

基于方向 WPS 改进 TDI CCD 遥感图像清晰度评价函数

陶淑苹^{1,2}, 张续严¹, 金光¹, 曲宏松¹, 郑亮亮¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在轨调焦是航天相机获取高质量图像的关键技术之一。针对航天相机在发射、在轨期间由于振动冲击及温度气压等环境参数变化引起的光学系统离焦现象,以及 TDI CCD 遥感相机成像场景实时变化的特殊特点,对基于功率谱的清晰度评价函数进行了研究。根据小波变换的多分辨率和带通特性,提出了一种对 FFT 功率谱的改进——小波功率谱(WPS)估计。针对像移亦会导致 TDI CCD 图像模糊的问题,提出了方向 WPS 估计算法。参照功率谱地物无关性及离焦会引起功率谱高频分量损失的思路,设计了基于方向 WPS 的加权清晰度评价函数。实际外场推扫实验结果表明,提出的新清晰度评价函数能有效反映出实际推扫图像的离焦状态,另外相对于 FFT 功率谱,对场景差异更不敏感,误判率从 0.36 降低为 0,曲线更加饱和。100 个仿真样本的平均误判率仅为 0.06,满足系统误差要求。因此文中算法满足单调性、灵敏度高、准确度高原则,更适合 TDI CCD 遥感相机的自动调焦。

关键词: 自动调焦; 小波; 功率谱估计; 图像清晰度评价函数

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2080-05

Improvement of the definition evaluation function for TDI CCD remote sensing images by directional wavelet power spectrum

Tao Shuping^{1,2}, Zhang Xuyan¹, Jin Guang¹, Qu Hongsong¹, Zheng Liangliang¹,

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Autofocusing is one of the key techniques for space cameras to ensure a high quality image. The optical system of the camera defocuses in all probability due to many influential factors, such as the impulsion or jitter during launching, changes of temperature and air pressure. So, in order to retrieve the defocus, focus measure algorithm based on power spectrum was studied, where the algorithm was used in TDI CCD space cameras which imaging scenes changed anytime. Firstly, an improvement over Fourier transform power spectrum was proposed, namely wavelet power spectrum (WPS) estimation, which took advantage of the multi-resolution and band-passing characters of wavelet transform. Then, directional WPS was proposed in order to reduce the influence of image-moving-mismatching. Lastly, according to the theory that power spectrum is independent of scenes and defocus made the power spectrum's high frequency losing, the evaluation function for image definition was designed, using the weighted sum of

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-01-13

基金项目: 国家 863 计划(O93J32F090); 国家自然科学基金青年基金(60902067)

作者简介: 陶淑苹(1986-),女,助理研究员,博士生,主要从事星载相机 CCD 成像电子学方面的研究。Email:taoshuping-163@163.com

导师简介: 金光(1958-),男,研究员,博士,主要从事光学遥感总体设计研究。Email:jing@ciomp.ac.cn

directional WPS. The experimental results of the real pushbrooming images show that the new definition evaluation method can reflect the real remote images' defocusing state validly. Moreover, the directional WPS is less sensitive to the scenes' variety compared to FFT PSS, which reduces the error ratio from 0.36 to 0, and the curve gets more saturated. In addition, the error ratio of all the 100 emulational samples is only 0.06. So the proposed algorithm meets the principles of monotony, excellent sensitivity and precision, and suits for the autofocus in TDI CCD remote sensing cameras better.

Key words: autofocus; wavelet; power spectrum estimation; evaluation function for image definition

0 引 言

为了获取高质量遥感图像,调焦技术一直是国内外航天领域长久以来的一个研究问题。而且随着遥感相机的智能化发展,图像法调焦将成为必然趋势。图像法调焦技术的核心便是清晰度评价函数。然而目前国内外遥感领域普遍采用的 TDI CCD 相机通过对同一目标的多次延时累加,可大幅提高成像系统灵敏度和信噪比,但是其任意时刻所拍摄的图像都不相同,这给清晰度评价函数的选取和建立带来了极大困难^[1-7]。

为去除评价函数与地物的关联,参考文献[8-9]对图像傅里叶变换(FFT),提出了基于图像功率谱的航空光电平台自动检焦方法,取得了良好效果。但是 FFT 的谱估计方法存在其局限,如只适用于稳态信号分析,分辨率固定,无法兼顾高低频率信号,对噪声敏感等;另外参考文献[8-9]没有考虑像移对成像模糊的影响。由此,提出了二维离散方向小波功率谱估计方法,并在方向小波功率谱基础上设计了清晰度评价函数,用以改进 TDI CCD 遥感相机清晰度评价函数性能。

