

# 玫瑰扫描亚成像系统的性能分析\*

何国经 张建奇 徐军

(西安电子科技大学技术物理学院,西安 710071)

**摘要** 利用调制传递函数(MTF)法,分析了玫瑰扫描制导系统的光学系统模块和探测器模块的参量对系统性能的影响,重点分析了探测器模块的影响,并给出仿真计算结果,由结果分析指出系统设计时选择参量的一种新思路.

**关键词** 玫瑰扫描;调制传递函数(MTF);仿真

**中图分类号** TN216 **文献标识码** A

## 0 引言

玫瑰扫描在红外导引头中已得到了成功的应用,同时,人们对玫瑰扫描系统的研究也在不断的深入,从系统设计<sup>[1,2]</sup>到信号处理方法<sup>[3,4]</sup>,做了很多的工作,对玫瑰扫描系统的模型和性能有了深入的了解.但是,这些工作都是在时间域和空间域进行讨论,没有涉及系统在空间频率域的相关效应,而对红外系统,特别是对成像系统和亚成像系统来说,空间频率域的效应对系统性能有着重要的影响.因而,有必要从空间频率域的角度讨论系统性能及其影响因素.

本文借用成像系统中调制传递函数(MTF)的概念,从频域分析玫瑰扫描系统的性能.系统自身的参量决定系统的MTF,因而也就影响着系统对入射辐射的衰减效应.文章首先建立玫瑰扫描亚成像系统主要模块的MTF模型,然后利用计算机仿真模拟MTF对入射辐射的衰减,并以理想系统的输出作为标准定量描述衰减的强度.在此基础上,文章分析了系统主要模块参量对系统性能的影响,并对影响系统性能最大的探测器模块进行了重点讨论,给出系统性能衰减与系统瞬时视场的关系曲线图,由此指出系统设计时选择参量的一种新思路.

## 1 系统模块划分及 MTF

根据玫瑰扫描系统的工作原理,得到系统的开环仿真框图如图1所示<sup>[5]</sup>.

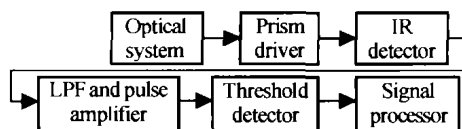


图1 玫瑰扫描系统的开环仿真模块框图  
Fig.1 Block diagram of a rosette scanning system for open-circuit simulation

热辐射信号通过光学系统进入玫瑰扫描系统.棱镜驱动模块实现瞬时视场沿玫瑰扫描线对总视场进行空间分解.红外探测器对瞬时视场内的辐射能量进行积分,并转换为电信号输出.电信号经过电路处理进入阈值检测模块,阈值检测模块负责从电信号中提取出目标脉冲信号.信号处理模块根据目标脉冲信号到来的时间计算目标的位置.

作为一种亚成像机制,玫瑰扫描系统与成像系统有许多相似的地方,最重要的一点就是它用瞬时视场扫描总视场,实现总视场的空间分解.玫瑰扫描制导系统与成像系统存在相同的问题,其光学部分、探测器部分和信号处理电路同样不能完全响应场景辐射带有的所有空间频率信号,也就是说玫瑰扫描系统是有调制传递函数的.由于玫瑰扫描亚成像系统处理的是采样序列信号,而不是图像,所以就信号处理电路而言,玫瑰扫描系统与红外成像系统有较大的差别,本文暂时不讨论信号处理电路的影响,这里只给出光学系统模块和探测器模块的调制传递函数.

光学系统的调制传递函数 MTF<sub>o1</sub> 分为衍射限光学系统调制传递函数 MTF<sub>o1</sub> 和非衍射限光学系统调制传递函数 MTF<sub>o2</sub>.

对于圆形孔径,光学系统在衍射限下的调制传递函数 MTF<sub>o1</sub> 为  $(f \leq f_c)$ <sup>[6,7]</sup>

$$MTF_{o1} = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \left( \frac{f}{f_c} \right) - \left( \frac{f}{f_c} \right) \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_c} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

式中,  $f_c$  为非相干光学系统的空间截止频率 (c/mrad),  $f_c = D_0/\lambda$ ;  $D_0$  为光学系统的入瞳直径 (mm);  $\lambda$  为非相干光波长 ( $\mu\text{m}$ );  $f$  为空间频率 (c/mrad).

