

# 基于图像评价的国外空间相机调焦方法

曹启鹏 叶钊\* 董小静 尹欢 朱军

航天东方红卫星有限公司, 北京 100094

**摘要** 空间相机调焦技术关系着相机的成像质量,为空间相机在轨测试中的一项关键技术。基于图像评价的调焦技术,结构简单,集成度高,在空间相机中已经得到了应用。其关键技术是要建立调焦评价函数。调焦评价函数是指导调焦过程的依据。阐述了造成相机离焦的主要因素,在调研分析国外相机调焦评价函数的基础上,对调焦评价函数的选用原则进行了归纳,并介绍了常用调焦函数的基本形式和优缺点,为相机调焦技术的研究提供借鉴和帮助。

**关键词** 光学设计;空间相机;调焦;图像;评价函数

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.011102

## A Method of Focusing of Foreign Space Camera Based on Image Evaluation

Cao Qipeng Ye Zhao Dong Xiaojing Yin Huan Zhu Jun

*Dong Fanghong Small Satellite Limited Company, Beijing 100094, China*

**Abstract** Focusing technique of space camera has relation to camera image quality, being one of the key technologies of on-orbit test of spacecamera. Image based focusing technique with simple structure is highly intergrated, which is used in space camera. The key of Image based focusing is to establish focusing evaluation function. Focusing evaluation function can provide guidance for the focusing process. This paper discusses the influence caused by defocus. Based on the study on focusing evaluation function methods of foreign space camera, some instructional conclusions about choosing focusing evaluation function method and advantages and disadvantages are obtained, which provide reference and help for space camera focusing technique.

**Key words** optical design; space camera; focusing; image; evaluation function

**OCIS codes** 110.4100; 110.6770; 120.1880; 120.6085; 260.5950

### 1 引言

空间遥感相机的运行平台是卫星、飞船以及空间站等各种空间飞行器。这些飞行器在发射过程以及在轨运行过程中,其外界环境会发生剧烈的变化。特别是振动、冲击以及压力和温度变化等因素,会使空间遥感相机的焦面偏离最佳位置,导致成像质量下降。

随着图像分辨率越来越高,离焦对图像质量的影响较为明显,为了消除离焦的影响,很有必要将相机的焦面调整到最佳位置。高分辨立体成像的出现,对卫星姿态有了更高要求,为了提高空间遥感相机对复杂环境的适应能力,也需要及时地修正调焦位置保证成像质量。调焦技术是保证空间遥感相机成像质量的关键技术之一,调焦机构的性能对遥感相机的成像能力具有重要意义。

在相机的调焦过程中,如何辨别相机的最佳焦面位置是目前存在的突出问题。遥感相机不同于普通的数码相机,其成像距离非常远。同时,空间相机的离焦原因也和普通数码相机有着根本的不同。所以普通数码相机中采用的通过测定成像距离来确定焦面位置的方法在空间相机上难以实现。根据卫星轨道的特点,如果采用普通的方法,对固定目标的重访大约需要十几天的时间,加上天气的影响,确定最佳焦面位置

收稿日期: 2014-06-15; 收到修改稿日期: 2014-07-15; 网络出版日期: 2014-11-12

作者简介: 曹启鹏(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事卫星总体设计方面的研究。

E-mail: caoqipeng2004@126.com

\*通信联系人。E-mail: njst@qq.com

可能需要长达几个月的时间,严重影响了用户的使用。空间遥感相机中需要利用特定的检焦方法。

图像是相机的最终输出,因此通过图像来判断相机的成像水平是最直接的方法。基于图像的调焦技术关键是利用图像信息判断相机的调焦状态,通过移动相机焦面位置,并在每个位置计算对应的评价函数值,最终得到评价函数的“过焦曲线”。曲线的横坐标为移动步数或焦面位置,纵坐标为评价函数值,评价函数一般为调制传递函数(MTF)或者其他评价指标。根据数字图像处理理论,数字图像信号的能量大部分集中在其频谱的低频和中频段,而图像的细节部分则由高频成分体现。同时根据图像质量评价理论,离焦导致图像模糊的根本原因就是图像的部分边缘信息丢失,即高频分量减少。光学系统在正确调焦状态时,图像具有最多的图像边缘信息且高频成分含量最高,成像最清晰,相反随着离焦程度的增加,图像越来越模糊。基于图像调焦方法就是根据这一原理实现检焦,由于不同的环境条件,焦面位置不同;因此,通过调焦只能获得在当前环境下的最好成像质量的焦面位置。