1 二维离散小波功率谱估计

当所有景物用功率谱在空间频域分析时,大多数任意场景理论上都有大致相同的功率谱^[10],而且对于同一输入图像,离焦越严重,在空域上表现为图像越模糊,而在频域表现为越来越多的高频分量流失^[11],这给功率谱法调焦提供了依据。

考虑一个 $M \times N$ 大小的二维图像 $I(x, y)$, 空间坐标用 (x, y) 表示。传统的功率谱估计方法即为傅里叶功率谱,很容易得到二维图像 $I(x, y)$ 的傅里叶表达式系数,见公式(1)。且根据 Parseval 理论,信号功率

与傅里叶系数满足公式(2)关系^[12]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N I(x, y) e^{-2\pi i y \frac{v}{N}} e^{-2\pi i x \frac{u}{M}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |I(x, y)|^2 = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} |F(u, v)|^2 \quad (2)$$

因此在尺度 (u, v) 的傅里叶功率谱密度定义为:

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 \quad (3)$$

同理,可推导信号的小波功率谱密度估计公式。对有限大小的二维信号周期延拓,可分解为一系列子通道的二维信号的组合:

$$I(x, y) = \sum_{i,j=0}^{\infty} \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \sum_{l=0}^3 w_{i,j}^l(m, n) \psi_{i,m,j,n}^l(x, y) \quad (4)$$

式中: $w_{i,j}^l(m, n)$ 为 $I(x, y)$ 相应于正交基 $\psi_{i,m,j,n}^l(x, y)$ 的分解系数,即二维离散小波系数; $\psi_{i,m,j,n}^l(x, y)$ 为小波函数。设二维平方可积函数空间 $L^2(\mathbb{R})$ 的多分辨率分析为 $\{V_j^2\}_{j \in \mathbb{Z}}$, 则在 $L^2(\mathbb{R})$ 存在唯一的尺度函数 $\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y)$ 与 $\{V_j^2\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 相对应。相应于一维尺度函数 $\phi(x)$ 的小波函数为 $\varphi(x)$, 二维可分离情况具有 3 个生成小波函数 $\psi^l(x, y)$:

$$\begin{aligned} \psi^1(x, y) &= \phi(x)\varphi(y), \quad \psi^2(x, y) = \varphi(x)\phi(y) \\ \psi^3(x, y) &= \varphi(x)\varphi(y) \end{aligned} \quad (5)$$

因此,得到二维 $L^2(\mathbb{R})$ 空间的规范正交的可分离离散小波函数 $\psi_{i,m,j,n}^l(x, y)$:

$$\psi_{i,m,j,n}^l(x, y) = \begin{cases} \phi_{i,m}(x) \cdot \phi_{j,n}(y), & l=0 \\ \psi_{i,m}^l(x) \cdot \psi_{j,n}^l(y), & l=1, 2, 3 \end{cases} \quad (6)$$

$i, j \geq 0, i, j, m, n$ 均为整数。

$$\begin{aligned} \psi_{i,m}^l(x) &= \left(\frac{2^i}{M}\right)^{1/2} \psi\left(\frac{2^i}{M}x - m\right) \\ \psi_{j,n}^l(y) &= \left(\frac{2^j}{M}\right)^{1/2} \psi\left(\frac{2^j}{M}y - m\right) \end{aligned} \quad (7)$$

从上式可知,小波函数是由生成小波扩大 $(2^i, 2^j)$

倍,并转移(m,n)距离后得到的函数族,而且正交于尺度和位移函数^[13]。

公式(4)可改写为:

$$w_{i,j}^1(m,n) = \sum_{x=-\infty}^{\infty} \sum_{y=-\infty}^{\infty} I(x,y) \psi_{i,m,j,n}^1(x,y) \quad (8)$$

式中: w^0 表示低频分量; w^1 表示水平高频分量; w^2 表示垂直高频分量; w^3 表示对角线高频分量。根据 Parseval 理论,将功率与离散小波系数联系起来:

$$\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |I(x,y)|^2 = \sum_{i,j=0}^{\infty} \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{2^i-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{l=0}^3 |w_{i,j}^l(m,n)|^2 \quad (9)$$

则得到尺度(i,j)上的小波功率谱计算公式如下:

$$P_{i,j} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{2^i-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{l=0}^3 |w_{i,j}^l(m,n)|^2 \quad (10)$$