在非衍射光学系统中,由像差引起的弥散圆的能量分布为高斯分布,具有圆对称性,其标准偏差为  $\sigma_r$  (mm). 将  $\sigma_r$  转换为角宽度坐标系中的标准偏差  $\sigma = \sigma_r/f'$ ,  $f'$  为系统焦距. 则非衍射限光学系统的 MTF<sub>o2</sub> 可表示为<sup>[6,7]</sup>

$$MTF_{o2} = \exp \left( -2\pi^2 \sigma^2 f^2 \right) \quad (2)$$

\*国家自然科学基金项目(资助代号:60277005、60007007)  
Tel:029-88202563 Email:heguojing@hotmail.com  
收稿日期:2003-09-01

按照线性理论,光学系统的 MTF<sub>o</sub> 为

$$MTF_o = MTF_{o1} MTF_{o2} \quad (3)$$

探测器的滤波特性包含空间滤波和时间滤波特性两部分. 其空间滤波的 MTF<sub>ds</sub> 可表示为 ( $f \leq f_{cd}$ )<sup>[8]</sup>

$$MTF_{ds} = kaJ_1(2\pi af)/f \quad (4)$$

式中,  $a$  为圆形探测器的瞬时视场的角半径 (mrad);  $J_1$  为一阶第一类贝塞尔函数;  $f$  为空间频率 (c/mrad);  $k$  为归一化因子, 实现  $f$  趋于 0 时式(6)的值趋于 1, 同时平衡量纲.  $f_{cd}$  为圆形探测器的空间截止频率 (c/mrad),  $f_{cd} = 1/2a$ .

探测器时间滤波的 MTF<sub>dt</sub><sup>[6]</sup> 为

$$MTF_{dt} = \frac{1}{[1 + (f/f_0)^2]^{1/2}} \quad (5)$$

式中,  $f_0$  为空间频率域的 3 dB 频率 (c/mrad);

探测器的总的调制传递函数为空间滤波和时间滤波所对应的传递函数之积, 即

$$MTF_d = MTF_{ds} MTF_{dt} \quad (6)$$

## 2 MTF 衰减效应仿真

### 2.1 仿真思路

场景辐射从光学系统进入系统后, 由于系统各部分调制传递函数的作用, 辐射信号中属于不同空间频率的信号成分会受到不同程度的衰减, 场景辐射信号的对比度降低了. 这相当于系统“看”到的场景的质量降低了. 质量不同的场景, 对应着不同强度的系统 MTF 效应, 通过分析场景质量就可以描述系统效应的强弱. 由于玫瑰扫描系统处理的是对场景的采样信号而非图像, 所以应该用采样信号的质量描述场景质量. 利用理想的玫瑰扫描系统对场景进行采样, 计算采样信号的信噪比以描述采样信号质量, 此信噪比同时也表征了场景质量, 即系统 MTF 效应的强弱.

### 2.2 MTF 衰减效应仿真

在仿真中, 为了处理计算的需要, 我们假定用作原始场景的图像是由理想成像系统得到的. 理想指的是成像系统不会对原始信号有任何的衰减, 也就是系统的带宽趋向于无穷. 该理想成像系统的成像单元线度为 20 μm, 焦距为 100 mm.

下面是一组仿真结果:

作为仿真对象的玫瑰扫描系统的参量如下: 光瞳孔径  $D_0$ : 100 mm; 响应波段  $\lambda$ : 3 ~ 5 μm; 瞬时视场 IFOV: 2.233 mrad; 总视场 TFOV: 17.4 mrad; 偏光光学元件旋转频率  $f_1 = 160$  Hz、 $f_2 = 70$  Hz (此处的 IFOV、TFOV、 $f_1$ 、 $f_2$  为毒刺导弹的参量<sup>[9]</sup>,  $D_0$ 、 $\lambda$  为一般设计参量).

图 2 是 MTF 曲线. 点划线表示的是衍射限光学系统的 MTF<sub>o1</sub>, 虚线是非衍射限光学系统的 MTF<sub>o2</sub>, 实线是圆形探测器空间滤波的 MTF<sub>ds</sub>. 相比而言, 探测器时间滤波的 MTF<sub>dt</sub> 在较大的带宽内接近 1, 可以不予考虑. 竖向的点线表示 MTF<sub>ds</sub> 的截止频率.

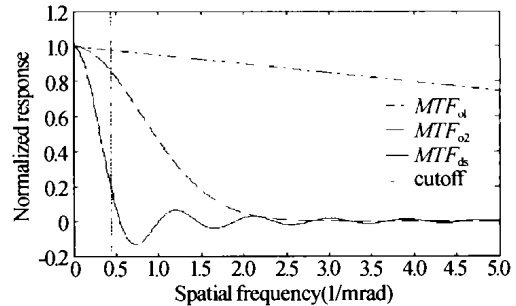


图 2 调制传递函数曲线

Fig. 2 Modulation Transfer Function (MTF) curves

图 3 是理想的原始场景图, 背景灰度为 0, 目标是半径为 10 个像素的圆, 灰度为 255. 图 4 是在理想场景图中加载了 MTF 效应的效果图, 此图代表原始信号经调制传递函数作用后新的信号分布形式.



