

文章编号 1004-924X(2009)05-1161-10

# 航空多重模糊图像的恢复

李 仕<sup>1,2</sup>, 张 葆<sup>1</sup>, 孙 辉<sup>1</sup>

(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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**提出一种针对多重模糊图像的恢复算法,以解决航空成像中多重模糊同时作用时的图像恢复问题。对多重模糊的物理模型进行分析,通过分步去模糊对多重模糊图像进行恢复。对空间不变模糊的点扩散函数进行合并,减少多重模糊恢复过程的计算误差累计,通过一次解卷积运算实现多重空间不变模糊图像的恢复。对多重模糊图像在分步恢复过程中所产生的误差噪声进行分析,使用维纳滤波对阶段误差噪声进行抑制,使得恢复图像的峰值信噪比(PSNR)值提高 7.76。实验结果表明基于点扩散函数合并的恢复方法能将多重模糊图像的 PSNR 值提高到 28.09,有效地保障了图像的恢复质量。

**关键词:**航空成像;多重模糊;空间不变模糊;空间变化模糊

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## Restoration of aerial multiple blurred images

LI Shi<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** An image restoration algorithm is proposed to restore the images simultaneously degraded by a multiple blur during aerial imaging. Based on the analysis of the physical model of the multiple blur, the multiple blur can be restored by deblurring the every sub-blur step by step. The Point Spread Functions (PSFs) of every space-invariant blur in the multiple blurred images are combined together by convolving all the linear PSFs to reduce the accumulation of calculation errors during the image restoration, so that the multiple blur made up of the space-invariant blurs can be eliminated by a deconvolution restoration. By analyzing the error noise caused by the image restoration, a Wiener filter is applied to suppress the error noise, which can increase the PSNR of the restored image by 7.76. The experiment results show that the PSNR of the image restored by the proposed algorithm based on the PSFs combination has reached 28.09, which ensures the acceptable restoration quality for aerial multiple blurred images.

**Key words:** aerial image; multiple blur; space-invariant blur; space-variant blur

收稿日期:2008-07-19;修订日期:2008-08-19.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

## 1 引言

航空飞行器做高速低空飞行(高速高比)时,载机上航空相机的成像容易产生像移模糊,且像移会随着载机飞行姿态的不同而各异。当载机仅是前向飞行时,在像面上产生的像移方向指向载机的前进方向,像移的大小与载机的速高比成正比<sup>[1]</sup>;当载机上航空相机俯仰成像时,像面上的像移方向指向载机的前进方向,像移的大小与载机的速高比、相机俯仰角、视场位置均有关系<sup>[2-5]</sup>;当载机做翻滚或盘旋飞行时,像面上的像移是空间变化的,距离旋转轴越远,像移越大,并且相同圆弧轨迹上的像移大小相等,相同弧度上的像移方向相同<sup>[6-10]</sup>。

以上三种像移虽然一种比一种来得复杂,但它们如果仅是单个存在于像面上的时候,是可以使用电子的方法或机构的方法再或者数字图像处理的方法对其进行像移消除<sup>[11]</sup>的。但如果成像的同时还存在其它影响像质的因素(比如镜头的离焦),像面上的像移将变得更加复杂。况且,载机的飞行姿态除了前向飞行、侧身飞行、翻滚、盘旋外,还有多种姿态结合的复杂姿态(如飞机偏航转向),这时运动像移的本身就已经很复杂。这种多重模糊因素同时作用的模糊,传统的电子方法<sup>[2]</sup>或机构方法<sup>[4,6-7]</sup>将很难对其进行有效消除。本文从图像处理的角度对多重模糊进行分析,并给出了多重模糊图像的恢复算法方案。

## 2 多重模糊

### 2.1 多重模糊

在串联光学系统上,通常是对各个分系统的调制传递函数(MTF)或光学传递函数(OTF)进行连乘来求取系统整体的 MTF 或 OTF 值<sup>[12]</sup>,具体表达式如式(1)所示,

$$\text{OTF}_{\text{total}} = \text{OTF}_1 \cdot \text{OTF}_2 \cdot \text{OTF}_3 \cdots, \quad (1)$$