相机调焦技术的重点和难点为确定其评价函数。评价函数应体现有效、方便、快速的特点。在国外的空间相机中,对调焦评价函数的研究从20世纪80年代就已经开始。而目前国内对空间相机的调焦评价函数的研究还比较少。本文通过跟踪、收集、梳理和分析国外空间相机调焦评价函数的发展情况,对调焦评价函数的研究情况进行分析归纳和总结,为今后我国空间相机调焦技术的发展提供参考。

## 2 遥感相机离焦的主要原因

空间相机从发射到在空间的运行过程,其环境因素的剧烈变化,成像距离的变化,以及飞行过程中的振动等因素都可能会导致空间相机的机械结构和光学系统参数发生改变并最终引起空间遥感相机离焦。

### 2.1 大气压力变化对聚焦的影响

空间相机在飞行过程中,相机中空气的压力会随高度的变化而改变。气压变化又将使得空气的密度变化,所以其折射率相应的也会发生变化。这将导致相机的焦面发生一定的偏移。其中单一透镜焦距随相机后截距空气压力变化的计算公式为

$$\Delta f \approx n_a \times f \times \left( \frac{n_a - 1}{n_g - 1} \right) \times \left( \frac{P - P_0}{P_0} \right), \quad (1)$$

式中  $f$  为镜头焦距,  $n_g$  为玻璃折射率,  $n_a$  为空气折射率,  $P$  为周围环境大气压力,  $P_0$  为标准大气压力。

从(1)式中可以看出,大气压力增加会使得焦距变长,焦面向远离镜头偏移;相反大气压力减小时,焦距变短,焦面向镜头方向偏移。另外大气压力的变化同时还导致镜头零件中间的空气密度变化,这同样将会引起空间相机焦面发生偏移,引起离焦。

### 2.2 温度变化对聚焦的影响

温度变化将会引起空间相机上零件的热应变,包括线性膨胀和收缩。所以零件的曲率半径、厚度和直径也将随温度变化而改变。由于各个零件的膨胀系数不同,各零件在发生热应变时可能还会引起结构的变形。这些都能导致空间相机离焦。若只考虑温度使镜头玻璃折射率  $n_g$  的变化以及空气折射率  $n_a$  的变化所造成的焦面偏移,则温度变化引起单片薄透镜焦面的位移量公式为

$$\Delta f = \Delta T \times f \times \frac{n_g n_a - n_g}{n_g}, \quad (2)$$

式中  $n_a$  为空气折射率随温度的变化量,  $n_g$  为玻璃折射率随温度改变的变化量,  $\Delta T$  为温度变化量。

### 2.3 成像距离对聚焦的影响

当空间相机光学镜头物镜的物方焦距和像方焦距相等且一定时,成像公式为

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{f} = \frac{1}{f}, \quad (3)$$

式中  $l'$  为像距,  $f$  为物距,  $f'$  为光学镜头焦距。

根据以上成像公式,当物距为无限远时像距等于焦距。当空间遥感相机在轨成像时,其成像物距即为轨道高度(一般为几百公里)。相对于遥感相机光学镜头的焦距,成像物距可以被看作无穷大。而由飞行高度误差(万米量级)引起的像距变化即焦面的偏差也是较小的,一般是微米级可以忽略不计。

### 3 国外空间相机调焦评价函数研究情况

国外在空间相机调焦评价函数上的研究起步较早,从20世纪90年代起,法国和美国先后开展该方面的研究,并取得了丰硕的成果。

#### 3.1 法国的空间相机调焦评价函数研究情况

法国Thales公司在SPOT系列的卫星相机(如图1所示)的调焦技术研究中,针对SPOT-2、SPOT-5卫星的技术特点,先后提出了绝对MTF方法、相对MTF方法和自动检测方法(星上)三种方法。三种方法具有各自特点:

##### 1) 绝对MTF方法

方法原理比较简单,即对地面靶标进行在轨MTF测量,但是受轨道的运行周期,卫星或相机的侧摆能力,以及天气、气象条件限制;该方法效率较低,对正常任务运行影响较大。

##### 2) 相对MTF方法

需要一定的前提条件,效率高,对正常任务运行影响较小。

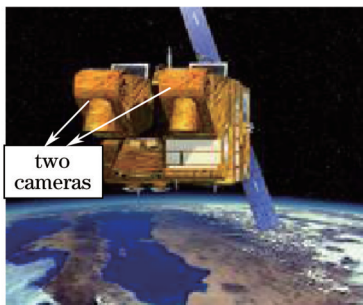


图1 SPOT-5卫星在轨飞行图(图中白线标示为相机)

