

一种推扫型敏捷遥感卫星星上自动调焦技术

谭伟^{1,2*}, 齐文雯^{1,2}, 何红艳^{1,2}, 邢坤^{1,2}

¹北京空间机电研究所, 北京 100094;

²先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094

摘要 调焦评价函数的性能是影响推扫型遥感卫星星上自动调焦的重要因素。结合敏捷遥感卫星的成像特点和星上处理单元的计算特性,设计了一种敏捷遥感卫星自动调焦策略,提出了一种改进的灰度梯度函数以作为调焦评价函数。该方法在传统灰度梯度函数基础上,结合图像边缘信息与离焦状态的关系,将灰度标准差作为边缘阈值,提取了有效边缘信息并计算图像清晰度。研究结果表明,所提方法具备高灵敏度、强单峰性和良好的时效性,对调焦成像时的场景变化和噪声具有很高的鲁棒性,相比其他常用灰度域调焦评价函数具有明显优势。

关键词 遥感; 敏捷卫星; 自动调焦; 评价函数; 灰度梯度

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0528002

An On-Board Autofocusing Method for Scanning Agile Remote Sensing Satellite

Tan Wei^{1,2*}, Qi Wenwen^{1,2}, He Hongyan^{1,2}, Xing Kun^{1,2}

¹Beijing Institute of Space Mechanics and Electronics, Beijing 100094, China;

²Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing 100094, China

Abstract The performance of focusing evaluation function is an important factor that affects the on-board autofocusing of a scanning remote sensing satellite. Based on the imaging properties of the agile remote sensing satellite and computing characteristics of the on-board processing unit, an autofocusing strategy of the agile remote sensing satellite is designed, and an improved gray gradient function is proposed as the focusing evaluation function. Based on the traditional gray gradient function and the relationship between image edge information and defocus state, the proposed method takes gray standard deviation as the edge threshold to extract the effective edge information and calculate the image definition. The study results show that the proposed method has high sensitivity, strong unimodality and good timeliness, and is robust to the scene change and noise in the process of focusing imaging. Compared with other commonly used gray scale focusing evaluation function, the proposed algorithm shows obvious advantages.

Key words remote sensing; agile satellite; autofocusing; evaluation function; gray gradient

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 110.3000

1 引 言

调焦是空间光学遥感相机成像系统中的重要环节,通过调焦使光学系统对目标进行准确对焦,获取清晰图像,确保相机的成像性能^[1]。对焦良好的光学系统,其图像相比离焦图像具有三大特点:1)在空域具有更多的灰度细节信息;2)在频率具有更丰富的高频信息;3)图像灰度层次更明显^[2-3]。依据对焦

和图像的关系,调焦评价函数通常可分为三大类:灰度梯度型函数、频谱型函数和灰度信息熵型函数^[4-6]。一个理想的自动调焦评价函数应具备高灵敏度、高鲁棒性、良好的单调性、无偏离以及高实时性等特性^[7-8]。上述调焦评价函数应用于近景成像系统的自动调焦时,调焦场景目标变化一般较小,目标与背景对比度几乎不变,这些方法大多应用效果良好。对于低轨推扫型遥感卫星,被摄景物迅速变化,且由于大

收稿日期: 2019-10-09; 修回日期: 2019-11-04; 录用日期: 2019-11-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504801)、国家重点研发计划地球观测与导航重点专项(2016YFB0500802)、国家自然科学基金(61701023)

* E-mail: blacktanphay@126.com

气、光照条件的变化,图像对比度和信噪比也处于变化之中,常规调焦评价函数难以适用^[9]。

推扫型遥感卫星多运行于太阳同步轨道,常采用时间延迟积分电荷耦合传感器(TDICCD)作为图像传感器,沿着卫星飞行方向对地物进行推扫成像,相比地球同步轨道遥感卫星,推扫型遥感卫星获取的图像场景始终处于变化之中。随着卫星技术发展,出现了一类重量轻、体积小、机动性强、姿态控制精度高的新型推扫型敏捷遥感卫星^[10]。相比早期遥感卫星,这类卫星除了进行常规点目标成像,还能进行多条带拼接成像、立体成像和近凝视成像等,国际上 Pleiades 和 Worldview 卫星星座及中国高景卫星星座均是推扫型敏捷遥感卫星的典型代表。随着敏捷遥感卫星技术的发展,卫星机动成像性能越来越高,星上计算和处理单元资源也更充足。为了找到适合于推扫型敏捷遥感卫星的星上自动调焦方法,利用敏捷遥感卫星的机动成像性能,结合卫星星上计算特性,对星上自动调焦方法进行了研究,包括调焦策略设计和调焦评价函数优化,设计了一种利用机动成像进行近凝视成像的调焦策略,提出了以改进的灰度梯度阈值函数作为调焦评价函数的推扫型敏捷遥感相机星上自动调焦方法。

