

文章编号:1001-9014(2006)01-0013-04

# 长波红外相机多次采样叠加对 MTF 的影响分析

李丕丁<sup>1,2</sup>, 李玉敏<sup>1</sup>, 傅雨田<sup>1</sup>, 龚惠兴<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**根据长波红外相机积分时间短的特点,阐述了多次采样叠加技术的原理和应用.并在此基础上分析了采用多次采样叠加技术对系统 MTF 产生的影响.给出了不同采样系数和叠加次数对应的系统 MTF 变化.当采样系数固定时,探测器 MTF 随叠加次数的增加而减小,系统推扫方向 MTF 随叠加次数的增加而减小.

**关键词:**红外焦平面阵列;多次采样累加;调制传递函数;红外相机

中图分类号:TN216 文献标识码:A

## EFFECT OF OVERSAMPLE-SUPERPOSITON ON MTF FOR LONG WAVE INFRARED CAMERA

LI Pi-Ding<sup>1,2</sup>, LI Yu-Min<sup>1</sup>, FU Yu-Tian<sup>1</sup>, GONG Hui-Xing<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Postgraduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** According to the short integration time characteristics of long wave infra-red focal plane array, the principle and application of oversample-superpositon technique were discussed. The effect of oversample-superpositon on the MTF of system was analyzed on the basis of the chareacteristics of LWIR FPA. The corresponding oversample-superpositon MTFs at different sampling and superpositon time were given. As the superpositon time decreases, the detector MTF is reducing while system scanning MTF is rising when the sampling time is fixed.

**Key words:** IR focal plane array; oversample-superpositon; modulation transfer function (MTF); long-wave infrared camera

### 引言

多次采样叠加技术通过对一个瞬时视场采集多个样品,并将样品的采样数据叠加后进行平均,以延长等效积分时间,提高系统信噪比.一般情况下成像系统对每一个瞬时视场采样一次,此时对应着最大积分时间.提高一个瞬时视场的采样次数有助于提高扫描方向的 MTF 值. MTF 值的提高是以积分时间的减少为代价的,当一个瞬时视场采样次数为  $n$  时,输出信噪比降低约  $n$  倍<sup>[1-4]</sup>.在这种情况下采用多次采样叠加来提高信噪比是没有意义的.

长波红外相机采用线列红外焦平面阵列(FPA)沿垂直线列方向推扫成像,并采用多次采样叠加技术以提高系统信噪比.由于在长波波段背景辐射较强,红外焦平面探测器的饱和积分时间较短;故系统完成一次积分,读出所需要的时间要小于像元驻留

时间,这种情况下为充分利用像元驻留时间,可以采用多次采样叠加的方法来提高系统的信噪比.

调制传递函数(MTF)是衡量成像系统成像质量的重要参数.由于在相互垂直的两个方向上的 MTF 的可分离性<sup>[5]</sup>,所以推扫方向的 MTF 可以单独讨论.多次采样叠加技术只在推扫方向上进行,对线列方向 MTF 没有影响,本文只讨论推扫方向 MTF.

### 1 推扫方向 MTF

令卫星飞行速度为  $v_1$ ,  $v$  为  $v_1$  相应的像方量,  $t_1$  为推扫方向探测器像元最大积分时间,  $t_2$  为电路读出时间.  $T$  为系统电路扫描周期,  $T = t_1 + t_2$ . 定义扫描效率  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = t_1 / T \quad (1)$$

设探测器推扫方向尺寸为  $w$ , 像元驻留时间  $T_s = w /$

收稿日期:2005-04-26,修回日期:2005-10-17

基金项目:国防科研计划项目(863-2-7-4-19)

作者简介:李丕丁(1973-)男,吉林白城人,中科院上海技术物理研究所读博士生,主要从事红外相机测试技术的研究.

Received date: 2005-04-26, revised date: 2005-10-17

v. 定义采样系数  $M$  为:

$$M = T_s/T = w/vT, \quad (2)$$

$M=1$ , 意味着系统电路扫描周期与像元驻留时间相等;  $M=n$ , 则像元驻留时间是系统电路扫描周期的  $n$  倍.