Fig.1 SPOT-5 satellite in-orbit flight scheme  
(white lines indicate cameras)



图2 相机对自带靶标采用自动检测方法成像的图像

Fig.2 Picture of camera's own target imaging with  
auto-detection method

Thales公司不定期利用地面靶标对SPOT-5卫星的两台相机的MTF进行测试,其结果如图3所示。从中可看出,两台相机的MTF值逐年下降。

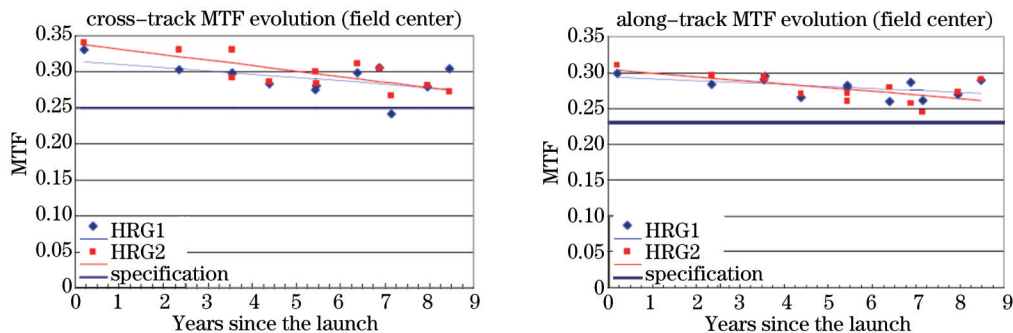


图3 SPOT-5卫星两台相机每年的MTF值

Fig.3 MTF of two cameras in SPOT-5 satellite for each year

采用相对MTF方法的前提条件为:两个相机的图像中具有相同的成像区域,成像区域的地形应包含的频率范围较宽(从低频到高频),如城市目标。其方法为对相同的区域的图像在相同的频率下,计算两个相机的MTF比值(HRG2/HRG1);考虑到MTF的测量精度,图像的空间频率选择的范围为 $0.25f_s \sim 0.35f_s$  ( $f_s$ 为采样频率,  $f_n = 0.5f_s$ ,  $f_n$ 为奈奎斯特频率)<sup>[1]</sup>。

图4为采用相对MTF方法对SPOT-5卫星的两台相机的相对MTF进行监测的情况,并在2010年采用该方法重新调整了两台相机的焦面位置。

##### 3) 自动检测方法

需要在相机上安装靶标(其靶标图像见图2),在卫星发射前,在实验室进行标定,给出其位置与MTF对应的离焦模型,即需获得一定的先验知识。但是,由于实验室标定时环境与在轨运行的环境的不可能完

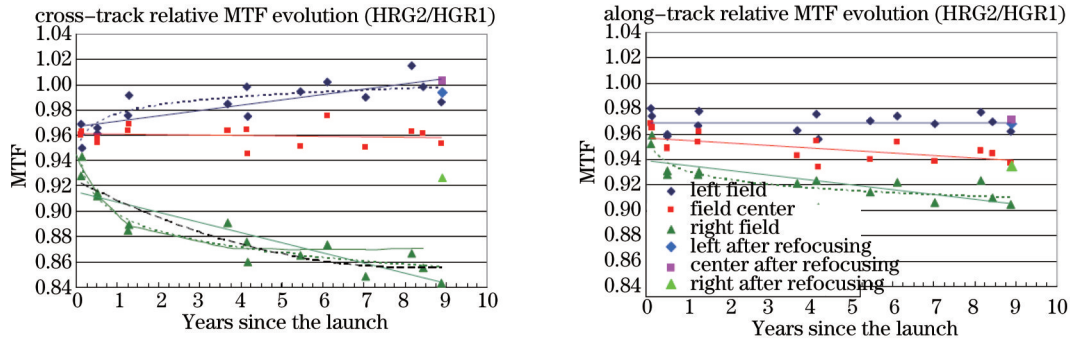


图4 SPOT-5卫星两台相机各视场每年的相对MTF值

Fig.4 MTF of all view-field of two camera in SPOT-5 satellite for each year

全一致,这使得相机的离焦模型的准确性不高,也即该方法确定的位置与真实的焦面位置存在一定差距。该方法效率高,对正常任务运行影响小。

自动检测方法在使用时不用移动焦面,仅对靶标成像,测量靶标的对比度。SPOT-5卫星每月测试一次靶标的对比度。根据实验室标定的位置与对比度的关系曲线(对比度与焦面位置为抛物线模型,见图5,该模型的灵敏度为每移动2步对应变化0.01),以及对比度的测试值来判定目前相机的离焦程度<sup>[2]</sup>。

