

红外焦平面阵列调制传递函数研究

童默颖 常本康 钱芸生 刘磊

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏, 南京, 210094)

摘要 分析了红外焦平面阵列调制传递函数的影响因素, 在此基础上建立了红外焦平面阵列的图像传递模型, 并根据该模型讨论了调制传递函数的测试方法.

关键词 红外焦平面阵列, 调制传递函数, 傅立叶变换, 串音.

STUDY FOR MODULATION TRANSFER FUNCTION OF INFRARED FOCAL PLANE ARRAY

TONG Mo-Ying CHANG Ben-Kang QIAN Yun-Sheng LIU Lei

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The factors affecting the modulation transfer function (MTF) of infrared focal plane arrays are analyzed in the paper, and a model of imaging transfer for infrared focal plane arrays is constructed. On the basis of the model, the paper also discusses the method measuring MTF of infrared focal plane arrays.

Key words infrared focal plane arrays, modulation transfer function, fourier transform, crosstalk.

引言

调制传递函数 (MTF) 是红外焦平面阵列 (IRFPA) 的主要性能参数之一. 根据 Wittenstein 等人假设, 对于离散阵列器件是空间离散采样系统, 存在混淆、串音、非等晕等现象, 严格来讲并不满足 MTF 的使用条件^[1]. 但如果重新定义等晕条件, 则可以将光学传递函数 (OTF) 概念扩展到有混淆效应的红外焦平面阵列成像系统. MTF 是 OTF 的模. 目前应用较广的 IRFPA 有扫描型与凝视型. 与大面阵的电荷耦合器件 (CCD) 相比探测元的几何尺寸与探测元之间的间距是同一数量级^[2], 没有严格条件, 所以简单用离散采样理论描述是不恰当的. 这里运用信号与系统、数字信号处理理论, 结合影响 IRFPA 的 MTF 的因素, 用离散与连续并存的积分离散采样系统描述 IRFPA 图像传递过程并建立数学模型, 并从模型出发详细讨论了平均法测量 IRFPA 的 MTF.

1 基本原理

1.1 IRFPA 的 MTF 影响因素

影响 IRFPA 的 MTF 的因素有连续光学系统意义上的点扩散函数、探测器的几何结构、探测元的光子转换为电荷的转换效率、探测元间的电学传导等一些主要促使空间信息分布发生变换的因素.

1.2 IRFPA 图像传递模型

IRFPA 发生串音会降低系统的 MTF, 使整机性能下降. 以 HgCdTe 光伏型背照射 IRFPA 为例加以说明 (详见图 1)^[3]. 光学串音已被点扩散函数包括, 电学串音见后面所述. IRFPA 成像是二维的, 但测试中一般分别以水平、垂直 MTF 描述阵列的 MTF. 下面仅说明一维情形, 假设在图中虚线面以上 IRFPA 光学特性相同即 B 区域是等晕的, 那么线扩散函数 $w(x)$ 是相同的, 得在虚线面上的光强分布:

$$g(x) = f(x) \otimes w(x). \quad (1)$$

其中“ \otimes ”表示卷积, $f(x)$ 为目标的光强分布, 至此所讨论的均是连续光学部分.

以下讨论离散采样部分, 理想 IRFPA 像素量大, 每个像素也称探测元是一个小的输入窗口. 对于离散积分采样 IRFPA, 各点光子转换为电荷的转换效率记为 $c(x)$, 理想情况 $c(x)$ 在探测元区域外为

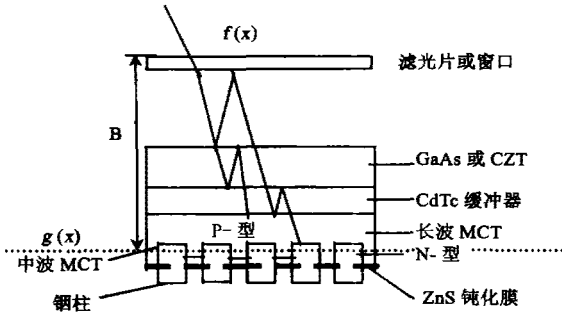


图1 背照射探测器的截面图
Fig. 1 Cross section of backside illuminated detectors

0. 如图2,那么 IRFPA 探测元 n 输出为

$$g_{ou}(n) = \int_{nT-l/2}^{nT+l/2} [f(x) \otimes w(x)] c(x) dx. \quad (2)$$

其中探测元长度为 l ,探测元中心间距为 T ,采样点距中心点为矢量 b .

