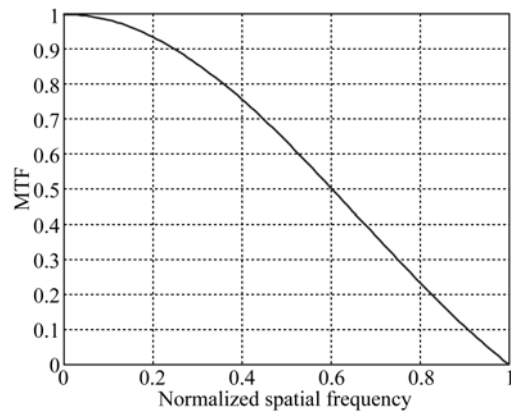


图 15 相位平均传递函数随空间频率的变化  
Fig. 15 Variation of phase averaged MTF with spatial frequency

在奈奎斯特频率处传递函数随相位  $\Phi$  的变化有  $\cos \Phi$  的关系, 如图 16 表示。

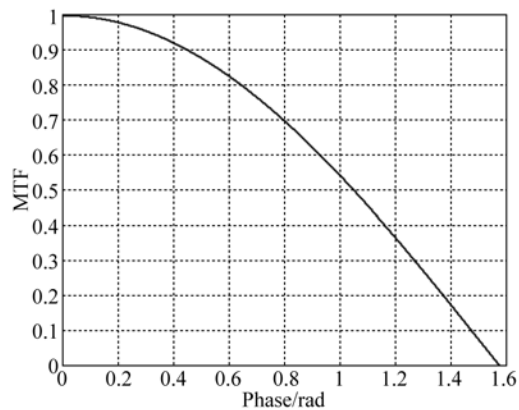


图 16 在奈奎斯特频率处传递函数随相位的变化  
Fig. 16 Variation of MTF with phases at Nyquist frequency

图 16 中, 横坐标是相位, 用弧度表示, 纵坐标是归一化的传递函数。这个函数取相位从  $0 \sim \pi/2$  的平均值等于 0.637, 与图 15 的结果一致。

目前在一般的工程应用中, 规定相位等于 0 时的传递函数值作为工程技术指标。

## 8 光电成像系统的信噪比<sup>[3,5]</sup>

信噪比是除传递函数外又一个重要的光电成像系统的性能指标<sup>[11]</sup>。一般用能量形式表示红外系统的信噪比, 用光子形式表示可见光系统。

红外经纬仪的信噪为:

$$\text{SNR} = \frac{A_T A_0}{R^2 (A_d \Delta f)^{1/2}} (L_T - L_B) \tau_a \tau_0 D^* \Delta \lambda, \quad (10)$$

式中:  $A_T$  为目标面积;  $A_O$  为光学系统的入瞳面积;  $L_T$  为目标亮度;  $L_B$  为背景亮度;  $\tau_a$  为大气透过率;  $\tau_o$  为光学系统的透过率;  $D^*$  为探测器的比探测率;  $\Delta\lambda$  为光谱波长范围;  $R$  为作用距离;  $A_d$  为对应于目标面积  $A_T$  的探测器面积(如果  $A_d$  表示探测器的像元面积, 目标在探测器占  $N$  个像素, 则目标面积  $A_T$  改为  $A_T/N$ );  $\Delta f$  为系统噪声的等效带宽,  $\Delta f = 1/2 t_{int}$ ;  $t_{int}$  为探测器的积分时间。

可见光经纬仪的信噪比为:

$$SNR = \frac{(n_T - n_B)}{\sqrt{n_B}} = \frac{(A_T A_O t_{int} / R^2 h\nu)(L_T - L_B) \tau_a \tau_o \eta \Delta\lambda}{\sqrt{(A_T A_O t_{int} / R^2 h\nu) L_B \tau_a \tau_o \eta \Delta\lambda}}, \quad (11)$$

式中:  $n_T$  为目标产生的电子数,  $n_B$  为背景产生的电子数,  $h\nu$  为一个光子的能量,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为光波频率,  $\eta$  为探测器的量子效率。

红外空间相机的信噪比为:

$$SNR = \frac{\pi \sqrt{A_d}}{4 F^2 \sqrt{\Delta f}} L \tau_a \tau_o D^* \Delta\lambda, \quad (12)$$