设  $f$  为推扫方向的空间频率. 考虑电路读出时间的影响, 则采样系数  $M$  为  $m$  时, 推扫方向  $MTF$  为<sup>[1,2]</sup>:

$$\begin{aligned} MTF_y &= \text{sinc}(fw) \text{sinc}\left(\frac{wf}{m}\right) \text{sinc}\left(\frac{fvT_1}{m}\right) \\ &= \text{sinc}(fw) \text{sinc}\left(\frac{wf}{m}\right) \text{sinc}\left(f\frac{\varepsilon w}{m}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, 第一个因子为探测器调制传递函数  $MTF_{\text{detector}}$ , 表示探测器光敏元对景物的积分平均作用, 第二个因子表示探测器对景物的平均抽样成像<sup>[1]</sup>, 即采样调制传递函数  $MTF_{\text{sampling}}$ . 第三个因子表示由电路读出时间引起的  $MTF$  变化.

## 2 推扫方向 $MTF$ 分析

多次采样叠加原理如图 1 所示. 设  $I(x)$  为景物的辐射分布函数;  $h(x) = \text{rect}(x/w)$ , 为探测冲激响应<sup>[1]</sup>. 则探测器输出  $G(x)$  为:

$$\begin{aligned} G(x) &= h(x) * I(x) \\ &= \text{rect}(x/w) * I(x) \\ &= \int_0^w I(x-\tau)h(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $*$  表示卷积. 以叠加次数  $k=3$  为例的多次采样叠加原理如图 1 所示, 图中区间  $[a, a_1]$ 、 $[b, b_1]$ 、 $[c, c_1]$  为探测器的相邻的采样区间, 区间宽度为探测器推扫方向尺寸  $w$ . 采样系数为  $M$  时, 根据线性系统理论, 3 次叠加平均后探测器输出  $G_3(x)$  为:

$$\begin{aligned} G_3(x) &= \frac{1}{3} \left( \int_a^{a_1} I(x-\tau)h(\tau) d\tau + \int_b^{b_1} I(x-\tau)h(\tau) d\tau + \int_c^{c_1} I(x-\tau)h(\tau) d\tau \right) \\ &= \frac{1}{3} \left( \int_a^{c_1} I(x-\tau)h(\tau) d\tau + \int_b^{b_1} I(x-\tau)h(\tau) d\tau + \int_c^{a_1} I(x-\tau)h(\tau) d\tau \right), \end{aligned} \quad (5)$$

区间  $[a, c_1]$ 、 $[b, b_1]$ 、 $[c, a_1]$  的长度分别为  $L_1$ 、 $L_2$ 、

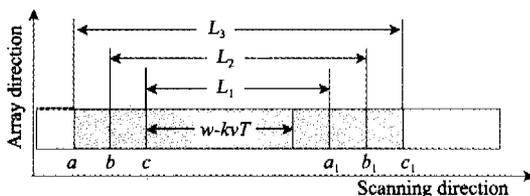


图 1 多次采样叠加示意图

Fig. 1 Diagram of oversample-superpositon

$L_3$ . 式(5)可以理解为尺寸分别为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  的探测器对景物  $I(x)$  分别进行卷积积分叠加平均, 式中  $L_1 = w - 2vT$ ,  $L_2 = w$ ,  $L_3 = w + 2vT$ . 式(5)可以表示为如下形式:

$$\begin{aligned} G_3(x) &= \frac{1}{3} (\text{rect}(x/L_1) * I(x) + \text{rect}(x/L_2) * I(x) \\ &\quad + \text{rect}(x/L_3) * I(x)) \\ &= \frac{1}{3} (\text{rect}(x/L_1) + \text{rect}(x/L_2) + \text{rect}(x/L_3)) * I(x). \end{aligned} \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 叠加平均后的探测器的冲激响应  $h_3(x)$  为:

$$h_3(x) = \frac{1}{3} (\text{rect}(x/L_1) + \text{rect}(x/L_2) + \text{rect}(x/L_3)), \quad (7)$$

