

基于颤振探测和编码曝光的快速图像复原方法

何丽蓉 黄加紫 冯华君 徐之海 李 奇 陈跃庭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 编码曝光方法是基于扩频技术的思想,通过对快门的编码将传统的快门频谱扩展到更宽的频带上,保留更多图像的频域信息,方便图像信号的恢复。提出了一种基于光纤陀螺振动探测和编码曝光的颤振模糊图像复原方法,介绍了编码曝光和颤振探测的基本理论,实现最优编码码字的选取。利用光纤陀螺进行颤振轨迹探测,并使用统计的方法估计点扩展函数(PSF),将复杂的几何计算问题转化为简单的统计问题,降低运算复杂度,提高运算速度。提出的方法主要用于复原由卫星平台颤振引起的遥感成像模糊,实验结果表明,该方法能够实现快速的复原,对于快速获得高分辨率遥感图像具有重要意义。

关键词 图像处理;快速复原;编码曝光;颤振探测;点扩展函数估计

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0910003

Research on Fast Restoration of Blurred Vibration Image Based on Vibration Detection and Coded Exposure

He Lirong Huang Jiazi Feng Huajun Xu Zhihai Li qi Chen Yueting

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Coded exposure (CE) is based on technology of spread spectrum. By advantage of CE, imaging restoration can be used by method of inverse filtering. A method of fast restoration of blurred vibration image based on CE is introduced, as well as basic theory of coded exposure and vibration detection, to achieve the best code. The vibration path is detected by using fiber-optic gyroscope, and point spread function (PSF) is estimated by means of statistic, which can reduce algorithm complexity, and improve operating rate. The method put forward aims at remotely-sensed blurred image, which is blurred due to vibration of satellite platform. Experimental results indicate that this method has absolute advantage in processing speed and image restoration result, and it is significant for getting high resolution remote sensing images fast.

Key words image processing; fast restoration; coded exposure; vibration detection; point spread function estimation

OCIS codes 100.1830; 100.2000; 110.1758

1 引 言

对于传统的曝光模式,相机在曝光时快门始终处于开启状态,拍摄运动物体时,会在拍摄的图像上产生运动模糊。这种传统的曝光模式相当于一个盒状滤波器与图像进行卷积,在这个过程中会丢失很

多高频成分,使得此类模糊图像的复原成为一个病态问题^[1]。

2006年,Raskar等^[1]提出了一种编码曝光(CE)方法,即在相机曝光时间段内快速开、关快门,该方法能够改变运动模糊图像的形成过程,将原来的盒状滤

收稿日期: 2014-03-21; 收到修改稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(61475135)

作者简介: 何丽蓉(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学图像处理和图像复原等方面的研究。

E-mail: helr_aier@163.com

导师简介: 冯华君(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学成像系统和遥感等方面的研究。

E-mail: fenghj@zju.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号:S042011523S)

波器变为带宽滤波器,保留图像中的高频成分,使得图像的复原成为一个良态的问题,从而能够快速地使用反卷积方法获得清晰图像。随后在2009年,Agrawal等^[2-3]研究了CE方法用于控制快门状态的最优码字搜索问题。在国内编码曝光的方法也逐渐得到重视。2010年,石光明等^[4]提出利用CE的方式获得模糊图像,再通过图像重构获得高分辨率的清晰图像。为了能够自动获取运动模糊长度,解决纹理背景条件下的局部运动模糊问题,2011年,徐树奎等^[5]提出了一种基于混合CE的运动模糊图像复原方法,扩展了CE技术的应用范围。2012年,黄魁华等^[6]提出了一种在考虑电荷耦合器件(CCD)噪声条件下的CE最优码字搜索方法,并验证了其可行性。

到目前为止,CE的方式均用于对运动物体的成像,并对成像结果进行复原,得到清晰的图像,但

是由于该算法对物体的运动方式以及运动量的大小都有一定的限制,因此无法得到广泛的使用。本文将CE用于遥感颤振图像的获取,采用双轴光纤陀螺实时探测卫星平台的振动过程,处理系统根据光纤陀螺测量获得的颤振数据和成像相机曝光过程的时间编码值快速计算得到图像退化点扩散函数。鉴于颤振是由相机抖动造成的,因此获得的点扩展函数(PSF)是全局适用的,可以直接对整幅图像进行处理。CE的方式保留了图像的高频信息,在复原的过程中通过直接滤波的方法,可以大幅提高复原速度,快速获得清晰的遥感图像。