2 离焦成像原理

对于理想对焦的光学系统,物方点光源经光学系统后,在像方形成点像;离焦时,点光源的像为光斑,且离焦越严重,光斑半径越大。由点光源组成的目标经过离焦光学系统后,每一个点光源信号经光学系统点扩散函数作用后扩散到邻近点光源并互相混叠。从光信号处理上看,光学系统表现为一个低通滤波器,其截止频率与离焦程度相关度很高,对焦良好的光学系统的截止频率高于离焦系统的截止频率,且离焦越严重,截止频率越低。离焦成像对图像的影响主要表现为图像清晰度退化,对比度下降,目标细节信息和图像高频信息损失^[11]。

遥感相机对地成像时,被摄目标可以看作是由无数个光源组成的,这些点光源通过光学系统成像^[12]。成像型光学系统一般可视为线性移不变系统,其成像模型^[13]为

$$\mathbf{F}(X, Y) = \mathbf{f}(x, y) * \mathbf{h}(x, y) + \mathbf{n}(x, y), \quad (1)$$

式中: x, y 分别为目标在物方平面的横坐标与纵坐标; X, Y 分别为目标在像方平面的横坐标与纵坐标; $\mathbf{F}(X, Y)$ 为光学系统的像方矩阵; $\mathbf{f}(x, y)$ 为物方矩阵; $\mathbf{h}(x, y)$ 为光学系统的点扩散函数(此处仅

考虑光学系统本身,不考虑大气点扩散函数); $\mathbf{n}(x, y)$ 为噪声;* 表示卷积运算。遥感相机具有大口径、长焦距的特点,属于衍射限成像系统^[14],同时由于少量像差残差的存在,点扩散函数反映了光学系统中衍射效应和像差共同的影响^[15]。透镜光学系统点光源成像示意图如图 1 所示。

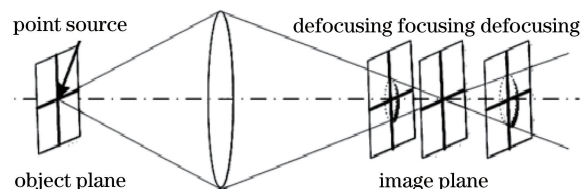


图 1 透镜系统点光源成像示意图

Fig. 1 Imaging scheme of point light source for lens optical system

3 自动调焦方法设计

3.1 调焦策略设计

相比商业相机,星载遥感相机的星上自动调焦目前主要受制于以下三点:1)运算能力受限,计算单元多基于数字处理器(DSP)或现场可编程门阵列(FPGA)^[16],无法进行复杂运算;2)数据存储受限,无法对庞大的数据流进行实时缓存、计算和刷新;3)景物特征受限,推扫型遥感相机地速极快,画幅内景物特征变化较大,没有类似商业相机对同一场景进行评估。因此,星上自动调焦功能的实现主要从以下几方面进行设计。

1) 相机成像期间,对全画幅图像进行开窗处理。一般来说,光学系统中心对应的这一部分图像质量较好,因此选取每一帧图像中心部分进行计算,并将计算结果作为该帧图像清晰度判据。

2) 结合星上运算能力,主要考虑运算相对简单的灰度梯度评价算法,并针对提高算法的鲁棒性进行改进和优化。

3) 星上进行自动调焦时,卫星姿态主要以俯仰方向为主,小范围侧摆保证对目标地物的近似凝视成像状态,可确保调焦期间地物几乎不变或小范围变化。调焦期间成像示意图如图 2 所示,其中 $p_i (i'=1, 2, \dots, n')$ 表示卫星位置, n' 为卫星数目。采用机动成像模式可确保调焦期间被摄目标信息变化较小,通过提高调焦评价算法的鲁棒性来控制成像路径及观测时几何参数的变化对目标图像信噪比和对比度的影响。