其中  $\text{OTF}_1$ 、 $\text{OTF}_2$  等为各分系统的 OTF,它们可以是大气 OTF 值,也可以是某个光学子系统的离焦 OTF 值。若用点扩散函数(PSF)来表示总系统的成像质量,则可得到式(2)所示关系:

$$\text{Image} = \text{Object} * \text{PSF}_1 * \text{PSF}_2 * \text{PSF}_3 \cdots. \quad (2)$$

因此模糊图像  $g(x, y)$  在多个模糊因素同时作用

下的表达式如式(3)所示:

$$g(x, y) = f(x, y) * h_1(x, y) * h_2(x, y) * h_3(x, y) \cdots, \quad (3)$$

式中  $f(x, y)$  为原始清晰图像,  $h_1(x, y)$ 、 $h_2(x, y)$  表示各种模糊的点扩散函数。

图像模糊分空间变化模糊与空间不变模糊,其中空间变化模糊的点扩散函数很难在不变空间中给出线性的表达式,因此需要对式(3)进行修正。而卷积运算作为线性运算,它的运算前后项的位置允许相互调换,所以多重模糊的表达式修正如下:

$$g(x, y) = f(x, y) * h_1(x, y) * h_2(x, y) \odot h_3(x, y) \cdots, \quad (4)$$

式中  $\odot$  为空间变化模糊的运算符,该运算符右边的点扩散函数为变化空间的点扩散函数。

### 2.2 空间变化模糊

图 1 为飞机飞行姿态变化示意图,航空成像上的各种空间变化像移即由图中的俯仰、滚动、偏航等 3 种飞行姿态所造成。图 2 为飞机部分飞行姿态对应的像移示意图,图 2(a)为空间不变的前

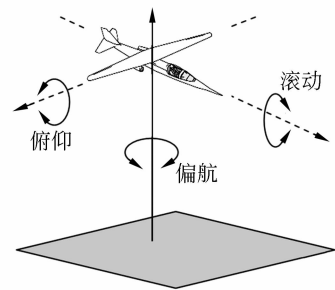
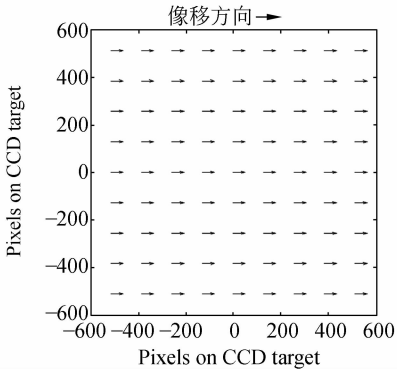


图 1 飞机姿态变化说明

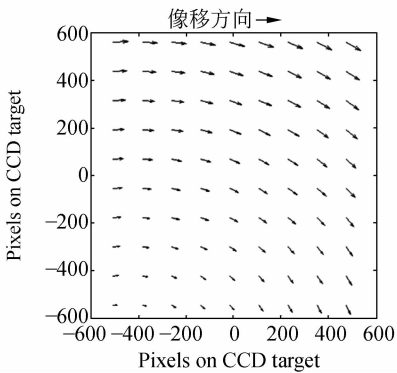
Fig. 1 Illustration of flying attitudes

向像移<sup>[1]</sup>,图 2(b)为空间变化的旋转像移<sup>[13]</sup>,图 2(c)为更为复杂的偏航像移。单独的旋转模糊,可以通过文献[13]的建模方法进行求解。当旋转模糊结合一定的前向模糊,这时很难再获取精准的像移轨迹来进行数学建模。偏航飞行可以理解为前向飞行与旋转飞行的合成,所以偏航像移可以分解为前向像移(图 2(a))跟旋转中心在画面外的旋转像移(图 2(b))。因此消除由前向像移及旋转像移双重作用而成的偏航像移模糊的较好方法是根据式(5)对各种分量像移进行分步骤地逐一消除。式(5)为偏航像移的模糊表达式。