2 系统整体结构

系统的整体结构如图1所示。

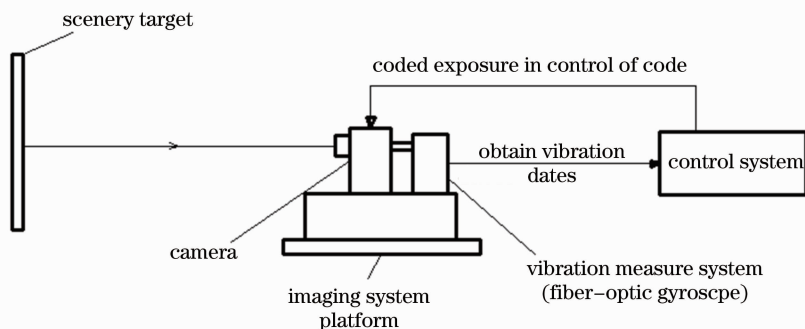


图1 系统总体结构图

Fig. 1 System overall structure

成像相机在系统的控制下进行CE,获得颤振模糊图像。同时将两个光纤陀螺分别与相机进行刚性连接,且使其敏感轴相互垂直以实现对其 x 轴和 y 轴旋转角速度的探测,根据物像关系进而得到颤振轨迹,由颤振轨迹估计模糊图像的点扩散函数。用估计的点扩散函数对CE获得的颤振模糊图像进行直接滤波,得到复原的图像。要准确计算颤振模糊图像的点扩散函数,就要获取曝光时间内光纤陀螺

输出的电压信号,在实际应用中,可利用单反相机闪光同步信号确定其焦平面快门的开启和关闭时刻,由此确定光纤陀螺输出数据的选取。

3 理论基础

3.1 编码曝光

对于传统的曝光模式,在曝光时间 T 内获得的图像,相当于一个时间域上的盒状滤波器与图像的

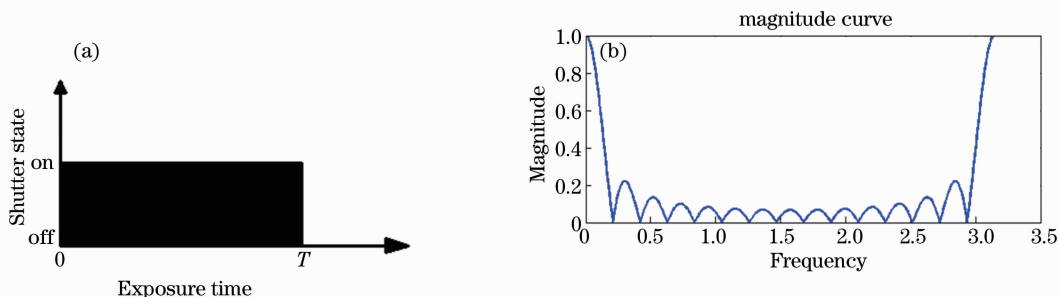


图2 (a)传统曝光模式；(b)傅里叶变换幅值曲线

Fig. 2 (a) Traditional exposure pattern; (b) Fourier transform amplitude curve

卷积,传统曝光模式如图 2(a)所示,将其转化到频域中,得到其傅里叶变换的幅值曲线如图 2(b)所示,可以看到,幅值曲线在频域上有很多的零点。

图像在退化过程中可以看作是原始图像在退化函数的作用下再加上噪声函数。将其表示在频域中为

$$G(u, v) = H(u, v)\mathcal{F}(u, v) + N(u, v), \quad (1)$$

式中 $G(u, v)$, $H(u, v)$, $\mathcal{F}(u, v)$, $N(u, v)$ 分别为模糊图像、退化函数、原始图像和噪声的傅里叶变换形式。