3.2 调焦算法设计

结合星上处理硬件的运算能力和存储特点,主

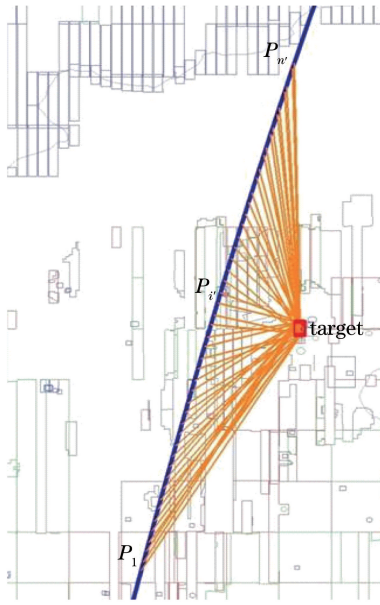


图 2 自动调焦期间卫星成像示意图

Fig. 2 Imaging scheme of satellite during autofocusing period
 要考虑几种星上可实现的方法,即基于灰度域的几种清晰度评价方法,如平均灰度梯度、点锐度、平均边缘强度、平均边缘宽度等,并通过阈值对图像信噪比和成像场景目标的微小变化等进行抑制,以提高鲁棒性。

本文主要研究图像平均灰度梯度函数的适用性,并进行相应改进。梯度函数采用图像上相邻像素的差分计算出局部梯度,然后在此基础上建立图像清晰度评价函数。灰度梯度函数^[17]定义为

$$k(i, j) = \frac{\sum_{i=2}^N \sum_{j=2}^M [|I(i, j) - I(i, j - 1)| + |I(i, j) - I(i + 1, j)|]}{M \times N}, \quad (2)$$

式中: i, j 为图像中某像素的位置编号, i 为行数, j 为列数; $I(i, j)$ 为图像像素的灰度值; M, N 为图像长、宽像素数; $k(i, j)$ 为图像平均灰度梯度。考虑到星上调焦时地物特征的轻微变化以及成像期间可能存在的逆光现象以及大气噪声等,在计算过程中需考虑算法的信噪比,即鲁棒性。相比非边缘区域,图像边缘具有较大的灰度梯度值,对焦面变化更为敏感,但在整幅图像中所占比例较小。阈值的作用是确保提取图像中对焦面变化敏感的边缘信息,剔除对焦面不敏感的冗余信息。因此,考虑阈值时,一方面阈值应该能够确保剔除冗余梯度,另一方面阈值要具有一定的自适应性。

$$T_r = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i, j) - \mu]^2}, \quad (3)$$

式中: T_r 为阈值; μ 为图像灰度均值。在利用(2)式计算得到梯度图像矩阵后,逐像元进行阈值判断,仅当 $k(i, j)$ 为大于 T_r 时,将该像元作为边缘像元保留,其他像元舍弃。

作为对比,分别将所提算法与点锐度、平均边缘强度、平均边缘宽度这三种灰度域图像清晰度评价函数进行对比。为了对比的有效应,这三种方法也采用阈值判断的方法进行有效边缘信息筛选。这三种评价函数模型分别如下。

a) 点锐度函数^[18]

点锐度算法是一种灰度梯度函数法,其思想是通过统计图像某一边缘法向方向的灰度变化情况来评价图像清晰度,即灰度变化越剧烈,边缘越清晰,图像就越清晰,其计算方法为

$$D = \frac{\sum_{l=a}^b (dg/dl)^2}{|g(b) - g(a)|}, \quad (4)$$

式中: a, b 为图像中某两个像素; l 为以像素数为单位的距离变量; dg/dl 为灰度变化率; $|f(b) - f(a)|$ 为总体灰度变化值; $g(\cdot)$ 为某像素的灰度梯度。

b) 平均边缘强度函数^[19]

计算平均边缘强度一般是先进行边缘提取,利用两个卷积核形成边缘检测算子,利用这两个核对图像中的每个像素作卷积运算,一个核对垂直边缘影响最大,另一个对水平边缘影响最大。

$$e(i, j) = \sqrt{[I(i, j) * S_1]^2 + [I(i, j) * S_2]^2}, \quad (5)$$

式中: $e(i, j)$ 为在每个像素处提取的平均边缘强度; S_1, S_2 为边缘检测算子。该算法的原理是对选定的图像用同样窗口进行卷积运算,得到图像的梯度值,并与预设的值进行比较,得到的结果大于预设值就可作为边缘点输出。最后整幅图像清晰度为

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N e(i, j). \quad (6)$$

c) 平均边缘宽度函数^[20]