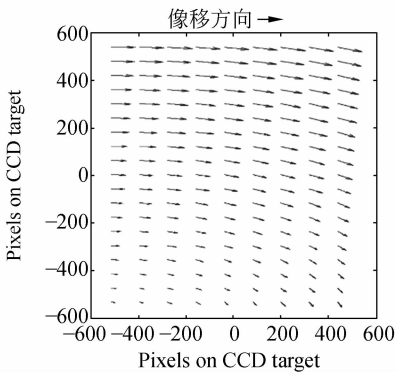
$$g(x, y) = f(x, y) * h_{\text{motion-blurred}}(x, y) \odot h_{\text{rotational-blurred}}(x, y). \quad (5)$$



(a)水平前向像移  
(a)Horizontal forward image motion



(b)旋转像移  
(b)Rotation image motion



(c)偏航像移  
(c)Yaw image motion

图 2 各种姿态像移

Fig. 2 Image motion of flying attitudes

### 2.3 空间不变模糊及 PSF 函数合并

经典的空间不变模糊的线性表达式如式(6)所示,式中  $h(x, y)$  为线性系统的 PSF 函数,  $n(x, y)$  为系统噪声。 $h(x, y)$  的表达形式不同,式(6)

则表征不同的空间不变模糊。当系统中存在多个空间不变模糊同时作用时,由于空间不变模糊的 PSF 函数能在相同坐标系上用线性函数进行表示,所以多重空间不变模糊的表达式如式(3)所示。

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (6)$$

式(3)中点扩散函数间的卷积运算是线性运算,可以根据卷积运算的性质对式(3)中的各空间不变的 PSF 函数进行合并,得到系统的空间不变部分的 PSF 函数:

$$h_{invariant}(x, y) = h_1(x, y) * h_2(x, y) * h_3(x, y) \dots \quad (7)$$

例如:已知一幅图像在成像的时候同时存在前向运动像移和镜头的离焦模糊,则该模糊图像的 PSF 函数如下所示:

$$h_{invariant}(x, y) = h_{motion-blurred}(x, y) * h_{defocus}(x, y) \quad (8)$$

## 3 多重模糊的恢复

### 3.1 多重空间不变模糊的恢复

当只存在空间不变模糊的时候,由式(3)可知在已知各种模糊的 PSF 函数的情况下,只需对模糊图像  $g(x, y)$  逐个进行解卷积运算即可求得原始图像  $f(x, y)$ 。但每次的解卷积运算必将引入由计算所产生的噪声,而该噪声必将影响后面的解卷积运算的效果(详细情况参见实验部分),所以针对多重空间不变模糊的图像,本文提出的改进方法是:先求得式(7)所示的系统 PSF 函数  $h_{invariant}(x, y)$ ,再根据式(9)对模糊图像进行求解运算。

$$g(x, y) = f(x, y) * h_{invariant}(x, y) \quad (9)$$

对空间不变模糊图像的 PSF 函数进行合并除了能减少计算噪声外,还能提高模糊图像的恢复速度。根据式(9)只需进行一次一般的解卷积运算<sup>[14]</sup>即可对多重空间不变模糊图像进行恢复。

### 3.2 含空间变化模糊的多重模糊恢复

空间变化模糊的 PSF 函数跟其它 PSF 函数不是处于相同坐标系下,或自身不是线性函数,所以无法通过卷积运算来进行空间变化模糊的 PSF 函数的合并。当多重模糊中包含空间变化模糊,

这时需将多重模糊中的各种模糊 PSF 函数进行确定<sup>[15]</sup>,并区分为空间不变模糊部分(如:匀速运动模糊、离焦模糊等)和空间变化模糊部分(如:旋转模糊、斜视模糊等),按式(7)对各空间不变模糊 PSF 函数进行合并获得系统的空间不变模糊 PSF( $h_{invariant}(x,y)$ ),得到式(10)所示的图像多重模糊表达式:

$$g(x,y)=f(x,y)*h_{invariant}(x,y)\odot h_{v1}(x,y)\odot h_{v2}(x,y)\cdots \quad (10)$$

式中  $h_{v1}(x,y)$ 、 $h_{v2}(x,y)$ ...为模糊图像上的各个空间变化模糊的 PSF 函数。根据(10)式求解多重模糊图像,能最大程度地减少计算噪声,保证图像恢复质量。多重模糊恢复算法的示意图如图 3 所示。