式中:  $F$  为光学系统的相对孔径数;  $L$  为地面的辐射亮度。

可见光空间相机的信噪比为:

$$S_e = \frac{\pi A_d M t_{int} L_o \tau_o \eta}{4 F^2 h\nu},$$

$$N_e = \sqrt{S_e + \sigma_R^2 + D_e},$$

$$SNR = \frac{S_e}{N_e} = \frac{S_e}{\sqrt{S_e + \sigma_R^2 + D_e}}, \quad (13)$$

## 参考文献:

- [1] HOLST G C. *Electro-Optical Imaging System Performance* [M]. Fourth edition. Copublished by JCD Publishing Winter Park, Florida USA and SPIE Press, Bellingham, Washington USA, 2006.
- [2] BOREMAN G D. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems* [M]. SPIE Press, 2001.
- [3] 韩昌元. 航天相机 MTF 分析与辐射标定 [M]. 光学与光学工程. 北京: 科学出版社, 2005: 230-241. HAN CH Y. *MTF Analysis and Radiation Calibration of Space Camera* [M]. Optics and Optical Engineering. Beijing: Science Publishing Company,

式中:  $S_e$  为信号电子数,  $M$  为积分级数,  $L_o$  为相机入口处的辐亮度,  $N_e$  为噪声电子数,  $\sigma_R$  为读出噪声均方根值,  $D_e$  为暗信号输出的电子数。

光电成像系统接受的能量正比于探测器像元面积、光学系统的相对孔径平方、曝光时间。光电成像系统的分辨率及传递函数的截止频率与采样间距成反比, 与光学系统的相对孔径成正比。在阵列探测器的像元尺寸越来越小的趋势下, 要正确地匹配阵列探测器的像元尺寸和光学系统的相对孔径, 以同时满足光电成像系统的信噪比和传递函数的要求。

## 9 结 论

光电成像系统的性能主要由传递函数和信噪比表示。整个光电成像系统的传递函数主要由光电成像系统在设计、制造和实际使用过程中产生的光学、机械和电子学各分系统的传递函数相乘得到。本文根据不同的使用要求和现有条件, 折中光、机、电等各分系统的设计, 优化了传递函数和信噪比。在实际使用中, 大型光电成像系统的传递函数在采样成像系统的奈奎斯特频率处达到 0.1 左右, 即可满足光电成像系统的使用要求。对于大型光电成像系统, 建议光学系统传递函数的归一化空间频率在 0.5 左右与阵列探测器的奈奎斯特频率相匹配。

2005: 230-241. (in Chinese)

- [4] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172. HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [5] 韩昌元. 光学系统成像质量评价及测试 [M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013. HAN CH Y. *Optical System Image Quality Evaluation and Test* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [6] 孙继明, 郭疆, 邵明东, 等. 大视场时间延迟积分 CCD 遥感相机精密定焦 [J]. 光学 精密工程, 2014,

- 22(3):602-607.  
SUN J M, GUO J, SHAO M D, *et al.*. Precise focusing for TDICCD camera with wide field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 602-607. (in Chinese)
- [7] 王国良,刘金国,龙科慧,等. 离轴三反航天测绘相机像移对成像质量的影响 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(3):806-813.  
WANG G L, LIU J G, LONG K H, *et al.*. Influence of image motion on image quality of off-axis TMA aerospace mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3):806-813. (in Chinese)
- [8] 赵鹏,曹军,韦兴竹. 匀速直线运动模糊图像的模糊系数鲁棒识别 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2430-2438.  
ZHAO P, CAO J, WEI X ZH. Identification of robust blur parameter for uniform linear motion blurred images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2430-2438. (in Chinese)
- [9] 郭汉洲,吕恒毅,曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8):2195-2200.  
GUO H ZH, LÜ H Y, QU L X. Relation of line transfer period error and dynamic MTF of TDICCD in remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2195-2200. (in Chinese)
- [10] 陶小平,罗霄,薛栋林. 地球静止轨道面阵凝视成像系统分时积分抑振技术 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8):2169-2179.  
TAO X P, LUO X, XUE D L. Vibration suppression based on multiple integration for staring imaging system in geostationary orbit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2169-2179. (in Chinese)
- [11] 李豫东,汪波,郭旗,等. CCD 与 CMOS 图像传感器辐射效应测试系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(11):2778-2784.  
LI Y D, WANG B, GUO Q, *et al.*. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS imaging sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11):2778-2784. (in Chinese)

#### 作者简介:



韩昌元(1940—),男,吉林延吉人,研究员,主要从事光学遥感仪器的光学设计与光学测试技术的研究。E-mail: hancy962@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)