在遥感图像中,边缘一般是具有一定宽度的渐变边缘,且各边缘的宽度不一致。发生离焦模糊后,边缘的扩散程度也不尽相同,弱边缘的扩散程度比强边缘大,从而导致无法准确评估模糊量。从理论上分析,当离焦程度相同时,无论图像中景物如何变化,图像中类似阶跃变化的边缘扩展程度应一致,而非阶跃边缘的扩展程度则各不相同。其水平边缘图像 E_v 和垂直边缘图像 E_h 计算公式分别为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_v = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{S}_v^{\text{Sobel}} * I(i, j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * I(i, j) \\ \mathbf{E}_h = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{S}_h^{\text{Sobel}} * I(i, j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I(i, j) \end{cases}, \quad (7)$$

式中： $\mathbf{S}_v^{\text{Sobel}}$ 、 $\mathbf{S}_h^{\text{Sobel}}$ 分别为沿图像行、列方向的 Sobel 边缘提取矩阵。

将行边缘与列边缘按各自权值相加即为图像平均边缘宽度。

4 实验分析

设计三组实验对本文提出的自动调焦算法进行分析,分别是利用卫星成像实例进行离焦仿真分析、通过实验室模拟卫星在轨成像进行近景成像实验以及利用国外敏捷遥感卫星 Worldview-1 图像进行仿真实验分析。

4.1 卫星成像实例仿真分析

以 Worldview-1 卫星对天安门地区凝视图像为计算对象。根据相机参数对图像进行离焦仿真,以焦深(D_{OF})为单位,离焦量仿真范围为 $-1.5D_{\text{OF}} \sim +1.667D_{\text{OF}}$,每帧图像之间焦面相差 $0.1667D_{\text{OF}}$ (即 $1/6D_{\text{OF}}$),共计连续 20 frame 图像。部分图像的局部区域如图 3 所示,在凝视成像期间,相机对同一目标的拍摄面各不相同,景物特征发生了变化,且部分角度的图像由于逆光现象出现了饱和溢出,这两种现象都为检测调焦评价算法鲁棒性提供了良好的参考。

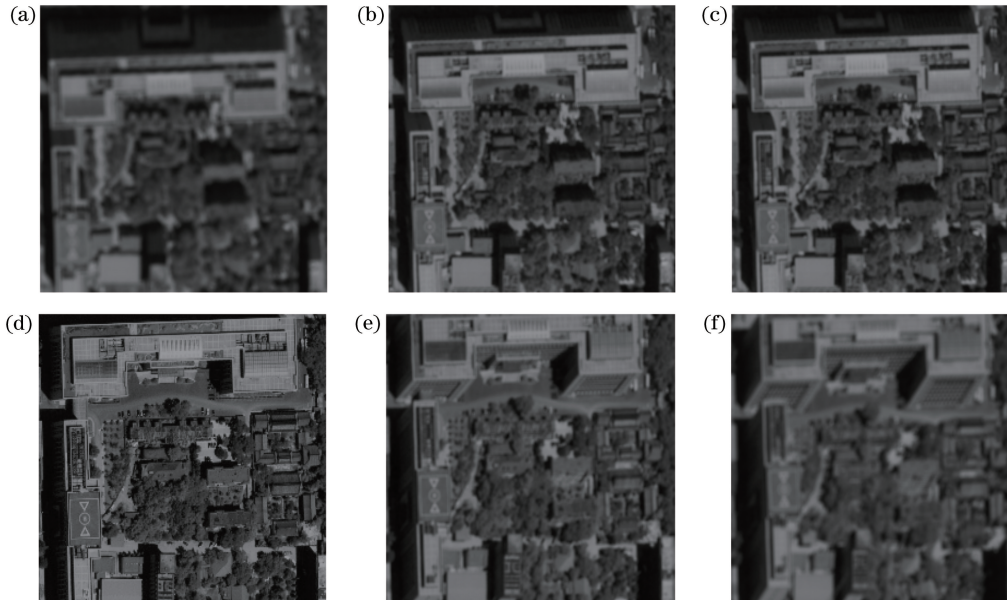


图 3 Worldview-1 凝视成像模式下离焦仿真图像示意图。(a)~(f)不同焦面图像
Fig. 3 Scheme of simulated defocusing images under Worldview-1 gaze imaging mode.