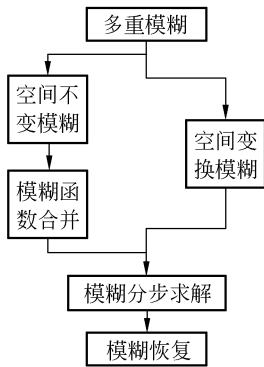


图 3 多重模糊恢复示意图

Fig. 3 Illustration of restoration of multiple blurr

## 4 实验与分析

### 4.1 空间不变模糊的图像恢复

实验首先对用合并的系统空间不变点扩散函数进行多重模糊图像恢复的可行性进行验证。图

4 为一组空间不变模糊的恢复分析图像,表 1 中使用均方差(Mean Square Error, MSE)和峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio, PSNR)两参数对图 4 中各图像进行了对应评测。该实验部分所用的图像恢复算法均为文献[1]中的维纳滤波算法,维纳滤波时所设置的具体 SNR 值参见各图像的标注。图 4(a)为  $512 \times 512$  的 Lena 图像,图 4(b)、4(c)分别为其在水平运动模糊及离焦模糊作用下的模糊图像,图 4(e)、4(f)分别为图 4(b)、4(c)所对应的恢复图像,图 4(d)为水平运动模糊及离焦模糊同时作用下的多重模糊图像,图 4(g)、4(h)、4(i)为对图 4(d)使用不同方法所得到的恢复图像。表 1 中的评测数据显示:图 4(b)、4(c)、4(d)分别有不同程度的图像退化,其中又以图 4(d)双重模糊的降质较为严重;图 4(e)、4(f)所对应使用的算法具有良好的恢复效果,而图 4(g)、4(h)、4(i)所对应使用的算法出现了不同的图像恢复效果。

图 4(g)中所用的方法是合并空间不变的 PSF 函数(如式(8)所示),然后根据式(9)用维纳滤波对图 4(d)进行求解所得,图像画面干净、细节恢复良好。图 4(h)则是使用图 4(e)、4(f)上所用的恢复算法对图 4(d)进行分步解卷积所得结果,画面噪声干扰严重,图像恢复效果不够理想。通过分析发现:在对图像进行一次维纳滤波的时候,会产生一定的计算精度误差,该误差会以噪声的形态存在并对原图像信息进行破坏。图 4(g)、4(h)中维纳滤波所设定的 SNR 值均为 1 000,图 4(g)所用方法只需一次维纳滤波,所以它不受噪声的困扰,而 4(h)的第二次维纳滤波的 SNR 值设置过高,所以它前次误差的噪声被放大。这里将分步解卷积方法中第二次维纳滤波的 SNR 值设为 100,得到图 4(i),发现图像的误差噪声得到有效抑制,但图像的高频信息也被一同过滤,画面变得平滑。

表 1 图像评价

Tab. 1 Image evaluation

图像	图 4(b)	图 4(e)	图 4(c)	图 4(f)	图 4(d)	图 4(g)	图 4(h)	图 4(i)
MSE	671.45	25.50	505.95	38.70	1161.54	101.04	680.84	113.99
PSNR	19.86	34.06	21.09	32.25	17.48	28.09	19.80	27.56

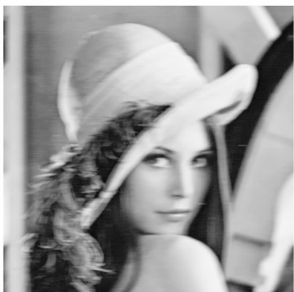
实验证明,本文式(7)所示的系统点扩散函数合并的方法能很好地避免由分步解卷积所带来的

精度误差及其所产生的误差噪声,表 1 的评测数据也显示该方法要比用分步恢复的方法来得有

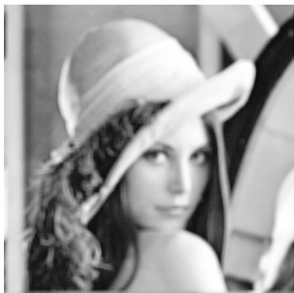
效。通过对图像质量的主观评价发现图 4(g) 的画面要比图 4(i) 来得明亮,表明图 4(g) 的能量损失较少。