根据  $MTF$  的定义, 叠加平均后探测器的冲激响应的傅立叶变换的模即为其  $MTF$ , 对式(7)两边进行傅立叶变换并取模得:

$$MTF_3 = \frac{1}{3} (\text{sinc}(fL_1) + \text{sinc}(fL_2) + \text{sinc}(fL_3)), \quad (8)$$

式(8)很容易推广到一般形式, 当采样系数  $M$  等于  $n$  时,  $k$  次叠加平均后探测器  $MTF_{\text{detector}}$  为:

$$\begin{aligned} MTF_{\text{detector}} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{sinc}(fL_i) \\ &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{sinc}\left(fw\left(1 + \frac{2i-1-k}{m}\right)\right), \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $L_i = w - kvT + (2i-1)vT = w - kw/m + (2i-1)w/m$ . 并且由式(3)可得采样系数  $M$  等于  $m$  时,  $k$  次叠加平均系统推扫方向  $MTF_k$ :

$$\begin{aligned} MTF_k &= \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \right) \text{sinc}(fL_i) \text{sinc}\left(\frac{wf}{m}\right) \text{sinc}\left(\frac{\varepsilon w}{m}\right) \\ &= \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k \text{sinc}\left(fw\left(1 + \frac{2i-1-k}{m}\right)\right) \right) \text{sinc}\left(\frac{wf}{m}\right) \text{sinc}\left(f\frac{\varepsilon w}{m}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

设系统截至频率为  $f_N = 1/2w$ , 则式(10)可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} MTF_k &= \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \right) \text{sinc}\left(\frac{f}{2f_N}\left(1 + \frac{2i-1-k}{m}\right)\right) \text{sinc}\left(\frac{f}{2f_N}\right) \text{sinc}\left(\frac{\varepsilon f}{2f_N m}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

$m$  的变化反映了像元驻留时间与系统电路扫描时间的比例关系.  $k$  值的变化反映了采样叠加方式的不同.

## 3 仿真结果

根据式(11)采用 MATLAB 软件进行仿真,  $\varepsilon =$

0.9, 设采样系数为  $M$ . 画出的采样系数的变化引起的探测器  $MTF$  和系统推扫方向  $MTF$  的变化如图 2 所示, 图中取  $k = M$ . 图 2. a 反映探测器调制传递函数  $MTF_{\text{detector}}$  与采样系数值的关系. 由图中可以看出,  $MTF_{\text{detector}}$  随采样系数的增加而减少. 系统推扫方向调制传递函数  $MTF_k$  的变化如图 2. b 所示, 可以看出  $MTF_k$  随采样系数值的增加而增加, 这是由于式(11)中的  $MTF_{\text{sampling}}$  和电路读出时间因子随采样系数的增加而增加的缘故.

图 3 反映了不同叠加次数值时的  $MTF_k$  的变化, 从图中可以看出, 当采样系数固定时, 随叠加次数值的增加,  $MTF_k$  逐渐减小.

Nyquist 频率处的  $MTF_k$  随采样系数, 叠加次数的变化如图 4 所示, 采样系数增大时, 叠加次数值对  $MTF_k$  的影响逐渐减小; 曲线  $Q$  为  $k = M$  时, Nyquist 频率处  $MTF_k$  随采样系数的变化趋势,  $MTF_k$  随采样系数的增加而增加, 当  $M > 10$  时,  $MTF_k$  基本不变.