(a)–(f) Images with different focal planes

分别采用本文提出方法和其他三种灰度域方法进行调焦性能对比。本文计算平台基于 Matlab。计算耗时方面,本文方法、平均边缘强度法、平均边缘宽度法和点锐度法分别为 17.5, 20.2s, 199 和 16.7 s;清晰度评价性能方面,结果如图 4 所示。

根据计算结果可知,在卫星成像实例调焦仿真分析中,本文方法和其他三种方法均展现了良好的调焦性能,随焦面的变化表现出了相同的变化趋势,

离焦量越大,结算结果越小,但相比之下,本文方法对离焦变化更为敏感。同时,考虑计算耗时,本文方法稍差于点锐度函数,但优于平均边缘宽度和平均边缘强度函数。

4.2 近景成像实验分析

结合卫星在轨工作模式,在实验室搭建相应的实验环境模拟在轨自动调焦时的成像过程。利用工业 CMOS 面阵相机和三维转台搭建平台以模拟卫

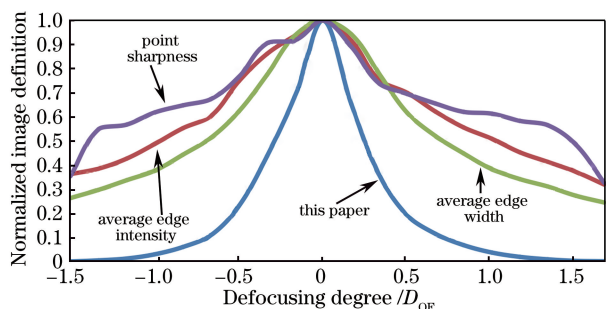


图 4 四种不同调焦评价函数计算结果对比

Fig. 4 Comparison results of four refocusing evaluation functions

星平台及机动状态,以卫星图像展板作为目标靶来模拟地物,以高度为 600 km 的典型近地轨道,焦距为 10 m 的遥感相机为模拟对象。实验室模拟成像实验示意图如图 5 所示。按照遥感卫星轨道高度与地球半径的比例关系,设定相机组件(包括 CMOS 相机及转台)、目标靶与模拟地心之间的比例关系,由于转台和相机不方便模拟卫星绕地心的运动,因此,固定转台和相机位置,在以模拟球心为中心、以相应缩放距离为半径的圆弧上移动目标靶,展板相对方位不变化。通过在水平方向转动转台,模拟在轨自动调焦期间的俯仰成像。

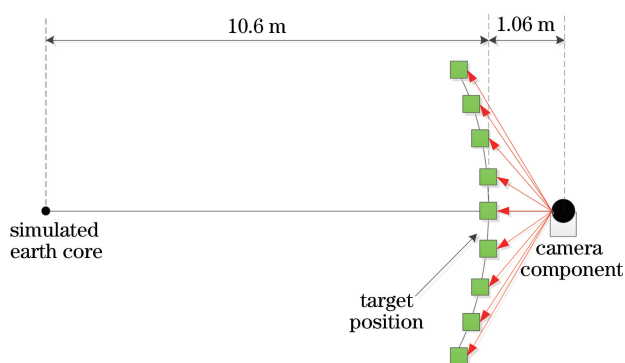


图 5 实验室模拟成像实验示意图

Fig. 5 Schematic of simulated imaging experiment in laboratory

自动调焦时卫星通过俯仰机动保持对目标的近凝视成像模式,在实验室中,通过转台水平方向的转动配合展板的移动来模拟俯仰成像,在图 5 所示的圆弧上按固定圆周角 1.5° 依次移动目标靶,进行 16 个焦面位置的成像。为了模拟连续调焦过程,以某个位置为最佳焦面,在最佳焦面正反方向逐渐增大离焦量。由于缺乏参试相机光学系统的设计参数,因此离焦量以相对量来表示,0 表示最佳焦面位置, $-X$ 表示负向离焦量, $+X$ 表示正向离焦量,不同位置对应的离焦量如表 1 所示。

表 1 焦面与目标位置序号关系

Table 1 Relation between target position No. and defocusing amount

Target position No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Defocusing degree	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0