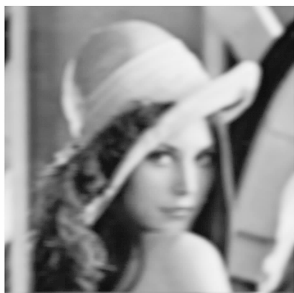
(a)原始图像  
(a)Original image



(b)水平运动模糊(15 pixel)  
(b)Horizontal motion blur



(c)离焦模糊(半径 10 pixel)  
(c)Defocusing blur



(d)多重模糊  
(d)Multiple blur



(e) (b)图的恢复图像(SNR=1 000)  
(e)Restored image of (b) (SNR=1 000)



(f) (c)图的恢复图像(SNR=1 000)  
(f)Restored image of (c) (SNR=1 000)



(g) 用 PSF 合并的办法恢复(d)图  
(g)Restored image of (d) with PSF



(h) 分步恢复(d)图 (SNR=1 000)  
(h)Restored image of (d) step by step(SNR=1 000)



(i)分步恢复(d)图 (SNR=100)

(i)Restored image of (d) step by step (SNR=100)

图 4 空间不变模糊分析

Fig. 4 Images with space-invariant blur

### 4.2 三重模糊的图像恢复

飞机偏航飞行的时候所产生的如图 2(c)所示的复杂像移在航空成像过程中经常会出现,本部分实验内容将对这种同时具有旋转运动模糊和匀速直线运动模糊,甚至还有离焦模糊的多重模糊图像进行研究分析。实验中的空间不变模糊的消除算法是基于文献[1]的维纳滤波算法,空间变化模糊的消除算法是基于文献[11]中的旋转模糊恢复算法,如无特别说明图像恢复算法所设定的 SNR 值均为 1 000。实验所得评测数据参见表 2。



(a) 原图

(a)Original image



(b) 旋转模糊

(b)Rotational blur



(c) 匀速运动模糊

(c)Uniform motion blur



(d) 离焦模糊

(d)Desfocusing blur



(e)三重模糊

(e)Triple blur



(f) (b)图的恢复图像

(f)Restored image of (b)



(g) (c)图的恢复图像  
(g)Restored image of (c)



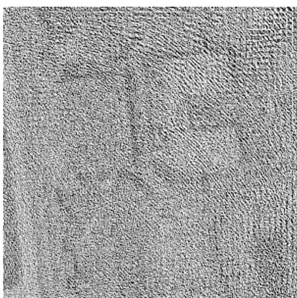
(k)对(e)图去空间不变模糊  
(k)Removing space invariant blur of (e)



(h) (d)图的恢复图像  
(h)Restored image of (d)



(l)对(e)图分 2 步恢复(SNR=1 000)  
(l)Restored image of (e) with two steps  
(SNR=1 000)



(i) 对(e)图分 3 步恢复  
(i)Restored image of (e) with three steps



(m)对(e)图分 2 步恢复(SNR=100)  
(m)Restored image of (e) with two steps (SNR=100)



(j) 对(e)图去旋转模糊  
(j)Remove rotational blur of (e)

图 5 偏航像移仿真分析图

Fig. 5 Analysis of simulation of yawed image-motion

图 5 为一组同时包含旋转运动模糊、匀速直线运动模糊和离焦模糊的实验室仿真图像,其中图 5 (a)为  $512 \times 512$  某机场图像,图 5(b)、5(c)、5(d)分别为图 5(a)在旋转像移、前向像移、镜头离焦作用下的模糊图像,图 5(f)、5(g)、5(h)分别为图 5(b)、5(c)、5(d)所对应的恢复图像,图 5(f)、5

(g)、5(h)的恢复效果及表 2 数据表明它们所对应使用的算法具有良好的恢复效果。图 5(e)为图 5(a)在旋转像移、前向像移、镜头离焦共同作用下的三重模糊图像。图 5(i)是使用图 5(f)、(g)、(h)上所对应的恢复算法对图 5(e)进行逐步解卷积所得的结果图像,该图中原图像信息几乎被噪声淹没,仅少数低频信息得到恢复,该结果说明分步解卷积过程所产生的误差噪声如果不进行有效控制将会成指数增长。