在图像复原中最简单的方法是直接逆滤波,该方法是用退化函数除退化图像来计算原图像的傅里叶变换为

$$\hat{F}(u, v) = \mathcal{F}(u, v) + \frac{N(u, v)}{H(u, v)}, \quad (2)$$

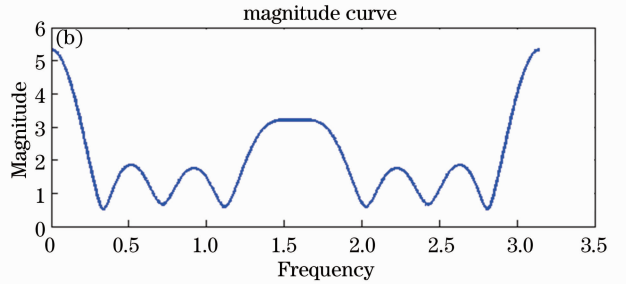
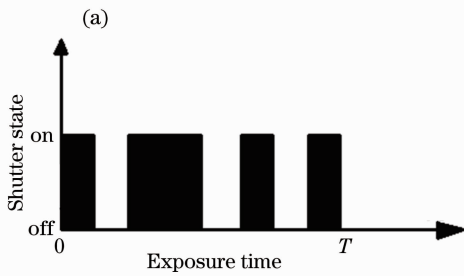


图 3 (a) CE 模式; (b) 傅里叶变换幅值曲线

Fig. 3 (a) Coded exposure pattern; (b) Fourier transform amplitude curve

将其转化到频域中,得到其傅里叶变换的曲线如图 3(b)所示,可以看出,CE 得到的频谱图中没有零点,不存在频谱值为零而无法逆滤波或者噪声被无限放大的问题。这使得图像复原成为一个良态的问题,可以使用直接逆滤波的方法来得到复原的图像,提高了图像复原的效率。

3.2 颤振探测

光纤陀螺是一种根据萨格奈克效应探测角速率和角位置的光纤传感器,其由探测到的相移计算出旋转角速度,旋转角速度与相移的关系为

$$\omega = \frac{\bar{\lambda}c}{4\pi RL}\phi_s. \quad (3)$$

式中 $\bar{\lambda}$ 为光纤中传播的光波的平均波长, c 表示真空中的光速, R 表示光纤环半径, L 表示光纤长度, ϕ_s 表示萨格奈克相移。

将两个光纤陀螺分别与相机进行刚性连接,并且使其敏感轴互相垂直以实现对其 x 轴和 y 轴的旋转角速度的探测,进而通过积分得到角位置数据,并根据物像关系计算得到像面上的颤振轨迹。

以绕 x 轴方向的颤振为例,假设光纤陀螺测量所得的角速度为 $\omega_x(t)$,且相机在某次成像过程中,曝光起

由图 2(b)可知,在传统的曝光模式下获得的 $H(u, v)$ 中包含若干个零点,其作为分母,会将图像中的噪声无限的放大,严重影响复原结果,造成了图像复原的病态性。

引入扩频技术的思想,提出 CE 的成像模式,通过对快门的编码将传统的快门频谱扩展到更宽的频带上。传统曝光模式相当于一个盒状滤波器与图像进行卷积,在这个过程中会丢失很多的高频部分,而 CE 的模式相当于是一个宽带滤波器与图像进行卷积,使得图像的频域信息得到更好的保护。现将给定的曝光时间 T 分为 m 个时间片,每一个时间片持续的时间为 T/m ,控制快门在不同的时间片内的开关,则形成了 CE。

始时刻为 t_1 ,曝光时间为 T ,则可知在 t 时刻,距离成像系统 l' 处的像面上像沿 x 方向的运动位置为

$$X(t) = \int_{t_1}^t \omega_x(t')l'dt'. \quad (4)$$

同理可得到 y 方向的运动位置,因此,在 CCD 平面上,以曝光起始时刻的位置为原点,则可得光纤陀螺每个采样时刻像的坐标位置 $[X(t), Y(t)]$,进而得到像面上的颤振轨迹。

4 码字选取

在 CE 的过程中需要码字来控制快门开闭,此处为方便编程控制,使用一个长度为 m 的二进制码来控制快门的开关。用“1”表示快门开启,“0”表示快门关闭,则得到了 CE 的码字

$$C = [C_1, C_2, C_3, \dots, C_m], \quad C_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}. \quad (5)$$

码型的选取一般要遵循以下的几条原则:

1) 编码中“1”“0”转换的次数应当适中,过多的转换次数会导致相机触发器的频繁触发,损坏硬件;过少的转换次数则起不到 CE 的作用;

2) 编码的首尾应当都为“1”, 否则就相当于缩短了预先定义的码长;