然而,TDI CCD 遥感相机成像模糊并不单纯由离焦引起,像移失配也是关键影响因素^[14]。但是两者产生的模糊分布是不一样的,像移失配只会引起图像在推扫方向的模糊,而离焦引起各个方向的模糊则是均匀的。因此若能提取出垂直轨道方向的信息分量,则可消除像移或偏流失配造成的影响,提高评价准确度。2 维离散小波的多方向分解(只取水平高频分量做质量分析)恰好满足该要求,此时尺度(i,j)上功率谱估计公式变为:

$$P_{i,j} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{2^i-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} |w_{i,j}^1(m,n)|^2 \quad (11)$$

2 清晰度评价函数设计

图像清晰度是表征图像细节能力的物理量,聚焦图像比离焦图像边缘更加锐利,细节信息更加丰富,因此清晰度评价函数是一种有参考的图像质量评价过程。图像法调焦即是以清晰度评价函数为评价标准自动调节镜头或调焦镜直到图像清晰锐利程度最佳,其中清晰度评价函数好坏直接关系调焦结果,是图像法调焦的核心。理想的清晰度评价函数应具有单峰性、精确性、鲁棒性、高灵敏度等特性。因为离焦造成功率谱高频分量流失,而对低频部分几乎无影响^[8];另外考虑到高频可能会受噪声污染,因此选取 0.05 - 0.5 cycles/pixel 间功率谱和(PSS)作为清晰度评价因子:

$$Q_{PSS}^{(1)} = \sum_{\rho=0.05}^{0.5} P_{i,j} \quad (12)$$

另外从离焦模型分析,若对功率谱采用权重加

权,加重高频权重、降低低频权重,则 PSS 值对离焦状态的反应会更加准确、更加灵敏。文中选择功率谱空间频率作为加权因子,得到改进的清晰度评价函数如公式(13)所示:

$$Q_{PSS}^{(2)} = \sum_{\rho=0.05}^{0.5} \rho P_{i,j} \quad (13)$$

3 实验与分析

为对比加权与不加权 PSS 算子的性能,以步长 5 调节调焦编码器码值,在中心码值两侧各得到 15 幅不同离焦量图像。利用基于小波功率谱估计的不加权和加权算子计算得到的清晰度评价函数分别如图 1 空心圆点曲线和实心方点曲线所示,其中横坐标为调焦编码器码值,纵坐标为该码值对应图像利用不同算子得到的清晰度评价价值。计算表 1 各码值区间内两种算子的归一化曲线平均斜率。对比两条曲线及数据可以发现,加权 PSS 算子在保持了良好的单调性同时,加大了曲线斜率,尤其是在准焦位置附近优势尤为明显,从 0.011 增加为 0.023。这不仅增强了评价函数的灵敏度,而且有效减小了误差导致的错误判断,即具备更高的准确性。文中以下实验均采用加权 PSS 算子。

为验证小波 PSS 清晰度评价函数性能,考验其

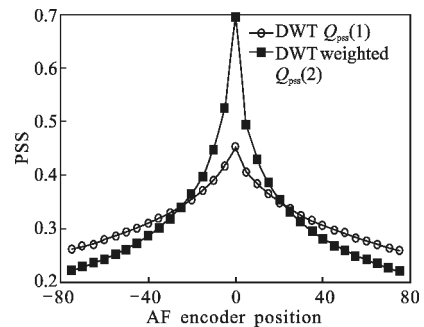


图 1 两种小波 PSS 算子的清晰度评价函数

Fig.1 Evaluation function for image definition calculated by two wavelet PSS operators

表 1 归一化清晰度评价函数曲线斜率对比

Tab.1 Contrast of two normalized definition evaluation function curves' slopes

Normalized curve slope	AF encoder position			
	-80~-20	-20~0	0~20	20~80
$Q_{PSS}^{(1)}$	0.003 7	0.010 9	0.010 6	0.003 6
$Q_{PSS}^{(2)}$	0.003 7	0.023 8	0.022 0	0.003 5

对场景差异的适应性,选取一幅清晰遥感图像,划分为如千子图,如图 2 所示。对各子图按不同调焦步长模糊处理,以得到的不同场景内容且不同离焦量的图像为样本,利用小波 PSS 算子对 5 种调焦步长的共 125 幅不同图像分析计算清晰度值,得到表 2 结果,为了直观显示将评价值图形化,得图 3。