为有效控制解卷积过程中所产生的误差噪声,本试验将可以合并的空间不变的点扩散函数(匀速运动模糊点扩散函数与离焦模糊点扩散函数)进行合并得到合并点扩散函数  $h_{invariant}(x, y)$ 。如图 5(e)所示的三重模糊被转化为一个空间变

化模糊与一个空间不变模糊构成的二重模糊,按照公式(10)对它进行分步恢复。图 5(j)、(k)分别为对图 5(e)进行去旋转模糊和去空间不变模糊所得的图像,对图 5(j)、(k)再分别去另一种模糊得到图 5(l),这表明多重模糊的消除不受模糊消除的先后顺序的影响。图 5(l)上存在与图 4(h)相类似的噪声,采用实验 4.1 中的方法,在第二次恢复滤波的时候将图像的 SNR 参数设置为 100,最终得到图 5(m),画面的噪声得到有效的控制。表 3 数据显示分步解卷积去模糊的每个过程均对图像的质量起到改善的作用。同时表 1、表 2 数据表明实验中通过对维纳滤波器进行设定<sup>[1]</sup>来抑制图像误差噪声的方法取得了一定成效。

表 2 图像评价

Tab. 2 Image evaluation

图像	图 5(b)	图 5(f)	图 5(c)	图 5(g)	图 5(d)	图 5(h)
MSE	1 681.59	169.08	1 330.37	58.30	1 445.09	106.79
PSNR	15.87	25.85	16.89	30.47	16.53	27.85
图像	图 5(e)	图 5(i)	图 5(j)	图 5(k)	图 5(l)	图 5(m)
MSE	2 091.33	14 237.0	2 055.78	1 677.17	1 031.56	710.78
PSNR	14.92	6.60	15.00	15.89	18.00	19.62

## 5 结 论

本文对在航空成像中遇到的多重模糊情况进行分析,并分别针对有、无空间变化模糊的不同情形给出多重模糊图像的恢复方法。通过对空间不变模糊的 PSF 函数的合并有效减少多重模糊图像恢复所需的运算次数,最大程度地降低图像恢复过程中所产生误差噪声,提高多重模糊图像的恢复质量。实验结果表明:通过合并 PSF 函数再进行图像恢复的方法能获得 PSNR 值达到 28.09 的恢复图像,验证了该方法的有效性。实验结果同时说明:不管是使用分步恢复的方法还是

用合并 PSF 函数后再一次恢复的方法,对图像噪声进行抑制都是有必要的。

空间变化模糊的 PSF 函数可能不是处于一般的直角坐标系下(如旋转模糊),或自身不是线性函数,所以对空间变化模糊的恢复都要涉及一些坐标或数据的转换,而这个过程必然会额外地损失一些恢复精度,进而影响多重模糊图像的恢复效果,实验数据也同样验证了这个结果。若要进一步提高含有空间变化模糊的多重模糊的恢复精度,一方面是要提高空间变化模糊图像的恢复精度,另一方面可能需要考虑使用超分辨率图像重建技术<sup>[16]</sup>来对分步恢复所得的图像进行超分辨率重建。