图 3 理想原始场景

Fig. 3 Ideal original scene

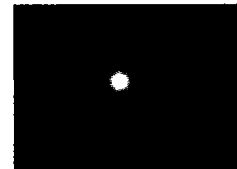


图 4 加载效应的效果图

Fig. 4 Scene applied MTF effect

比较图 3、图 4 可见, 由于系统的调制传递函数严重削减了信号中的高频成分, 导致图像变模糊了. 由于玫瑰扫描系统的瞬时视场比一般的红外成像系统的瞬时视场要大十倍以上, 所以模糊效应是十分严重的. 为了能定量比较两图的质量, 我们用理想的玫瑰扫描系统对两图进行采样, 并计算两组信号的信噪比.

信噪比的计算方法如下:

$$SNR = \frac{S_i - S_b}{\sigma_b} \quad (7)$$

式中,  $S_i$  为信号均值,  $S_b$  为背景均值,  $\sigma_b$  为背景信号均方差. 采样信号中, 幅度大于阈值的认为是信号, 低于阈值的认为是背景信号.

图 5、图 6 为理想玫瑰扫描系统对图 3、图 4 两幅场景图的一个周期的采样信号曲线. 由于在仿真

过程中,采用了傅里叶变换对图像进行处理,而图像的傅里叶变换操作会对图像的灰度进行重新划分,所以在计算信噪比时,需要对由理想系统得到的两组采样信号进行归一化处理. 图中的横线为阈值曲线. 计算得到图 5 所示信号的信噪比为 20.77,图 6 所示信号的信噪比为 13.32. 可见,由于调制传递函数的作用,原始信号被恶化了,由此必然使系统的性能下降.

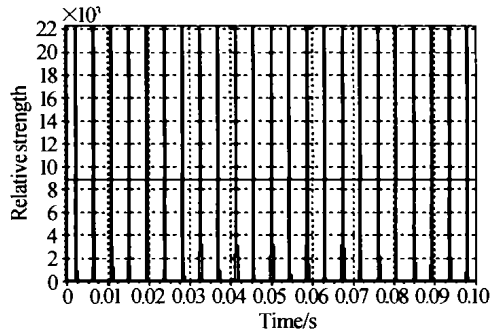


图 5 理想场景图采样信号

Fig. 5 Sampled signal from the ideal scene

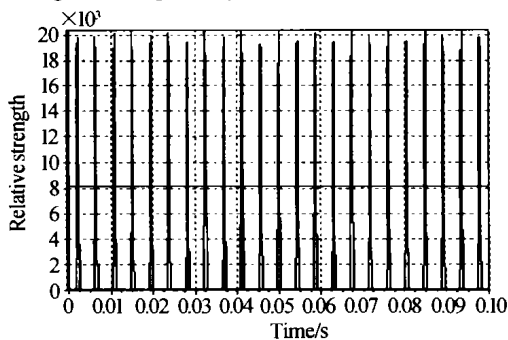


图 6 MTF 效果图采样信号

Fig. 6 Signal from the scene applied MTF effect

### 2.3 探测器空间滤波的 MTF 仿真与分析

由图 2 可见,探测器空间滤波的调制传递函数  $MTF_{ds}$  下降最快,其截止频率在各个 MTF 中也是最小的,所以它对信号的衰减作用最大,对系统的影响最严重. 因为  $MTF_{ds}$  与瞬时视场的大小有关,而其截止频率直接由瞬时视场的大小决定  $f_{cd} = 1/2a$ ,所以有必要讨论瞬时视场的大小对系统的影响. 我们以图 3 所示的理想场景图作为对象进行仿真,图 7 给出了由仿真得到的信噪比随瞬时视场变化的曲线.

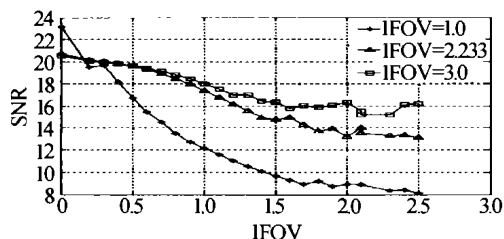


图 7 MTF 效应场景图在不同理想玫瑰扫描系统中采样信号的信噪比—瞬时视场曲线

Fig. 7 SNR-IFOV curves of signal sampled from scenes applied MTF effect by different ideal rosette scanning system

星形曲线、三角形曲线和方形曲线分别是在瞬时视场为 1.0 mrad、2.233 mrad 和 3.0 mrad 的理想玫瑰扫描制导系统下得到的,以上三个理想系统的偏光光学元件旋转频率均为:  $f_1 = 160$  Hz,  $f_2 = 70$  Hz.