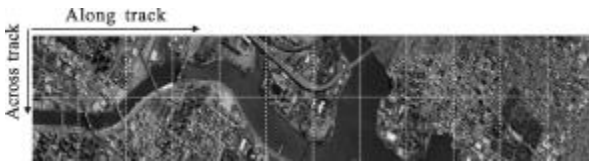


图 2 遥感图像实验样本

Fig.2 Remote sensing image for experiment

表 2 基于小波 PSS 算子的样本清晰度计算值
Tab.2 Samples' definition result calculated by wavelet PSS operator

No	Step				
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
-12	0.263	0.082	0.044	0.026	0.015
-11	0.370	0.113	0.061	0.037	0.020
-10	0.530	0.154	0.079	0.053	0.028
-9	0.506	0.159	0.078	0.052	0.026
-8	0.526	0.195	0.106	0.059	0.031
-7	0.559	0.233	0.115	0.069	0.035
-6	0.933	0.444	0.205	0.124	0.071
-5	0.700	0.433	0.226	0.134	0.068
-4	0.535	0.423	0.287	0.166	0.080
-3	0.889	0.816	0.658	0.499	0.262
-2	1.000	0.867	0.831	0.803	0.653
-1	0.852	0.873	0.873	0.873	0.873
0	0.976	1.000	1.000	1.000	1.000
1	0.852	0.873	0.873	0.873	0.873
2	0.904	0.848	0.812	0.789	0.594
3	0.846	0.803	0.600	0.469	0.243
4	0.520	0.383	0.250	0.155	0.075
5	0.689	0.406	0.211	0.129	0.066
6	0.831	0.397	0.192	0.120	0.068
7	0.509	0.216	0.108	0.067	0.035
8	0.487	0.180	0.098	0.058	0.030
9	0.474	0.152	0.077	0.052	0.026
10	0.463	0.144	0.077	0.053	0.028
11	0.331	0.110	0.059	0.037	0.020
12	0.239	0.077	0.041	0.026	0.014

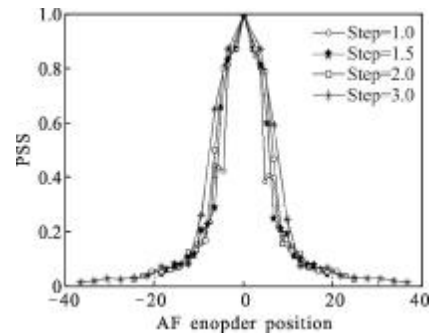


图 3 不同调焦步长的小波 PSS 清晰度评价曲线

Fig.3 Definition evaluation curves with different focus step by wavelet PSS operator

从表 2 和图 3 可以看出当步长为 0.5 时,场景差异会引起评价结果约 1/3 错误,但步长为 1 时误判减少为 3 个,1.5 步长时误判更是降低为 0。可见小波 PSS 算子对于场景差异的误差小于 1.5 个离焦量引起的评价值变化。设评价值小于 0.1 时为远焦、大于 0.5 时为近焦,分别统计各区段评价值的错误数,得到误判率,如表 3 所示。观察表 3 数据可以发现近焦位置样本评价值误判率最高,为 0.166 7,但 7 个误判全部为步长 0.5 的情况;另外在可分辨能力内(除去步长 0.5 情况)所有样本的平均误判率仅为 0.06,满足设计要求。

表 3 样本清晰度误判率

Tab.3 Error ratio of the definition evaluations

	Error number	Total number	Error ratio	
0 < PSS ≤ 0.1	3	41	0.073 2	
0.1 < PSS ≤ 0.5	4	42	0.095 2	
0.5 < PSS ≤ 1	include step=0.5	7	42	0.166 7
	uninclude step=0.5	0	24	0
ALL	include step=0.5	14	125	0.112 0
	uninclude step=0.5	6	100	0.06

为进一步验证文中算法性能,与基于 FFT 功率谱的评价方法进行对比。从 TDI CCD 遥感相机地面外场成像实验图片中,选取成像最清晰图片,将该图像对应调焦编码值定为中心点,在中心点左右两侧各选取 12 幅码值不同场景不同的图像,并按码值大小对图像顺序编号(中心码值图像编号为 0)。分别利用 FFT 和小波 PSS 算子计算它们的清晰度,得到归一