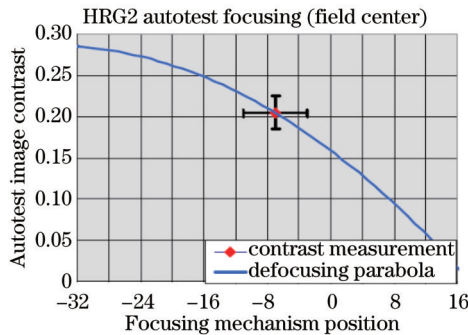


图5 实验室标定对比度与焦面位置的关系曲线

Fig.5 Relationship between laboratory calibration of contrast and focal plane position

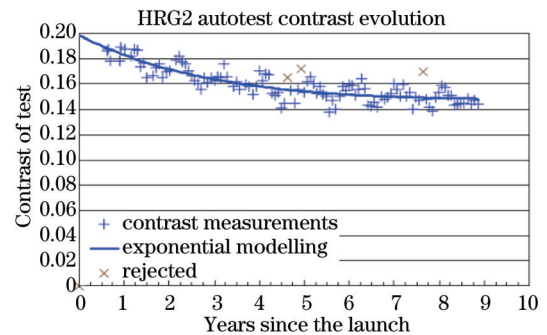


图6 HRG2相机在轨9年采用自动检测方法测试的对比度值

Fig.6 Contrast of test by the use of auto-detection method for HRG2 camera in-orbit 9 years

在轨9年来,HRG2相机定期采用“自动检测”方法测试靶标的对比度,如图6所示。从中可看出,对比度逐年衰减(在2011年前,除在轨测试时调焦一次外,中间未调焦),共衰减了0.04,对应8步的焦面位置变化。

在2010年,对HRG2相机的MTF进行测试,发现MTF的相对值从2002年的0.96降至0.77,相当于焦面移动了12步。

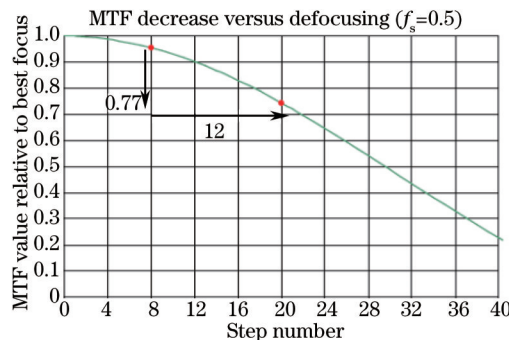


图7 2010年HRG2相机的MTF测试结果(MTF相对值为对最佳焦面处MTF的归一化值)

Fig.7 MTF test results of HRG2 camera in 2010 (MTF relative value is the normalized value of optimum focal plane position)

以上三种方法中,绝对MTF法效率较低,且精度不高;相对MTF方法需要卫星上存在两台或两台以上数量的相机,这些相机的拍摄图像中具有重叠部分的前提条件;而自动检测方法需要星上增加硬件设备,增

加了卫星的重量,且受空间环境影响,其准确性不高。

当前国际上的大部分卫星很少有类似于 SPOT-2、SPOT-5 卫星上存在两台能同时对相同区域成像的相机的配置方式。大部分卫星上只有一个相机,或成像无重叠的多个相机。故相对 MTF 方法很难应用于 Pleiades 卫星的相机调焦。Thales 公司从 2009 年起对 Pleiades 卫星的相机调焦技术进行了研究,提出了基于神经网络法的调焦技术,如图 8 所示。并利用 SPOT-2 卫星的相机(也存在 2 台相机,且 2 台相机的成像区域有重叠部分)通过在一轨内拍摄 5 次图像(见图 9),对该方法进行同步验证,且评价了多个视场点的图象,如图 10 所示,测试结果如图 11 所示,从中可看出神经网络法和相对 MTF 方法的平均偏差约为 1 步,吻合度很高,其一致性良好(平均差 1 步)。该方法目前在 Pleiades 卫星上得到了很好的应用。Thales 公司未公布神经网络法的内核函数(即评价函数)。据推测,应为综合考虑多种特征的一种评价函数<sup>[3]</sup>。

