

# 利用红外焦平面调制传递函数曲线计算串音值

许中华<sup>1,2</sup> 方家熊<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 串音使得焦平面输出信号的对比度降低,进而影响系统的调制传递函数(MTF)。随着器件的发展,用 MTF 来评价器件越来越受到重视;从民用领域的趋势看,MTF 将逐步取代传统的串音、极限分辨率等参数。这就使得现阶段搭建串音专用测量设备处于进退两难的地位。考虑到串音和 MTF 间的密切联系,从串音的定义和传统测量方法出发,分析了串音和 MTF 间存在的定量关系,指出在 Nyquist 频率处串音影响下的总体 MTF 与无串音时的总体 MTF 存在一最大差值;据此得出了从实测红外焦平面 MTF 曲线计算百分比串音值的一种新方法。

**关键词** 探测器;红外焦平面阵列;串音;调制传递函数;Nyquist 频率

**中图分类号**           **文献标识码** A           **doi**: 10.3788/LOP48.041101

## Crosstalk Calculation from Modulation Transfer Function Curves of Infrared Focal Plane Arrays

Xu Zhonghua<sup>1,2</sup> Fang Jiexiong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Crosstalk will lower down the modulation of the output signal of focal plane arrays (FPA), and then degrade the system's overall modulation transfer function (MTF). With the development of photoelectric devices, using MTF to evaluate the performances of photoelectric devices is becoming more and more popular. Seen from the trend in civil imaging field, MTF will gradually replace typical parameters such as crosstalk and extreme resolution in evaluation of photoelectric devices. And this makes it a dilemma to decide whether to build a dedicated equipment for crosstalk measurement or not. Considering the relation between crosstalk and MTF, their correlation is analyzed qualitatively, starting from the definition and typical measurement method of crosstalk. It is pointed out that the difference between system's overall MTF with and without crosstalk maximizes at the Nyquist frequency. Based on this, a new method of calculating percentage crosstalk from measured MTF curves of infrared FPAs is got.

**Key words** detectors; infrared focal plane arrays; crosstalk; modulation transfer function; Nyquist frequency

**OCIS codes** 110.4850; 040.3060; 230.5160

## 1 引言

调制传递函数(MTF),定义为输出信号调制度与输入信号调制度的比值;它亦为光学传递函数(OTF)的模,是一种在空间频率域内考察光学系统成像质量的方法。其原理是将输入信息分解成各种空间频率分量,然后分析这些空间频率分量在通过系统的传递过程中,丢失、衰减等变化,也就是研究系统的空间频率传递特性。相较传统的评价成像质量手段,如星点法和分辨率法等,采用 MTF 可以定量计算和测量成像系统

**收稿日期**: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-11-08

**基金项目**: 国家自然科学基金(50632060)资助课题。

**作者简介**: 许中华(1986—),男,博士研究生,主要从事红外焦平面成像和测试等方面的研究。

E-mail: xzh08@mail.sitp.ac.cn

**导师简介**: 方家熊(1939—),男,中国工程院院士,研究员,主要从事光传感器方面的研究。

E-mail: jxfang@mail.sitp.ac.cn

的分辨率,并对可分辨范围内的像质好坏给予全面评价。因此,无论是航天遥感领域还是民用相机领域都越来越多的采用 MTF 曲线作为评价成像质量好坏的手段。

MTF 在国内发展相对滞后,虽然有部分科研单位在研制 MTF 测量装置<sup>[1~6]</sup>,但现有的对红外成像器件本身的工程评价仍然采用百分比串音、极限分辨率等参数。传统的评价参数正逐步被 MTF 等新的评价参数代替,当前再针对百分比串音建立专门的测量系统,费用甚高且已难以适应工程发展的要求。考虑到 MTF 与串音之间有着密切的联系,若能直接测量红外成像器件本身的 MTF 曲线并从中得到百分比串音,则既满足了工程测量的要求,又可将测量的重心转到更为先进的 MTF 上来。本文将探讨由 MTF 曲线得到串音值的方法。

## 2 串音

当对红外焦平面阵列(FPA)内某个特定光敏元投射光信号时,没有入射光信号的相邻光敏元也有电信号输出,这就是串扰现象。通常把相邻光敏元与特定中心光敏元输出的电信号的百分比称为百分比串音。它既包括焦平面组件内部对入射光的衍射、散射等引起的光学串音,又包括光敏元内载流子扩散等引起的电学串音。因此,在 FPA 的总串音中同时存在着光学和电学贡献,虽然可以在没有入射光时测量其中的电学贡献即所谓“电串音”,但反映 FPA 真实串扰大小的只能是 FPA 的总串音。