设采样点与积分中值定理中 ξ 点重合,由积分中值定理,式(2)可化为:

$$g_{ou}(n) = kg(x)c(x) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - nT + b). \quad (3)$$

电学串音也会使系统的 MTF 下降,考虑 MTF 只是表征空间频率的传递与时间频率无关,电学串音就是探测元间的相互干扰.定义 $\lambda(n)$ 为电学串音加权序列,物理意义为单位光强的光照射在第 n 个探测元上,由于电学串音的存在使得中心探测元的输出增加的值.为便于理解引入 $\lambda(x)$ (参见图3), $\lambda(n)$ 是连续函数 $\lambda(x)$ 的离散采样值.假设各探测元电学串音相同,那么这个系统是具有时不变性质(对于空间域是移不变性质)的线性系统.第 n 个探测元的输出为

$$Y(n) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \lambda(i-n)g_{ou}(i) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g_{ou}(i)\lambda(n-i) = g_{ou}(n) \otimes \lambda(n). \quad (4)$$

其中 $\lambda(0) = 1$. 记式(3)中 $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - nT + b) = S(x)$,综合上述所推导的公式,总的表达式为

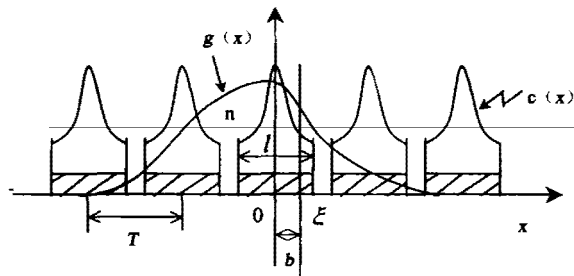


图2 一维图像传递示意图
Fig. 2 Sketch-map of one dimension imaging

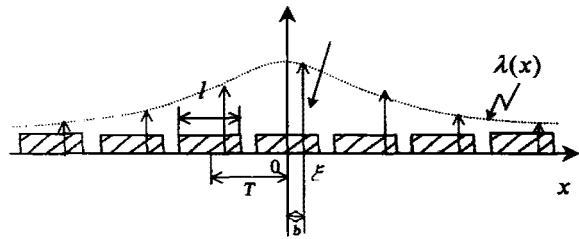


图3 电学串音示意图
Fig. 3 Electrical crosstalk

$$Y(n) = \{ [k \times f(x) \otimes w(x)] c(x) \times S(x) \} \otimes \lambda(n) = \{ [k \times f(x) \otimes w(x)] c(x) \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - nT + b) \} \otimes [\lambda(x) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - nT + b)]. \quad (5)$$

该式是 IRFPA 的空间图像传递模型的空间域表达式^[4]. 两边分别作傅立叶变换可得 IRFPA 的空间图像传递模型的频域表达式为

$$Y(f) = k \{ [\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp(-j2\pi n f_s b) F(f - n f_s) \cdot W(f - n f_s)] \otimes C(f - n f_s) \} \times [\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp(-j2\pi n f_s b) \lambda(f - n f_s)]. \quad (6)$$

其中 $f_s = 1/T$,大写字母为对应的小写字母的傅立叶变换.

1.3 IRFPA 的 MTF

理论上阵列中各探测元光电转换特性是相同的,即 $c(x)$ 为图2中所示的周期函数.根据采样理论,在数学意义上 $c(x)$ 对阵列的图像传递的作用与以 $c(x)$ 为采样脉冲对 $g(x)$ 的采样是相同的,采样过程如图4所示.又由于串音序列的频谱较低(如图3)不会发生频谱混叠,所以当小单元中各点池子转换为电荷的转换效率相差不是很大, $l \leq T/8$ 时,在离散傅立叶变换的主周期内,式(6)可以简化为