化清晰度评价函数曲线,如图 4 所示。进一步计算得到误判率结果如表 4 所示。观察图 4 和表 4,两种方法评价函数值都反映出实际遥感图像的高焦状态;但明显小波 PSS 算子对场景差异的适应性更强,误判率从 FFT 算子的 0.36 下降为 0,而且评价函数曲线更饱和。因此基于小波功率谱估计的清晰度评价函数具有更高的准确度和灵敏度,调焦性能更优。

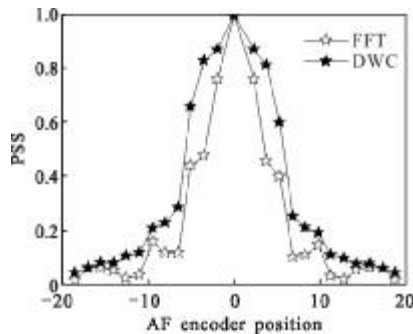


图 4 基于小波和 FFT 功率谱清晰度评价函数对比

Fig.4 Contrast of the definition evaluation functions based on wavelet and FFT power spectrum

表 4 基于小波和 FFT 功率谱方法的误判率

Tab.4 Error ratio of the methods based on wavelet and FFT power spectrum

Total number	DWC		FFT	
	Error number	Error ratio	Error number	Error ratio
25	0	0	9	0.36

以上实验证明基于小波功率谱的加权 PSS 算子能满足 TDI CCD 遥感相机特有成像特点,所构建的清晰度评价函数满足单调性、灵敏度高、准确度高原则,在 TDI CCD 遥感相机地面外场成像实验中表现出最佳性能。

4 结论

文中利用小波变换的多分辨率和带通特性,提出了一种基于方向小波功率谱的新型清晰度评价函数,并对新评价函数进行了实验验证。实验结果表明:基于小波功率谱的清晰度评价函数能有效反应实际遥感图像的高焦状态;在其可分辨能力内误判率仅为 0.06,满足设计要求。另外方向 WPS 相对 FFT PSS 降低了对地物相关性的要求,对于同样的实验样本,FFT PSS 误判率为 0.36,而小波则为 0;而且基于小波功率谱的清晰度评价曲线更为饱和;

即文中算法从准确度和灵敏度两方面完善了调焦性能。可见提出的基于小波功率谱的清晰度评价函数能满足 TDI CCD 遥感相机特有成像特点,这为 TDI CCD 遥感相机在轨实时调焦奠定了基础。

参考文献:

- [1] Brenner J F, DDW B S, Horton J B, et al. An automated microscope for cytologic research[J]. *Journal of Histochemical and Cytochemical*, 1971, 24: 100-111.
- [2] Vollath D. Automatic focusing by correlative methods[J]. *Microscopy*, 1987, 147: 279-288.
- [3] Subbarao M, Choi T S, Nikzad A. Focusing techniques[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2824-2836.
- [4] Zhang Huichai, Christopher Gould, Bill Roberts, et al. An objective image focus monitor for CD-SEM [C]//SPIE, 2008, 6922(692226): 1-8.
- [5] Liang Minghua, Wu Zhiyong, Chen Tao. Autofocusing adjustment of theodolites by largest the gradient method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(12): 3016-3020. (in Chinese)
- [6] Ni Jun, Yuan Jiahu, Wu Qinzhong. Identification for optical image definition based on edge feature[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(1): 172-176. (in Chinese)
- [7] Huang Yan, Xu Qiaoyu, Ye Dong, et al. Autofocus method based on autocorrelation of derivative image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3435-3440. (in Chinese)
- [8] Zhao Zhibin, Liu Jinghong. Power spectra based auto-focusing method for airborne optoelectronic platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3495-3500. (in Chinese)
- [9] Wang Haixia, Wang Xin, Xu Shuyan, et al. Application of image power spectra in the refocusing of high resolution remote sensing camera[J]. *Optical Technique*, 2006, 32: 464-467. (in Chinese)
- [10] Nill Norman B, Bouzas Brian H. Objective image quality measure derived from digital image power spectra[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(4): 813-825.
- [11] Li Qi. Studies on the theory and implementation method of digital autofocus technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [12] Jesu's Pando, Fang Lizhi. Discrete wavelet transform power spectrum estimator [J]. *Physical Review E*, 1998, 57(3): 3593-3601.
- [13] Wang Yiwen, Liu Xianli, Xie Hui. A wavelet-based focus measure and 3-D autofocusing for microscope images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 1063-1069. (in Chinese)
- [14] Xiu Jihong. Arial image quality evaluation based on power spectra [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)