### 4 结论

以上分析中, 给出了不同采样系数和叠加次数对应的系统推扫方向. 采样系数的增加使探测器

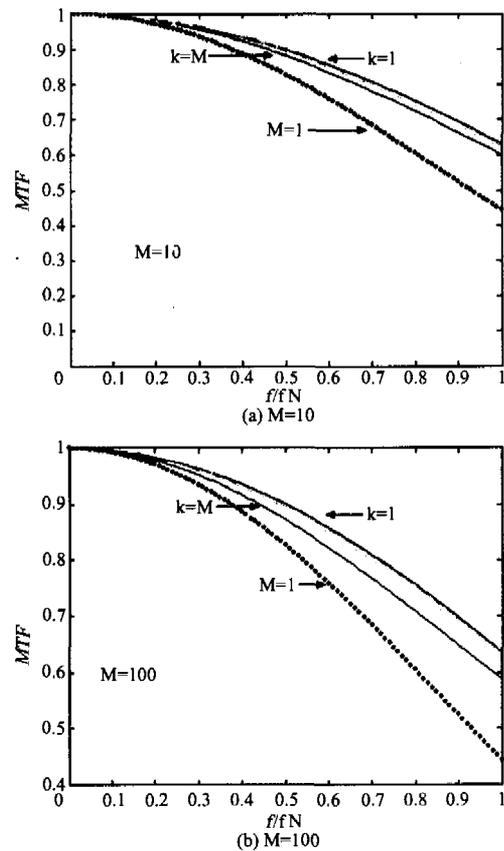


图 3 不同  $k$  值时的  $MTF$  曲线  
Fig. 3  $MTF$  curve at different  $k$  value

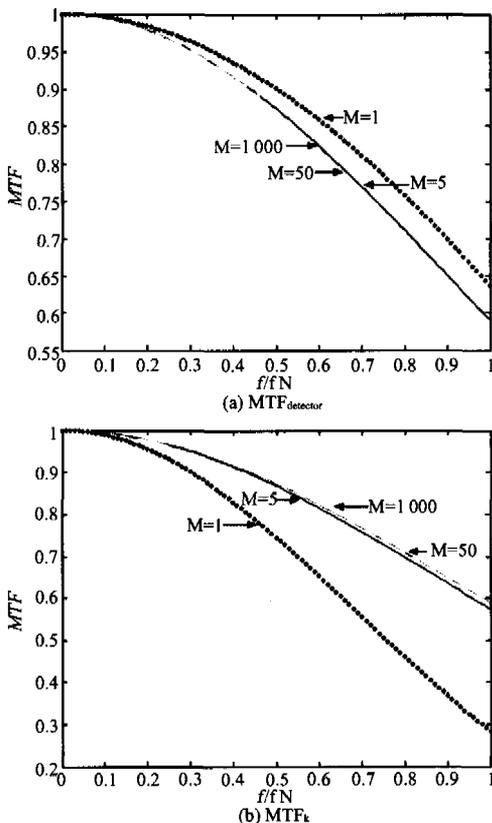


图 2  $k = M$  时的  $MTF$  曲线  
Fig. 2  $MTF$  curve when  $k = M$

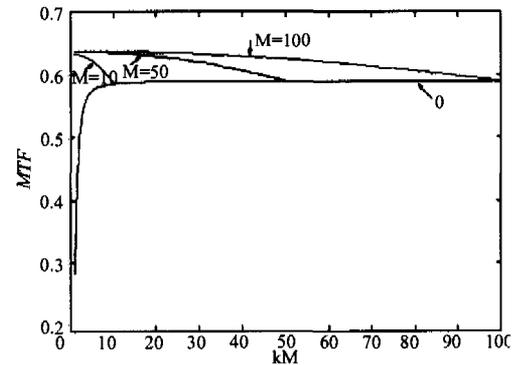


图 4 奈奎斯特频率处  $MTF$  值  
Fig. 4  $MTF$  curve at Nyquist

$MTF$  减小, 但是由于平均采样间隔的减小使得系统推扫方向  $MTF$  增加. 对于实际的成像系统, 系统电路扫描周期和像元驻留时间是固定的, 所以采样系数是一个固定值. 叠加次数的增加可以提高系统信噪比. 当采样系数较小时, 叠加次数增加时系统推扫方向  $MTF$  下降较大. 要根据系统对信噪比和  $MTF$  的要求选取合适的叠加次数. 当采样系数  $m > 10$  时, 叠加次数对系统推扫方向  $MTF$  影响已不大, 此时可以取  $k = M$ . 这些结论有助于根据不同的采样系

数选取合适的叠加次数.