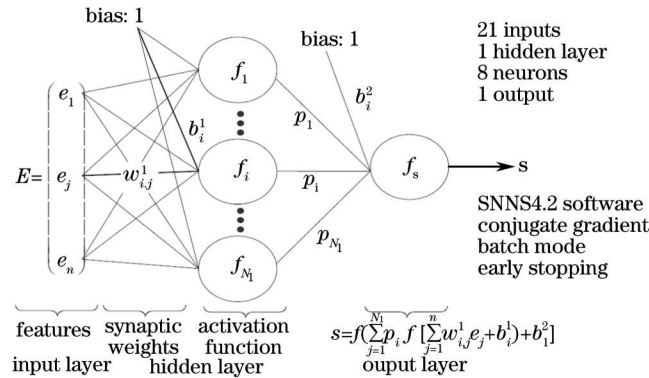


图 8 神经网络法示意图

Fig.8 Neural network scheme



图 9 SPOT-2 卫星的相机在欧洲图卢兹附近的拍摄图像的情况

Fig.9 Situation of camera of SPOT-2 shooting image near Toulouse

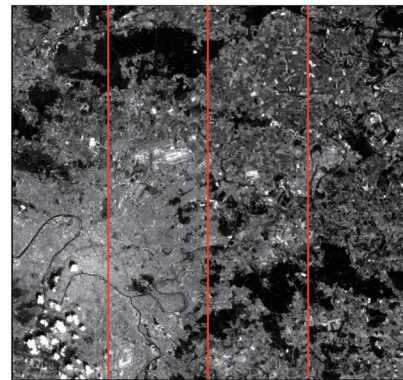


图 10 SPOT-2 卫星 4 片 CCD 的数据

Fig.10 Image data of SPOT-2 satellite 4 CCD

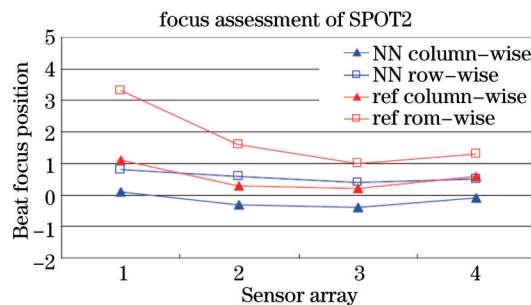


图 11 神经网络法在 SPOT-2 卫星上与相对 MTF 法的比较结果

Fig.11 Results of comparison between neural network and relative MTF in SPOT-2 satellite

神经网络法应用时,最好选取对气象条件较好,无云的城市目标进行成像。该方法的优点为:快速、高效,理论上能在一轨内完成相机的调焦;不需要参考信息,或对固定目标成像或特殊图像(靶标等)。

### 3.2 美国的空间相机调焦评价函数研究情况

从1999年起,美国开始了高分辨率商业遥感卫星时代。其第一颗分辨率商业遥感卫星 IKNOS-2 卫星在轨经历了多次调焦过程,如图 12 所示。最近的一次调焦为在 2006 年 10 月 16 日调整了 4 步。相机离焦的原因主要受相机的次镜温度影响,其关系如图 13 所示。

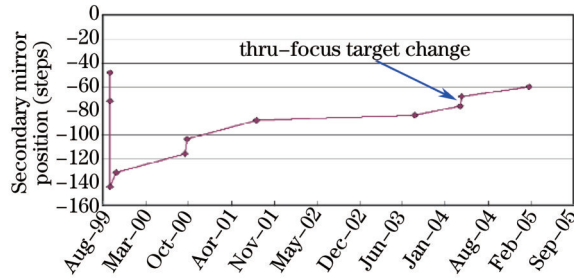


图 12 1999 年至 2005 年的调焦情况

Fig.12 Situation of focusing from 1999 to 2005

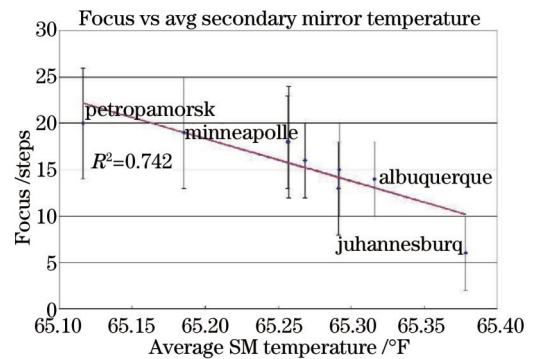


图 13 IKNOS-2 卫星相机焦面位置与次镜温度的对应关系

Fig.13 Relationship between focal plane position and secondary mirror in IKNOS-2 satellite