3) 编码中“1”的个数要适当, 如果“1”的个数过小会丢失绝大部分光, 同时光子噪声不可忽略, 导致所拍摄图像质量下降, 不利于图像的复原; 如果“1”的个数过多, 快门基本处于打开状态, 则相机趋向于传统的全曝光, 失去了 CE 的意义。

码字的选择对于 CE 十分重要, 它直接决定了复原所需要的点扩散函数, 而按照上述原则, 一个长度为 m 的码字可以有 2^{m-2} 种不同的组合, 为了使复原的结果达到最佳, 需要点扩散函数满足以下几点要求 1) 点扩展函数的幅值 $|H(u)|$ 没有“0”点; 2) 点扩展函数的幅值曲线尽量要平稳, 因为其尖锐变化会导致结果的剧烈变化造成结果的不稳定。3) 为了降低噪声对复原结果的影响, 应使点扩展函数的幅值 $|H(u)|$ 尽量大^[4,7]。

5 PSF 估计

从点扩散函数的物理意义出发, 可以这样理解其形成过程: 假设被拍摄物体是一个点光源, 由于它与相机镜头之间存在相对运动, 在曝光时间内, 它的像将在 CCD 平面上形成一条轨迹, 如果能确定该运

动轨迹上每一点所探测到的能量值(即能量密度), 然后再进行归一化处理所得的结果就是 PSF^[8-10]。

根据上述理论, 考虑到 CCD 阵列是离散化的, 若不断提高光纤陀螺的采样频率, 使其采样间隔 Δt 趋向于 0, 那么在每一个 Δt 内测量得到的运动轨迹跨越两个相邻像素的概率很小, 那么对每个像素而言, 只需统计落入该像素内的采样点数 n_p 即可。最终经过归一化处理所得的 PSF 中, 该像素处的值为

$$h_p = \frac{n_p E}{NE} = \frac{n_p}{N}, \quad (6)$$

式中 N 表示所有运动轨迹的总段数, h_p 表示所得 PSF 中像素 p 对应的强度值, E 为 CCD 探测到的能量值。

在光纤陀螺采样频率足够高的情况下, 将复杂的几何计算问题转化为了一个简单的统计问题, 只需根据坐标数据确定每个采样点所落入的像素, 就可根据(6)式计算出最终的 PSF, 降低了运算复杂度。

采用 CE 的方式, 当快门打开时, PSF 与传统曝光模式获得的点扩散函数相同, 当快门关闭时, 就不再有 PSF, 由此 CE 所得到的点扩散函数为传统曝光模式获得的点扩散函数的若干片段, 即只统计在快门打开过程中每个像素落入的点数。