## 参考文献:

- [1] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. 光学精密工程,2006,14(4):697-703.  
JIA P, SUN H, ZHANG B. Restoration of motion-blurred aerial image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):697-703. (in Chinese)
- [2] LAREAU A G. Advancements in E-O framing [J]. *SPIE*, 1998,3431:96-107.
- [3] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程,2006,14(3):490-494.  
ZHAI L P, LIU M, XIE J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):490-494. (in Chinese)
- [4] 许永森,丁亚林,田海英,等. 斜视状态下航空遥感器像移的计算与补偿[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1779-1783.  
XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1779-1783. (in Chinese)
- [5] 李仕,孙辉,张葆. 航空斜视成像异速像移的实时恢复[J]. 光学精密工程,2009,17(4):895-900.  
LI SH, SUN H, ZHANG B. Real-time restoration algorithm for aerial side-oblique images with different rates of image motion rates[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):895-900. (in Chinese)
- [6] 张树青,丁亚林,李友一,等. 基于像面旋转的画幅遥感相机姿态像移计算[J]. 光学精密工程,2007,15(9):1432-1438.  
ZHANG SH Q, DING Y L, LI Y Y, *et al.*. Image motion vector computation based on a long range oblique photography frame camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1432-1438. (in Chinese)
- [7] 张树青,丁亚林,于春风. 凝视模式下的画图相机两轴像移补偿[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1789-1795.  
ZHANG S Q, DING Y L, YU CH F. Attitude compensation of frame aerial camera based on spot mode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1789-1795. (in Chinese)
- [8] 孙丽娜,汪永阳,戴明,等. 航空光电成像消旋电视数字控制器[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1300-1304.  
SUN L N, WANG Y Y, DAI M, *et al.*. Digital controller for aerial camera with despun control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1300-1304. (in Chinese)
- [9] RIBARIC S, MILANI M, KALAFATIC Z. Restoration of images blurred by circular motion [C]. *IWISPA 2000. Proceedings of the First International Workshop on*, 2000:53-60.
- [10] HONG H Y, ZHANG T X. Fast restoration approach for rotational motion blurred image based on deconvolution along the blurring paths [J]. *Opt. Eng.*, 2003,42(12):3471-3486.
- [11] 刘微. 运动模糊图像恢复算法的研究与实现[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.  
LIU W. *The research on restoration algorithm of motion blur image and its realization* [D]. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [12] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春:长春出版社,1989.  
HAN CH Y. *Fundamental Theory and Application of Information optics* [M]. Changchun: Changchun Press, 1989. (in Chinese)
- [13] 李仕,孙辉,张葆. 旋转运动模糊的实时恢复[J]. 光学精密工程,2009,17(3):648-654.  
LI SH, SUN H, ZHANG B. Real-time restoration algorithm of images blurred by rotational motion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(3):648-654. (in Chinese)
- [14] BANHAM M R, KATSAGGELIS A K. Digital image restoration [C]. *IEEE Signal Proc. Mag.*, 1997:24-41.
- [15] TAN K CH, LIM H, TAN B T G. Restoration of real-world motion-blurred images [J]. *CVGIP*, 1991,53:291-299.
- [16] 徐青,张艳,耿则勋,等. 遥感影像融合与分辨率增强技术[M]. 北京: 辞学出版社, 2007.  
XU Q, ZHANG Y, GENG Z X, *et al.*. *Remote Sensing Image Fusion & Resolution Improvement* [M]. Beijing: Science Press. 1989. (in Chinese)

## 作者简介:



李 仕(1984—),男,浙江苍南人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究航空成像的补偿算法。E-mail: brightlishi@gmail.com



孙 辉(1963—),男,吉林柳河人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,主要研究方向为数字图像处理与分析 and 计算机仿真技术, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn



张 葆(1966—),男,吉林盘石人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,工学博士,博士生导师,主要从事航空光电成像技术的研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com

## ● 下期预告

## 闭环加速度计 CMOS 接口电路

尹 亮<sup>1</sup>,陈伟平<sup>1,2</sup>,刘晓为<sup>1,2</sup>,周治平<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 微电子技术与科学系,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 微系统与微结构制造教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

采用高压 18 V CMOS 集成电路工艺,设计出一种开关电容闭环加速度计接口电路芯片。芯片电路中包括开关电容型电荷敏感放大器,PID 控制电路以及相关双采样电路。采用相关双采样技术,并用大面积 PMOS 晶体管作为前级放大器输入级,消除放大器的  $1/f$  噪声、失调电压及  $KT/C$  噪声。采用高环路增益及静电力平衡技术消除后级电路的  $1/f$  噪声、电荷注入和时钟馈通。在采用相同电极的条件下,利用电荷检测与静电力反馈时域分离的方法,有效地消除了驱动馈通的影响。芯片采用 18 V 电源电压供电,闭环加速度计刻度因子为  $420 \text{ mV/g}$ ,噪声密度为  $10 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。芯片采用  $2 \mu\text{m}$  双金属、双多晶、 $n$  阱 CMOS 工艺,芯片面积为  $15.2 \text{ mm}^2$ 。