随着目标靶位置的移动,相机相同视场内的目标在俯仰方向存在一定的差异,这与卫星实际俯仰

成像时相似,部分成像结果如图 6 所示。

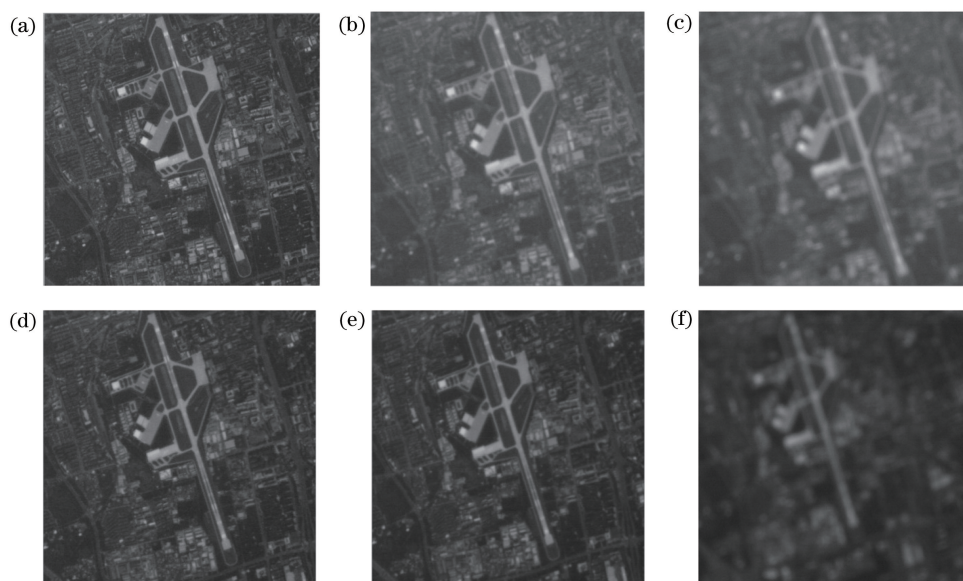


图 6 近景成像实验示例。目标位置序号:(a) 6;(b) 4;(c) 2;(d) 7;(e) 9;(f) 11

Fig. 6 Examples of close-range imaging experiment. Target position No. : (a) 6; (b) 4; (c) 2; (d) 7; (e) 9; (f) 11

分别对本文所提方法和其他三种灰度域方法进行调焦性能对比。本文方法、平均边缘强度法、平均边缘宽度法和点锐度法的计算耗时分别为 10.4, 15.7, 57.1, 8.5 s。清晰度性能对比如图 7 所示。

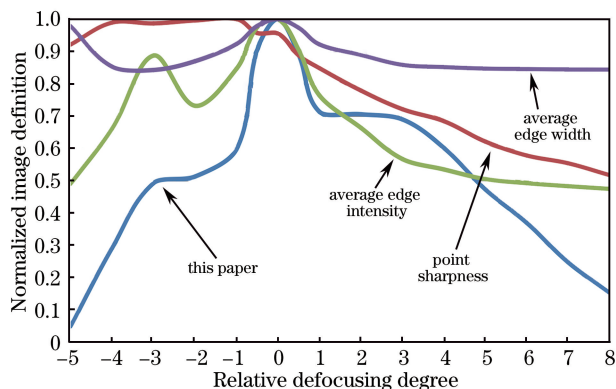


图 7 四种不同调焦评价函数计算结果对比

Fig. 7 Comparison results of four refocusing evaluation functions

由图 7 和表 1 可知,仅本文方法、平均边缘强度法能较好地识别焦面变化,但平均边缘强度法出现了局部极大值;另外,除了本文方法,其他三种调焦评价函数均不满足单调性要求。在计算时效性方

面,本文方法稍逊于点锐度法;同时,本文方法虽然在部分焦面处出现敏感性较差的现象,但可通过调整调焦策略进行优化。

4.3 仿真成像实验分析

由于 4.1 节中采用的 Worldview-1 图像为压缩图像,信息有一定损失,为了进一步验证自动调焦算法的有效以及对噪声的鲁棒性,采用超高分辨率敏捷遥感卫星 Worldview-3 的原始全色图像进行实验研究,图像像元分辨率为 0.31 m。假定调焦目标区域为相机画幅中心所对应的地面景物区域,大小为 1000 pixel×1000 pixel,对敏捷遥感卫星在轨凝视成像调焦状态下进行仿真,即:1)相邻帧图像之间存在相对移动,地物目标出现变化,以对焦图像为中心,相对像移量以像素为单位,向下像移为负,向上像移为正;2)相邻帧之间焦面状态各不相同,离焦量以相机焦深为单位仿真得到,共计 17 个焦面图像。此外,为了模拟卫星成像时散粒噪声对调焦的影响(通常散粒噪声对信号贡献约为 1%),添加均值为 0,均方根为 0.01 的随机噪声,对自动调焦评价函数的鲁棒性进行验证。仿真图像序号与对应离焦量、像移量如表 2 所示。部分仿真图像如图 8 所示。