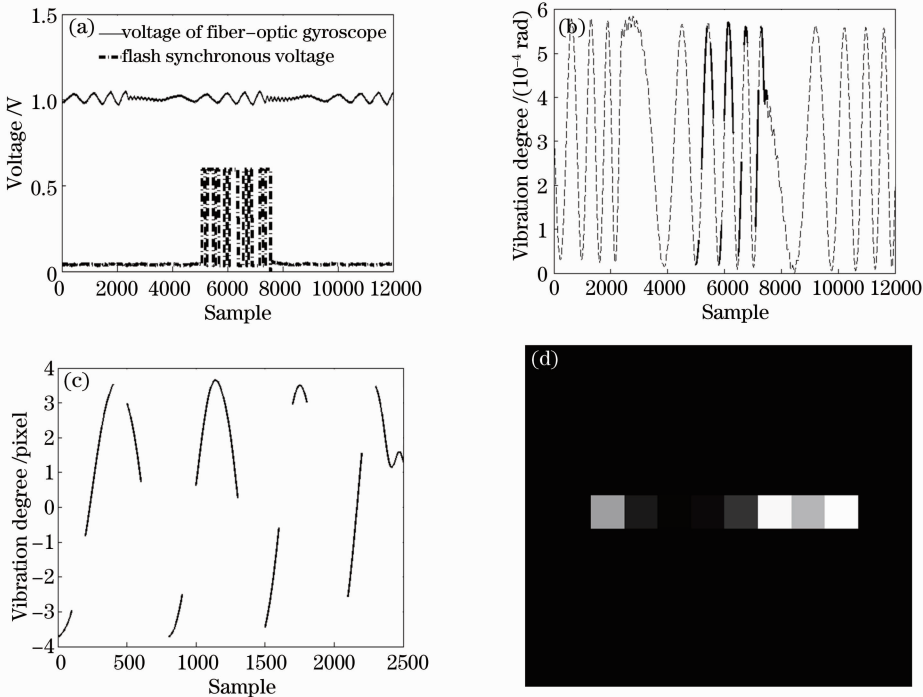


图 4 (a) 光纤陀螺输出的电压信号及相机 CE 过程; (b) 颤振角位置数据; (c) 像面上像的颤振位置数据; (d) 重构出的 PSF

Fig. 4 (a) Voltage signal outputted by fiber-optic gyroscope and CE process; (b) vibration angle data; (c) vibration on image plan; (d) reconstruct PSF

在图 4(a)中,曲线 a 表示光纤陀螺输出的电压信号;曲线 b 表示相机的 CE 过程,其中的高电平表示快门开启时间。图 4(b)中的细实线表示利用光纤陀螺探测到的角速率数据经过积分得到的角位置数据,粗实线对应 CE 过程中的颤振角位置。图 4(c)为根据物像关系计算得到的曝光时间内像面上像的颤振位置数据。图 4(d)为利用图 4(c)中的数据及上文中的方法重构出的 PSF。

上述处理方法存在一定的误差,当轨迹跨越相邻两个像素时,这种近似造成的误差会对 PSF 重构结果有轻微的影响。

为了达到更加精确的 PSF 估计,引入亚像素的概念,将每个像素进行细分,形成更小的单元,利用线性插值算法,计算每个亚像素中落入的点数,这样可使 PSF 的估计结果更加准确,但是这种精确的估计算法是以时间为代价的,在仿真结果比较中,会详细展现其优劣。

6 仿真结果比较

使用 OISSV 卫星遥感颤振成像仿真软件,设置卫星参数、相机参数、颤振参数、地理及时间参数,得到仿真的颤振图像^[11]。再使用 Matlab 对获得的数据进行处理,估计 PSF,对模糊图像进行复原。本文主要研究的是地球静止轨道卫星,其轨道高度(即物距)为 35786 km,设置颤振为绕 xy 平面内轴转动,颤振形式为正弦颤振 $2\sin(2\pi \times 100t)$ (μrad)。相机参数为:曝光时间 15 ms,焦距 20 m,像素尺寸 $15 \mu\text{m}$ 。设置采样频率为 10^5 Hz (即在曝光时间 15 ms 内采样 1500 个点)。

模拟颤振获得传统曝光模式下的颤振模糊图像,如图 5 所示。采用上述方法估计 PSF,并用其对模糊图像进行直接逆滤波^[12-13]。

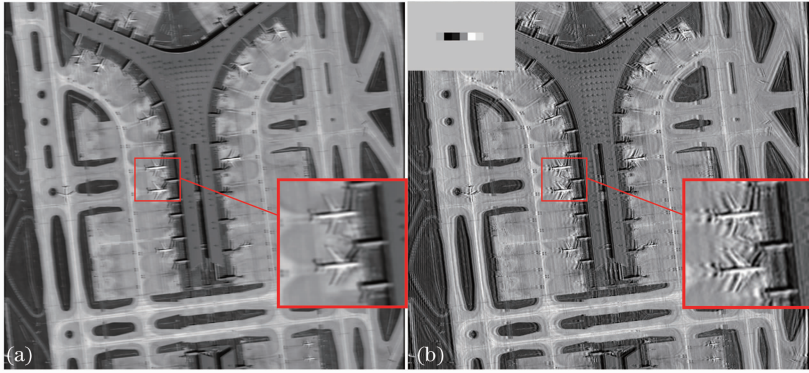


图 5 (a)传统曝光模式颤振仿真模糊图像;(b)复原图像及其点扩散函数

Fig. 5 (a) Vibration simulation blurred image of tradition exposure pattern; (b) restoration image

可以看出对于传统曝光模式下获得的颤振模糊图像进行直接逆滤波,会有很大的振铃,而如果加入噪声,直接逆滤波使得噪声被放大,图像基本被噪声所覆盖,如图 6 所示。

用一个长度为 15 的随机二进制码 110101001001011 作为 CE 的码字,控制快门的开关,同样采用上述的方法估计 PSF,直接逆滤波复原,得到结果如图 7 所示。