对总串音的测量常用到小光点系统,通过准直光学系统和聚焦装置将小的目标(如狭缝、圆孔等)成像到 FPA 的单个光敏元上,测出中心光敏元和邻近光敏元的响应信号就可以得出百分比表示的串音。为了确保光点仅照射 FPA 的一个探测元,光点直径必须很小,比如  $10\ \mu\text{m}$  或者更小值,因此需要用较为昂贵的大尺寸光学元件。也有文献报道使用激光光源与较便宜的光学系统耦合产生小光点的作法<sup>[7]</sup>,但聚焦的小光点直径有限,无法满足焦平面探测元尺寸越来越小化要求。

## 3 串音对 MTF 的影响

在焦平面阵列成像系统中,串音的存在会降低输出信号的对比度,使得系统的 MTF 下降。直接讨论红外焦平面阵列串音对 MTF 影响的文献鲜有报道,但讨论 CCD 和 CMOS 等固态成像器件中光学串音和载流子扩散引起的电学串音对 MTF 影响的文献则非常多<sup>[8~14]</sup>。特别是为讨论电学串音引起的 MTF 衰减,国内外学者建立了各种不同的模型,通过解连续性方程来定量计算载流子扩散引起的 MTF,有不少结论可应用到红外焦平面器件中。

以 Seib<sup>[10]</sup>的前照射模型为例,如图 1 所示。其载流子扩散引起的 MTF 为

$$f_{\text{MTF-diff}}(k) = \frac{1 - \exp(-\alpha L_D)/(1 + \alpha L)}{1 - \exp(-\alpha L_D)/(1 + \alpha L_0)}, \quad (1)$$

式中,  $L_0 = (D_n \tau_n)^{1/2}$ , 载流子扩散长度  $\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + k^2$ ,  $\alpha$  为材料对光的吸收系数。计入串音影响后总的 MTF 为

$$f_{\text{MTF-overall}} = f_{\text{MTF-diff}} \cdot |\text{sinc}(\pi \cdot b_d \cdot k)|, \quad (2)$$

式中  $b_d$  为光敏元宽度。

在同一坐标下绘制  $f_{\text{MTF-diff}}$ ,  $f_{\text{MTF-overall}}$  和理想情况下的  $|\text{sinc}|$  曲线,对不同的  $L_D$ ,  $L_0$  和  $\alpha$ , 曲线的趋势完全相同,如图 2 所示。从图 2 看到,有串音影响下的  $f_{\text{MTF-overall}}$  相对无串音时的  $|\text{sinc}|$  函数,整体向下偏移。在 Nyquist 频率左边,空间频率越大,偏移量越大;在 Nyquist 频率右边,空间频率越大,偏移量越小。在 Nyquist 频率处有最大偏移量。不同串音值下各频率处的偏移量亦不同,若能得到偏移量同串音间的定量

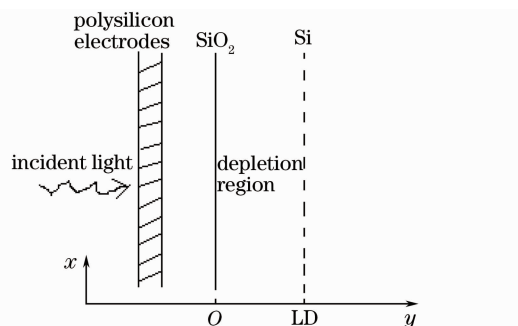


图 1 Seib 前照射模型

Fig. 1 Seib's front-side illuminated CCD model

表达式,则可由 MTF 曲线得到串音。同时还可看到,串音的存在不会对系统的极限分辨率(即图中的第一个零点位置)造成影响。

#### 4 由 MTF 得到串音的方法

为简化计算,作如下几个假定:

1) 忽略不同光敏元间串音值的微小差别,令所有光敏元的串音值均为  $c$ ;

2) 串音仅存在于中心光敏元和它的最邻近光敏元之间;