表 2 图像序号与离焦量及像移量的关系

Table 2 Relation among image No. defocusing degree and image motion amount

Image No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Defocusing degree / D_{OF}	-4.02	-3.04	-2.04	-1.54	-1.04	-0.84	-0.64	-0.32
Image motion amount /pixel	26	22	20	18	16	14	12	10
Image No.	9	10	11	12	13	14	15	16
Defocusing degree / D_{OF}	0	0.3	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	3.0
Image motion amount /pixel	0	4	2	-2	-4	24	-6	-8

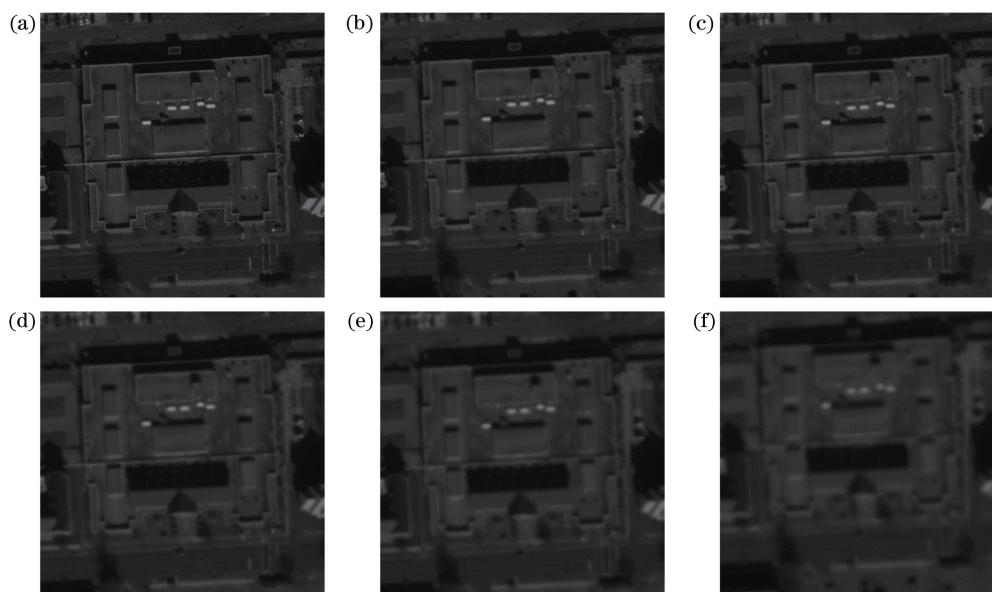


图 8 仿真实验图像示例。图像编号:(a) 9;(b) 11;(c) 13;(d) 14;(e) 15;(f) 16

Fig. 8 Image example of simulation experiment. Image No. : (a) 9; (b) 11; (c) 13; (d) 14; (e) 15; (f) 16

分别对本文所提方法和其他三种灰度域方法进行调焦性能对比。本文方法、平均边缘强度法、平均边缘宽度法和点锐度法的计算耗时分别为 4.4, 5.3, 9.1, 3.5 s。清晰度的对比如图 9 所示。

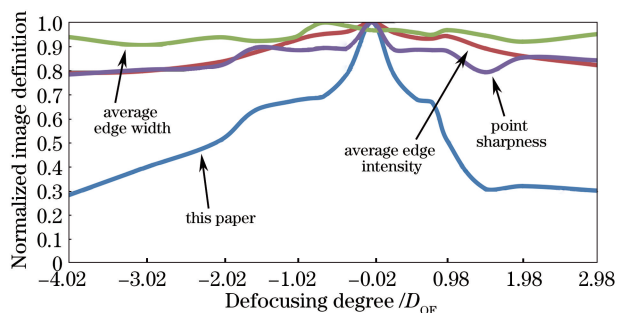


图 9 四种不同调焦评价函数计算结果对比

Fig. 9 Comparison results of four refocusing evaluation functions

由图 9 可知,在添加了随机噪声和像移的仿真实验中,仅本文方法对离焦变化表现出了良好的敏感性,但在局部区域出现了一个次峰(该次峰与相邻焦面的调焦评价函数计算结果的相对变化量分别为 3.2% 和 6%),其他三种方法则出现了多个次峰,说明本文方法对噪声的鲁棒性优于其他三种函数。计算耗时结果与 4.1 节和 4.2 节中结果表现一致,优于平均边缘强度和平均边缘宽度函数,稍差于点锐度函数。