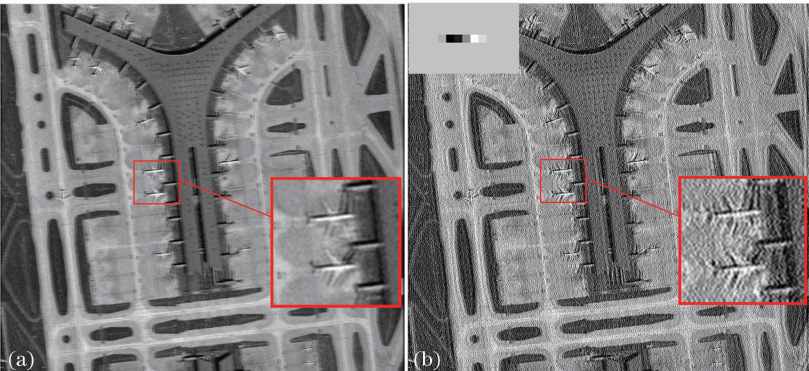


图 6 (a)加入噪声后的颤振仿真模糊图像;(b)复原图像

Fig. 6 (a) Vibration simulation blurred image with noise; (b) restoration image

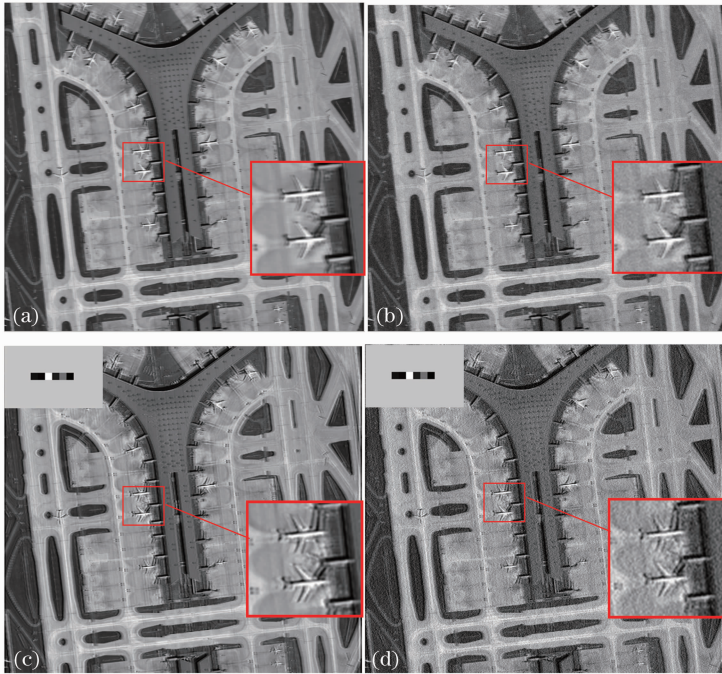


图 7 (a)利用随机二进制码进行 CE 的颤振模糊图像;(b)加入噪声后的颤振模糊图像;(c)复原图像;
(d)加入噪声后的复原图像

Fig. 7 (a) CE with random binary code; (b) vibration simulation blurred image with noise; (c) restoration image; (d) restoration image with noise

可以看出对使用 CE 的成像方式获得的颤振模糊图像进行直接逆滤波,复原图像的振铃明显减小,在加入噪声的情况下,CE 形成的图像,在复原时不会放大噪声,但依旧不能作为复原的结果。由于 CE 的码字对于 PSF 的估计十分重要,因此需要考虑对编码的码字进行优化。确定码长和编码中 1 的个

数,设置循环,对于每一种码字估计点扩散函数,并记录其傅里叶变换后幅值的最小值,寻找傅里叶变换后幅值最小值最大的码字,最终采用 100011001011101 作为 CE 的码字,获得 CE 的颤振模糊图像,对其进行直接逆滤波,得到复原结果如图 8 所示。