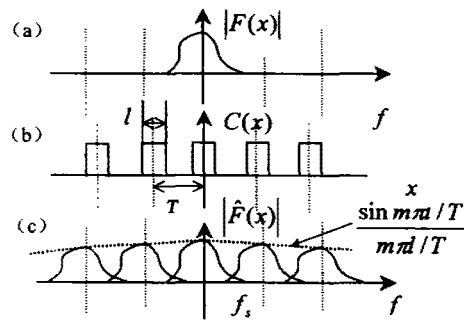


图4 脉冲串采样过程 (a)输入信号谱 (b)采样脉冲串 (c)采样后信号空间谱
Fig. 4 Sampling process of pulse series (a)input signal spectrum (b)sampling pulse series (c) signal spectrum after sampling

$$\begin{aligned}
 Y(f) &= k \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp(-j2\pi n f_s b) F(f - n f_s) \\
 &\quad \cdot W(f - n f_s) \lambda(f - n f_s) \\
 &= k \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp(-j2\pi n \theta) F(f - n f_s) \\
 &\quad \cdot W(f - n f_s) \lambda(f - n f_s). \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中 $\theta = f_s \times b = b/T (0 \leq \theta \leq 1)$. 记 $MTF(f) = W(f) \lambda(f)$, 这是由 IRFPA 的固有性质决定的, 与输入图像的频谱无关, 那么 $MTF(f)$ 就是 IRFPA 的调制传递函数.

综上所述, 此积分离散采样系统模型是建立在 IRFPA 器件对空间频率改变的因素基础之上. 由此方法得出的 MTF 已包括点扩散效应、IRFPA 的几何尺寸、串音、探测元的光子转换为电荷的效率系数等决定 IRFPA 的 MTF 的关键因素. 探测元内的不均匀性可以采用下面介绍的平均法来补偿.

2 MTF 测试方法

假设一个采样周期内 N 等分且 N 取为偶数, 探测器相对于测试目标平移, 每次位移 $s = T/N$. 各平移点依次记为 $i (i = 0, 1, \dots, N)$. 记各位置探测器输出序列的傅立叶变换为 $Y_i(f)$, 根据式(7), $\theta = \frac{i}{N} -$

$\frac{1}{2}$ 由数学知识可知下式成立:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \exp\left[-j2\pi n \left(\frac{i}{N} - \frac{1}{2}\right)\right] = 0, \quad n \neq 0 \quad (8)$$

将这 N 次测量得到的 $Y_i(f)$ 相加结果为

$$\begin{aligned}
 &Y_0(f) + Y_1(f) + Y_2(f) + \dots + Y_{N-1}(f) \\
 &= N \times F(f) \times MTF(f). \quad (9)
 \end{aligned}$$

这与 S. k. Park 推导的平均 MTF 的定义是一致的. IRFPA 输入已知空间频率分布的图像, IRFPA 每扫

描一个位置都记录每个探测元的输出信号值, 然后输出信号序列作离散傅立叶变换就可求出一个扫描位置的 $Y(f)$. 根据公式:

$$MTF(f) = [Y_0(f) + Y_1(f) + Y_2(f) + \dots + Y_{N-1}(f)] / N \times F(f) \quad (10)$$

就可计算 IRFPA 的调制传递函数 (MTF), 称此测试方法为平均法. 此方法可以进一步改为刀口测试方法, 由于受篇幅限制这里不作详细的描述.

3 结语

此模型是建立在 IRFPA 对空间信息传递过程基础之上, 没有考虑到 IRFPA 的时间轴扫描对空间信息分布的改变, 所以适用于凝视型或是不需考虑扫描对点扩散函数的影响的情况, 例如慢速扫描的大面积阵列. 从此模型上可以更加层次分明地理解 IRFPA 的图像传递. 所介绍的平均法克服了采样效应的影响, 而且对输入图像的截止频率没有限制, 输出的信号可以真实地表征 IRFPA 的 MTF .

REFERENCES

- [1] Williams S K. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems. *App. Opt.*, 1984, **23**: 2572—2581
- [2] Bradley D J, Baddiley C J. The modulation translation function of focal plane array systems. *SPIE*, 1987, **807**: 33—41
- [3] Khoa V, Dang Christopher L, Kauffman. Infrared focal plane array crosstalk measurement. *SPIE*, 1992, **1686**: 125—135
- [4] FANG Hong-Bing, YIN Bao-Quan, PI De-Fu. Measurement of the MTF of staring thermal imaging systems. *J. Infrared Millim. Waves* (房红兵, 尹宝全, 皮德富. 凝视热成像系统 MTF 测试技术分析. *红外与毫米波学报*), 1998, **17** (2): 124—128
- [5] Yasuto Katoh. The study of the spatial resolution improvement of the scanning detector. *SPIE*, 2001, **4183**: 209—216