在调焦过程中,相机分别对机场和房顶进行成像,如图 14 所示。由于调焦中,均对相同的目标进行成像,效率较低。ITT 公司未公布其详细的调焦判据,只是较泛泛地说明利用图像的锐度、边缘能量等。

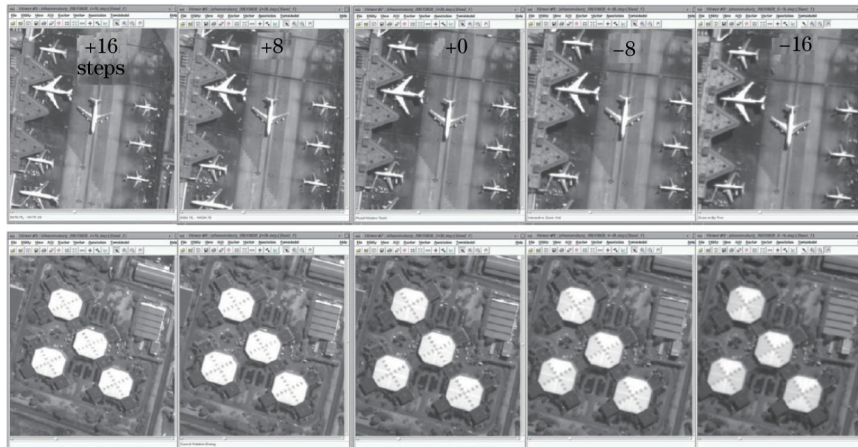


图 14 IKNOS-2 卫星相机不同焦面位置对机场和房顶成像的图像

Fig.14 IKNOS-2 satellite imaging with airport and roof for different focal plane positions

在 2007 年,美国 ITT 公司利用自研的 MTF 测量软件为 Worldview-1 卫星在轨测试时调整定了相机的焦面位置。通过对位于德克萨斯州的 Big spring 靶标(见图 15)进行成像,测量 MTF 值,该靶标可测量沿轨和跨轨两个方向的 MTF。图 16 为用软件计算的中心视场的 MTF 值(两个方向的算术平均值)<sup>[4-5]</sup>。



图 15 测量用的 Big spring 靶标

Fig.15 Big spring target for measuring

在确定最佳焦面位置时,不是将焦面位置放在中心视场 MTF 最大值处(+12 处),而是须综合考虑到各个

视场、不同方向(沿轨和跨轨方向)两种因素,最终选择在“+6”位置处,该位置两个方向各视场的MTF如图17所示。

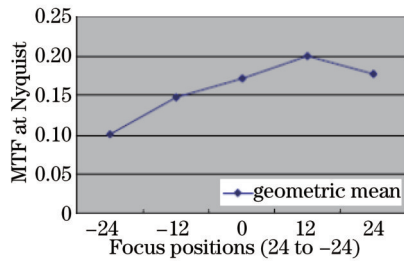


图16 Worldview-1卫星相机中心视场各焦面位置的MTF值

Fig.16 MTF of center view-field of different focal plane positions in Worldview-1 satellite

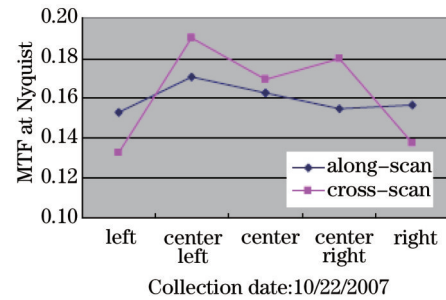


图17 沿轨和横轨两个方向不同视场的MTF值

Fig.17 MTF of along-track and across-track of different view-fields

图18为GEOeye-1卫星调焦过程中不同位置对应的“过焦”图像。ITT公司对MTF测量软件进行了改进,该软件可自动搜索图像中的“刃边”,再利用“刃边法”计算MTF值。这使得不需要在地面铺设固定靶标,卫星对城市目标成像时即可获得大量的天然“刃边”,如图19中的左图。该方法能对相机的全视场的MTF进行评价<sup>[6-10]</sup>。