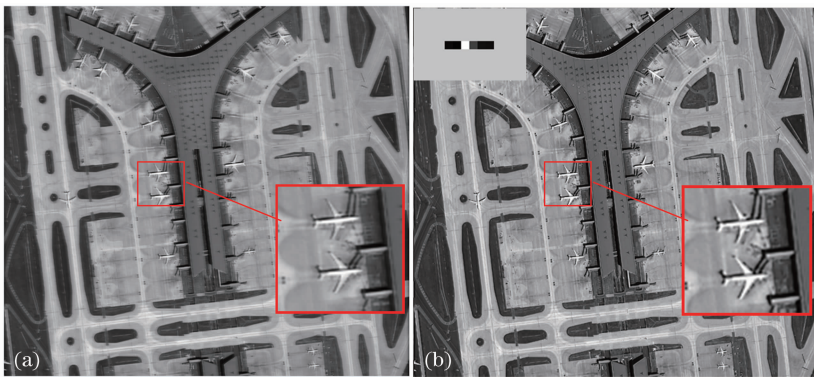


图 8 (a)使用最优二进制码进行 CE 的颤振仿真模糊图像;(b)复原图像

Fig. 8 (a) Restoration image obtained by CE with optimal binary code; (b) restoration image

由复原结果可以看出,振铃已基本消除,图像的细节也得到了较好的复原,下面将每一个像素细分为 100×100 的亚像素,统计出颤振轨迹落入每个亚像素中的点数,再合成为一个像素,采用该方法估计

出的 PSF 更加精确,可得到更清晰的恢复图像。

为了直观、量化地比较各种方式得到的复原结果,本文计算各复原结果的信噪比和结构相似度,得到结果如表 1 所示。

表 1 客观评价结果
Table 1 Quality evaluation

Vibration amplitude	Evaluate index	Tradition exposure	Random coding exposure	Optimal coding exposure	Random coding+ exactly estimate PSF	Optimal coding+ exactly estimate PSF
2 μrad	PSNR	17.7420	19.9187	21.6834	22.2125	23.3368
	SNR	2.8912	5.0678	6.8325	7.3617	8.4860
	SSIM	0.2616	0.5649	0.7356	0.8505	0.9185
3 μrad	PSNR	18.2620	19.1669	21.2077	21.5974	22.8222
	SNR	3.4112	4.3161	6.3569	6.7465	7.9713
	SSIM	0.2980	0.4314	0.6951	0.8232	0.9073
5 μrad	PSNR	16.2330	19.4595	20.6108	20.9231	22.2455
	SNR	1.3822	4.6087	5.7600	6.0722	7.3947
	SSIM	0.1462	0.5118	0.6228	0.8041	0.8945

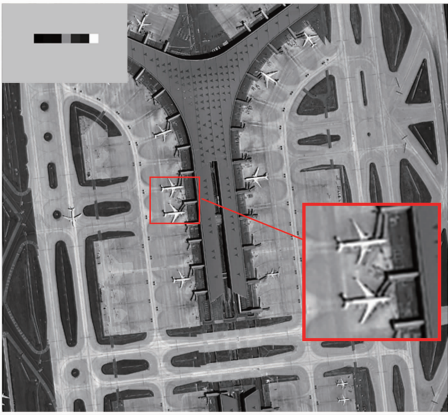


图 9 使用精确的 PSF 估计方法得到的复原图像

Fig. 9 Restoration image obtain by exact PSF estimation method

使用最优编码,并精确地估计 PSF,获得的复原结果与原图的结构相似度可以达到 0.9 以上,认为获得了清晰的复原结果。而精确的 PSF 估计要比直接使用统计法估计 PSF 花费更长的时间,以下为两种 PSF 估计方法的时间比较。

表 2 两种 PSF 估计方法的时间比较

Table 2 Compare time elapsed by the two PSF estimation methods

	Estimate PSF with statistic /s	Estimate PSF exactly /s
2 μrad	0.5357	5.1456
3 μrad	0.5371	6.3971
5 μrad	0.5521	10.1578

随着振幅的增加,精确估计 PSF 的方法所用的时间将大幅增加;而使用实际的采样频率,利用统计的方法估计 PSF,至少节省 10 倍的时间,是一种快速的 PSF 估计方法。且使用这种快速的 PSF 估计方法获得的复原图像基本还原了图像的细节,因此该方法对于快速恢复颤振模糊图像具有重要意义。