3) 忽略除串音外其他因素对 MTF 的影响。

小光点串音测试中,投射到单个光敏元上的光斑能量分布为点扩展函数(PSF)。在无串音影响的理想情况下,PSF 形状是宽度为  $b_d$ 、高度为 1 的矩形,如图 3(a)实线所示。 $b_d$  为光敏元的宽度。探测器的 MTF 是 PSF 的傅里叶变换,有

$$f_{\text{MTF-ideal}}(k) = |\text{sinc}(\pi b_d k)|. \quad (3)$$

考虑串音为  $c$  的作用时,中心光敏元分别向两侧的最邻近光敏元转移了  $c$  的能量。PSF 曲线退化为图 3(a)虚线所示,是宽度为  $3b_d$ 、高度为  $c$  的矩形和宽度为  $b_d$ 、高度为  $(1-3c)$  的矩形的组合。相应的 MTF 为

$$f_{\text{MTF-det,crosstalk}}(k) = |(1-3c) \times \text{sinc}(\pi b_d k) + 3c \times \text{sinc}(3\pi b_d k)|. \quad (4)$$

提取  $|\text{sinc}(\pi b_d k)|$  并用三角函数公式对上式进一步进行处理,得

$$f_{\text{MTF-det,crosstalk}}(k) = |1 - 4c \times \sin^2(\pi b_d k)| \times f_{\text{MTF-ideal}}. \quad (5)$$

取  $c = 5\%$ ,将  $f_{\text{MTF-det,crosstalk}}(k)$  绘制在图 3(b)如虚线所示。可以看出,串音作用下 MTF 整体发生了衰减,且在  $k = 0.5/b_d$ ,即探测器 Nyquist 频率处衰减幅度最大,

$$f_{\text{MTF-det,crosstalk}}(0.5/b_d) = (1-4c) \times f_{\text{MTF-ideal}}. \quad (6)$$

(6)式给出了由 MTF 曲线得到百分比表示的串音值  $c$  的一种途径。在得到焦平面组件的 MTF 曲线后,计算 Nyquist 频率处 MTF 与理想的 MTF 的差值  $\Delta f_{\text{MTF-Nyquist}}$ ,而

$$\Delta f_{\text{MTF-Nyquist}} = 4c \times \text{sinc}(\pi b_d \times \frac{0.5}{b_d}) = \frac{8}{\pi} c. \quad (7)$$

于是串音值可由(7)式计算得到。

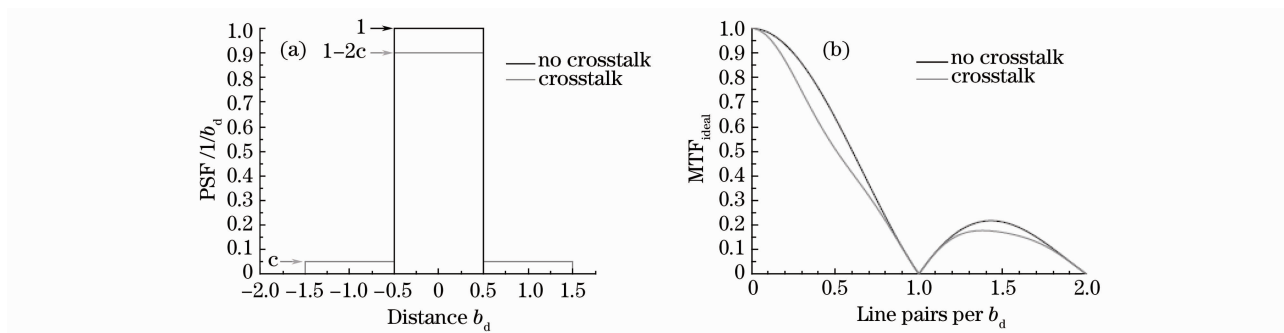


图 3 串音与 MTF 间的关系

Fig. 3 Relation between crosstalk and MTF

#### 5 讨 论

现阶段,为保证一定的成像质量,会要求焦平面器件百分比串音控制在一定的范围内。根据工程应用经验,早些年要求串音小于 10%,最近提高到小于 5%。测量百分比串音是确保器件性能的一种途径,测量 MTF 则提供了一种新的更加全面的确保器件性能的方法。以某项目使用的 8 元线列 InGaAs 短波红外焦

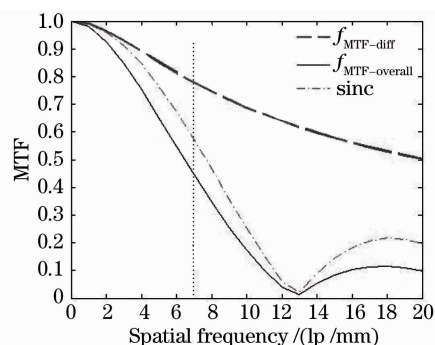


图 2 载流子扩散引起的  $f_{\text{MTF-diff}}$  和  $f_{\text{MTF-overall}}$  曲线

Fig. 2  $f_{\text{MTF-diff}}$  and  $f_{\text{MTF-overall}}$  caused by carriers diffusion