实际的红外成像系统中,要对采样的原始数据进行非均匀性校正,而对高信噪比是影响系统的非均匀性校正效果的重要因素<sup>[6~8]</sup>,由于多次采样叠加技术可以有效的提信噪比,因此可以在叠加后进行校正,以提高非均匀性校正的效果.

REFERENCES

[1] HAN Xin-Zhi, Discussion on CCD modulation transfer function of the pushbroom space remote se[J]. *J. Infrared. Millim. Waves* (韩心志,推帚式航天遥感器 CCD 航向调制传递函数的讨论, *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(4):145—147.

[2] Richard H. vollemerhausen. *Analysis of Sampled Imaging Systems* [M], Bellingham Washington; SPIE PRESS. 2002.

[3] CHEN Yan-Xin, ZHANG Shou-Yi. Analyzing the MTF along track of the for push-broom camera and selecting the optimum overlapping sampling coefficient [J]. *Chin. J. Infrared Res.* (湛炎新,张守一. CCD 刷扫相机飞行方向 MTF 分析与最佳重选取样系数选取. *红外研究*) 1987. **6**(6): 401—406.

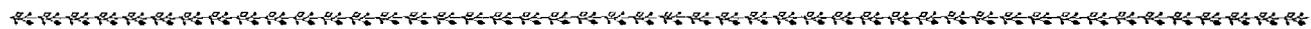
[4] ZHANG Shou-Yi, CHEN Ru-Jun. Redemonstration of the effect of overlapping scan coefficient on the increase in the resolution along track for push-broom camera [J]. *Chin. J. Infrared Res.* (张守一,陈汝钧.再论重迭扫描系数对提高 CCD 刷扫相机飞行方向分辨率的影响. *红外研究*) 1986. **5**(2):113—116.

[5] Glenn D. Borman. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical System* [M], Bellingham Washington; SPIE Press. 2002.

[6] YIN Shi-Min. New Algorithm of Adaptive Nonuniformity Correction for IRFPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (殷世民.一种新型红外焦平面器件非均匀性自适应校正算法, *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(1):59—63.

[7] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Hui, et al. New approach to nonuniformity correction of irfpa with nonlinear response [J]. *J. Infrared. Millim. Waves.* (石岩,张天序,李辉,等.一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法, *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(4):251—256.

[8] XU Tian-Hua, ZHAO Yi-Gong. Modification of motion and background clutter on ir imaging system performance model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐田华,赵亦工,基于场景的红外焦平面非均匀校正技术分析, *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(4):257—261.



(上接第 12 页)的要求.大量的仿体实验显示了此系统的可行性和稳定性,而临床实验结果更进一步证明了此系统在区分肿瘤和正常组织方面的能力,值得在临床上做更深入的研究和应用.

REFERENCES

[1] Hebdn J C, Arridge S R, Delpy D T. Optical imaging in medicine I: Experimental techniques [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1997, **42**:825—840.

[2] Max Cutler. Transillumination as an aid in the diagnosis of breast lesions[J]. *Surgery Gynecology and Obstetrics*, 1929, **48**(6):721—729.

[3] Gros C M, Quenneville Y, Hummel Y. Diaphanologie mam-

maire[J]. *J. Radiol. Electrol. Med. Nucl*, 1972, **53**:297—306.

[4] E Carlsen. Transillumination light scanning[J]. *Diagn. Imaging*, 1982, **4**:28—34.

[5] ZHOU Jun, ZHANG Yong-Hong, BAI Jing. Investigation of continuous wave near infrared optical tomography based on gradient optimization schemes [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周俊,张永红,白净.基于梯度优化法的连续波近红外光断层成像研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3):161—163.

[6] XU Heng, ZHANG Yong-Hong, CHEN Nan-Guang, et al. NIR diffusive optical imager for breast cancer detection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (许衡,张永红,陈南光,等.近红外漫射光子乳腺癌检测成像系统. *仪器仪表学报*), 2000, **21**(z1):44—47.