颤振模糊图像的仿真是使用 OISSV 软件实现的。OISSV 卫星遥感颤振成像仿真软件可计算出面阵凝视相机和时间延迟积分(TDI)相机在任意颤振条件下所成的退化图像。其综合考虑了卫星参数、相机参数、地理及时间参数、颤振参数,可以较为真实地仿真出颤振模糊图像。将卫星的参数(包括轨道高度,轨道与赤道夹角,星下点维度以及卫星侧摆角)输入到 OISSV 软件中,以一副地面分辨率已知的清晰图片作为成像目标,设定需要仿真的运动参数,便可得出清晰景物在这些条件下的成像结果,认为该仿真结果接近真实的颤振模糊图像。

因此论文中仿真实验过程和实际应用过程的差异主要体现在光纤陀螺的颤振探测上,在仿真实验中直接使用设定的运动轨迹作为光纤陀螺探测得到的运动轨迹,忽略了光纤陀螺探测产生的误差。光纤陀螺的测量误差主要表现为随机游走,它决定了陀螺的极限精度,常使用型号的光纤陀螺随机游走为 $0.1^\circ/\sqrt{h}$,在实际使用时会产生偏差,需对其进行修正。

7 结 论

提出了一种基于陀螺振动探测和 CE 的遥感图像快速恢复方法,通过设置二进制编码,控制相机进行 CE,同时光纤陀螺探测相机的颤振轨迹,使用统计的方法估计曝光期间的 PSF,并用估计的 PSF 对 CE 获得的模糊图像进行复原,对复原结果进行了主观和客观的评价,进一步证明该方法的可行性。随着算法的改进和计算速度的提高,该方法有可能实现颤振图像的实时复原,这将使其在空间遥感成像方面具有重要的意义和良好的应用前景。本课题组仅仿真了该方法的实现过程,下一步将着重研究

编码码字的选取和在实际中的应用。

参 考 文 献

- 1 R Raskar, A Agrawal, J Tumblin. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2006, 25(3): 795–804.
- 2 A Agrawal, X Yi. Coded exposure deblurring: optimized codes for PSF estimation and invertibility [C]. *Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009. 2066–2073.
- 3 A Agrawal, R Raskar. Optimal single image capture for motion deblurring [C]. *Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009. 2560–2567.
- 4 Xu Shukai. *Research on Motion Blur Image Deblurring Technology Based on Computational Photography* [D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2011.
徐树奎. 基于计算摄影的运动模糊图像清晰化技术研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2011.
- 5 G Shi, D Gao, X Song, *et al.*. High-resolution imaging via moving random exposure and its simulation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(1): 276–282.
- 6 Huang Kuihua, Zhang Jun, Xu Shukai, *et al.*. Searching for the optimal code of coded exposure photography in the presence of CCD noise [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(6): 72–78.
黄魁华, 张 军, 徐树奎, 等. 考虑 CCD 噪声条件下的编码曝光最优码字搜索方法[J]. *国防科学技术大学学报*, 2012, 34(6): 72–78.
- 7 M Scott, Y Ding, J Yu. Design and estimation of coded exposure point spread functions [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(10): 2071–2077.
- 8 Dong Wende. *Research on Image Restoration Based on Vibration Detection Using Fiber Optic Gyroscope* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.
董文德. 基于光纤陀螺颤振探测的图像复原技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.
- 9 Fu Zhongliang, Feng Huajun, Xu zhihai, *et al.*. Restoration of image blurred by any form motion in two-dimension [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30(2): 369–372.
付中梁, 冯华君, 徐之海, 等. 二维任意运动形式模糊图像的恢复[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 369–372.
- 10 Tao Xiaoping, Feng Huajun, Lei Hua, *et al.*. A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function [J]. *Acta Optical Sinica*, 2009, 29(3): 648–653.
陶小平, 冯华君, 雷 华, 等. 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 648–653.
- 11 Deng Qing. *Research on Image Degradation Due to Satellite Platform Vibration* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.
邓 勤. 卫星颤振对遥感成像质量影响研究及实验验证[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.
- 12 Zhao Wenqian, Rao Changhui, Geng Zexun. Myopic image deconvolution of point source based on joint estimation of object and point spread function [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, 27(1): 52–57.
赵文倩, 饶长辉, 耿则勋. 基于目标和点扩散函数联合估计的点源目标图像近视解卷积[J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 52–57.
- 13 M B Ezra, S K Nayar. Motion-Based Motion Deblurring [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(6): 689–698.

栏目编辑: 张浩佳