从图中发现,当瞬时视场很小时,信噪比较大,且随瞬时视场的变化不大,随着瞬时视场的增大,信噪比变小,变化速率变大,但当瞬时视场较大时,信噪比的变化速率减小,信噪比趋于平稳. 这是因为小的瞬时视场对应的调制传递函数的带宽较宽,截止频率也高,虽然也会削弱入射信号的能量,但削减幅度很小,而且削减的是高频(空间频率)信号,对信号影响不大,所以采样信号有较高的信噪比,且随瞬时视场的变化不大;当瞬时视场很大时,截止频率随瞬时视场的变化变小,而且由于调制传递函数的作用,此时的信号质量已经变得很差,使得信号质量对瞬时视场的变化的敏感度下降,所以信噪比趋于稳定.

### 3 结论

玫瑰扫描系统作为一种亚成像系统,可以借用成像系统中的调制传递函数的概念对其各个模块进行描述. 调制传递函数对信号不同空间频率成分的削减,使得系统获得的目标场景信号质量下降. 由于系统的调制传递函数由系统自身的参量决定,是系统固有的,因而调制传递函数的效应不能消除,只能通过调整系统参量,使调制传递函数曲线在尽可能宽的频率范围内接近 1,从而减小其对系统所获信号的影响. 以探测器的调制传递函数  $MTF_{ds}$  为例:在系统各个模块的调制传递函数中,探测器的调制传递函数  $MTF_{ds}$  对信号的影响最大,而系统的瞬时视场的大小决定了  $MTF_{ds}$  的带宽和截止频率. 通过缩小系统的瞬时视场,可以减小  $MTF_{ds}$  对信号的衰减,提高信号质量. 但与此同时,由于要满足全视场覆盖扫描,系统的瞬时视场与系统总视场之间满足正比关系,瞬时视场的缩小势必使系统总视场减小,这对于系统搜索目标是不利的,所以在系统设计时,必须权衡总视场大小和  $MTF_{ds}$  降低信号质量之间的利弊.

### 参考文献

- 1 Jahng Surnggabb, Hong Hyunki, Han Sunghyun, et al. Design of instantaneous field of view of the rosette scanning infrared seeker and dynamic simulation. *SPIE*, 1998, **3365**: 158 ~ 168
- 2 樊学武,马臻,陈荣利,等. 红外双波段卡赛格林光学系统设计. *光子学报*, 2003, **32**(4): 463 ~ 465  
Fan X W, Ma Z, Chen R L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 463 ~ 465

- 3 Tajime T, Wakabayashi S, Kondo M, *et al.* Rosette scan infrared sensor. *SPIE*, 1980, **219**:51 ~ 57
- 4 靳贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术. 光子学报, 2003, **32**(3):294 ~ 296  
Jin G P, Pang Q C. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3):294 ~ 296
- 5 Jahng Surng-Gabb, Hong Hyun-Ki, Han Sung-Hyun. Dynamic simulation of the rosette scanning infrared seeker and an infrared counter-countermeasure using the moment technique. *Opt Eng*, 1999, **38**(5):921 ~ 928
- 6 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 229 ~ 232  
Zhang J X, Li Y D, Jin W Q. *LLL & IR Imaging Technology*, Beijing: BIT Press, 1995. 229 ~ 232
- 7 杨宜禾, 岳敏, 周维真. 红外系统(第二版). 北京: 国防工业出版社, 1995. 202 ~ 206  
Yang Y H, Yue M, Zhou W Z. *Infrared System*(Edition. 2). Beijing: National Defence Industry Press, 1995. 202 ~ 206
- 8 尹达人, 许生龙. 二维傅里叶变换及其在红外系统分析中的应用. 红外技术, 1998, **20**(4):46 ~ 48  
Yin D R, Xu S L. *Infrared Technology*, 1998, **20**(4):46 ~ 48
- 9 广德实. 双色制导导弹的干扰技术研究. [硕士论文] 西安电子科技大学, 2001. 2 ~ 4  
Guang D S. The study of the jamming of dual color guided missiles. (MS Dissertation), Xidian University, 2001. 2 ~ 4

## Performance Analysis of Rosette Scanning Sub-imaging System

He Guojing, Zhang Jianqi, Xu Jun

*Institute of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071*

Received date: 2003-09-01

**Abstract** By use of the method of Modulation Transfer Function (MTF), The effect of MTFs of optical system and detector on the performance of a rosette scanning sub-imaging system was analyzed, with emphasis on that of the detector. Simulation results were given. From the results analysis, a new way of parameters selection for system design was presented.

**Keywords** Rosette scanning; Modulation Transfer Function (MTF); Simulation



**He Guojing** was born in 1978. He is now studying for MS degree in Xidian University majoring in physical electronics. His interest field is performance evaluation and simulation of IR imaging system.