5 结 论

利用推扫型敏捷遥感卫星的机动能力,对自动调焦策略和调焦评价函数进行了设计和改进,并进行了可行性验证。研究表明,所提方法在离焦灵敏度、单调性及鲁棒性方面均优于其他几种传统灰度域调焦评价函数,而实时性稍逊于点锐度函数,优于其他两种灰度评价函数。研究结果为新一代敏捷遥感卫星上自动调焦提供了一定的理论依据,可作为后续遥感卫星开展星上智能处理和自主健康管理的技术积累和参考。受限于当前卫星硬件的计算能力,无法对其他类型调焦评价函数进行研究,有待结合硬件的升级开展更多的算法验证。

参 考 文 献

[1] Chen S P. Some issues about space remote sensing [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(3): 1-8.
陈世平. 关于航天遥感的若干问题[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(3): 1-8.

[2] Leger D, Viallefont F, Emmanuel H, et al. In-flight

refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS cameras[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4881: 224-231.

- [3] Begni G, Leger D, Dinguirard M. An in-flight refocusing method for the SPOT HRV cameras[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1984, 50(12): 1697-1705.
- [4] Daigo H, Yamauchi T, Watanabe A, et al. Detection of actual focus variations by focus automatic measurement[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 861-870.
- [5] Guo C Z, Ma Z L, Guo X, et al. Fast auto-focusing search algorithm for a high-speed and high-resolution camera based on the image histogram feature function [J]. Applied Optics, 2018, 57(34): F44-F49.
- [6] Zhao H, Bao G T, Tao W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 531-536.
赵辉, 鲍歌堂, 陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 531-536.
- [7] Tan W, Yang B X, He H Y. A new definition evaluation method for remote sensing images of satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(2): 50-57.
谭伟, 杨秉新, 何红艳. 一种新的遥感影像清晰度评价方法[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(2): 50-57.
- [8] Ni J, Yuan J H, Wu Q Z. Identification for optical image definition based on edge feature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 172-176
倪军, 袁家虎, 吴钦章. 基于边缘特征的光学图像清晰度判定[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 172-176.
- [9] Ikeda O. Optical array imaging system with improved focusing function [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 1993, 76(12): 2108-2113.
- [10] Zhang X W, Dai J, Liu F Q. Research on working mode of remote sensing satellite with agile attitude control [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 32-38.
张新伟, 戴君, 刘付强. 敏捷遥感卫星工作模式研究 [J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 32-38.
- [11] Mo C H, Liu B, Ding L, et al. A gradient threshold auto-focus algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 323-327.
莫春红, 刘波, 丁璐, 等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 323-327.
- [12] Li Q, Feng H J, Xu Z H. Auto-focus apparatus with digital signal processor [J]. Proceedings of SPIE,

- 2005, 5633: 416-423.
- [13] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. Qin K C, Liu P S, Chen J B, et al., Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2006: 114-116.
Goodman J W. 傅里叶光学导论 [M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 114-116.
- [14] Jarvis R A. Focus optimization criteria for computer image processing [J]. Microscope, 1976, 24(2): 163-180.
- [15] Chern N N K, Neow P A, Ang M H. Practical issues in pixel-based autofocusing for machine vision [C]//Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164), May 21-26, 2001, Seoul, Korea. New York: IEEE, 2001: 2791-2796.
- [16] Jin S, Cho J, Kwon K H, et al. A dedicated hardware architecture for real-time auto-focusing using an FPGA [J]. Machine Vision and Applications, 2010, 21(5): 727-734.
- [17] Zhu K F, Jiang W, Wang D F, et al. New kind of clarity-evaluation-function of image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 464-468.
朱孔凤, 姜威, 王端芳, 等. 一种新的图像清晰度评价函数 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 464-468.
- [18] Zhang L X, Sun H Y, Guo H C, et al. Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 605-610.
张来线, 孙华燕, 郭惠超, 等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法 [J]. 光子学报, 2013, 42(5): 605-610.
- [19] Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 794-809.
- [20] Qu Y F, Pu Z B, Zhao H J, et al. Influence factor analysis of sensitivity of focus criteria function [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 902-906.
屈玉福, 浦昭邦, 赵慧洁, 等. 调焦评价函数灵敏度的影响因素分析 [J]. 光学学报, 2005, 25(7): 902-906.