平面探测器为例,其光敏元尺寸为  $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ ,要求串音值小于 5%。从(6)式可知,只要确保探测器 Nyquist 频率 5 lp/mm 处的  $f_{\text{MTF-det,crosstalk}} > (1-4\times 5\%) \times \text{sinc}(0.5\pi) = 0.5093$ ,即可满足工程对器件百分比串音的要求。而且,器件 MTF 除了提供百分比串音包含的信息外,还能直接得到探测器的极限分辨率、各频率处的对比度传递特性等诸多与成像质量息息相关的性能参数。因此,可以考虑在工程应用中使用器件 MTF 来代替百分比串音。

## 6 结 论

介绍了红外焦平面阵列串音的定义、产生原因和典型测量方法,定性分析了串音存在时系统总体 MTF 的变化趋势,指出在 Nyquist 频率处总体 MTF 相对理想情况时的 sinc 曲线偏移最大。以此为基础,从小光点测试串音方法出发,得到了一种由 MTF 曲线计算百分比串音参数的方法。这里仅完成了方法的原理性探讨,完成相应的测试平台建立后,将实测红外焦平面芯片的串音和 MTF 曲线,验证方法的可行性。

## 参 考 文 献

- Gong Faquan. Study on Optical Modulate Transfer Function of CCD and its Measuring Method [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002  
公发全. CCD 光学调制传递函数及检测方法研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2002
- Zhang Zhiheng. Study on Measurement System and Technique of Infrared Focal Plane Arrays [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2004  
张志恒. 红外焦平面阵列 MTF 测试系统和技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2004
- Ma Weihong. Study of MTF Measurement Technique Based on Image Analysis. [D] Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. 2005  
马卫红. 基于图像分析的光学传递函数测试技术研究 [D]西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2005
- Chen Bing. Study on Measurement Technology of Cooled HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2002  
陈冰. HgCdTe 致冷红外焦平面阵列 MTF 测试技术研究 [D]. 南京:南京理工大学,2002
- Wang Xiaoguo, Tan Zhao, Li Zeren *et al.*. The study on the factors effecting CCD modulated transfer function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 830~833  
江孝国, 谭肇, 李泽仁等. 影响 CCD 调制传递函数因素研究 [J]. 光子学报, 2003, **32**(7): 830~833
- Wang Li, Tian Weijian, Wang Yaoxiang *et al.*. Measurement method for modulation transfer function of fiber optic taper coupled with CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 613~615  
汪丽, 田维坚, 王耀祥等. 光锥与 CCD 耦合器件调制传递函数的测试方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(4): 613~615
- Khoa V. Dang, Christopher L. Kauffman, Zenn I. Dezko. Infrared focal plane array crosstalk measurement[C]. *SPIE*, 1992, **1686**: 125~135
- M. Estriebeau, P. Magnan. Pixel crosstalk and correlation with modulation transfer function of CMOS image sensor[C]. *SPIE*, 2005, **5677**: 98~108
- S. G. Chamberlain, D. H. Harper. MTF simulation including transmittance effects and experimental results of charge-coupled imagers[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1978, **ED-25**: 145~154
- D. H. Seib. Carrier diffusion degradation of modulation transfer function in charge-coupled imagers[J]. *IEEE Electron Devices*, 1974, **ED-21**: 210~217
- Eric G. Stevens. A unified model of carrier diffusion and sampling aperture effects on MTF in solid-state image sensors[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1992, **ED-39**: 2621~2623
- Wolf Buchtemann. Modulation transfer function of extrinsic Si-detector arrays affected by optical crosstalk[J]. *IEEE Electron Devices*, 1980, **ED-27**: 189~193
- Ibrahima Djite, Pierre Magnan, Magali Estriebeau *et al.*. Modeling and measurements of MTF and quantum efficiency in CCD and COMS image sensors [C]. *SPIE*, 2010, **7536**: 75360H
- Klaus J. Engel, Lothar Spies, Gereon Vogtmeier *et al.*. Impact of CT detector pixel-to-pixel crosstalk on image quality [C]. *SPIE*, 2006, **6142**: 61422F