图18 GEOeye-1卫星三个焦面位置对应的图像(0.8waves对应相机移动120步)

Fig.18 Image for 3 focal plane position in GeoEye-1 satellite (0.8 waves for camera moving 120 steps)

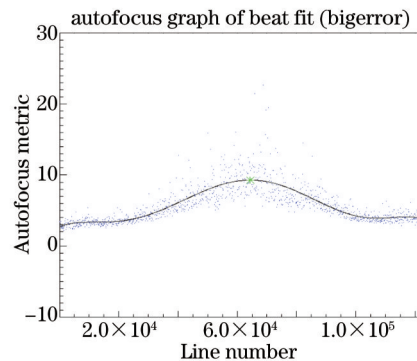
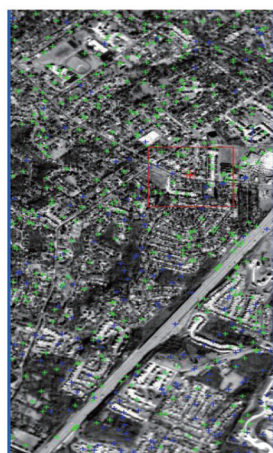


图19 GeoEye-1卫星自动探测最佳焦面情况图

Fig.19 Curve of GeoEye-1 satellite auto detecting optimum focal plane position

## 4 结 论

从国外空间相机调焦技术的发展情况来看,主要具有以下特点:

### 1) 评价函数从单变量到多变量

早期的调焦评价函数一般为 MTF 值, 比较单一, 且容易受气象、光照条件的影响, 使得最佳焦面位置准确性不够高; 随着技术的发展, 评价的要素也越来越多, 包括图像的对比度、边缘能量、梯度和信息熵等。Thales 公司提出的神经网络法为典型的多变量评价函数。

### 2) 多个视场、两个方向评价

为了客观地确定相机的最佳焦面位置, 综合考虑多个视场以及沿轨和横轨两个扫描方向的评价函数值, 使得在各个视场、各个方向都能获得较好的成像质量。

### 3) 智能化、自动化评价

以 MTF 为调焦评价函数的早期处理, 多选用典型地物场景如桥梁、大坝等或人工铺设靶标, 场景提取的单一固定, 评价不能适应复杂不变的地表特征; 采用自动获取图像中典型地理特征的 MTF 能够更加准确、客观的评价图像, 增加调焦精度。

## 参 考 文 献

- 1 D Leger, F Viallefont, P Deliot, *et al.*. On-orbit MTF assessment of satellite cameras [J]. Post Launch Calibration of Satellite Sensors, 2004. 67-76.
- 2 D Leger, F Viallefont, E Hillairet, *et al.*. In-flight refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS cameras [C]. SPIE, 2003, 4881: 224-231.
- 3 Steven Person. On-orbit MTF measurement and product quality monitoring for commercial remote sensing systems [C]. JACIE, Virginia, 2006-03-16.
- 4 Nancy E Podger. Overview of image quality performance of the GeoEye-1 high resolution imaging satellite [C]. JACIE, Virginia, 2012.
- 5 Glenn Reese. On-orbit initialization of the worldview-1 optical focal system using the ITT MTF measurement toolkit [C]. JACIE, Virginia, 2008.
- 6 Françoise Viallefont-Robinet, Dominique Leger. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement [J]. Opt Express, 2010, 18(4): 3531-3545.
- 7 Françoise Viallefont-Robinet. Edge method for on-orbit defocus assessment [J]. Opt Express, 2010, 18(20): 20845-20851.
- 8 Stephen J Schiller, John Silny. The Specular array radiometric calibration (SPARC) method: a new approach for absolute vicarious calibration in the solar reflective spectrum [C]. SPIE, 7813: 78130E.
- 9 Xu Zhitao, Liu Jinguo, Long Kehui, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0728001.  
许志涛, 刘金国, 龙科慧, 等. 高分辨率空间相机调焦机构精度分析 [J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0728001.
- 10 Zhao Zhibin, Liu Jinghong. Power spectra-based auto-focusing method for airborne optoelectronic platform [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3495-3500.  
赵志彬, 刘晶红. 基于图像功率谱的航空光电平台自动检焦设计 [J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3495-3500.