

散焦图像边缘振铃抑制算法

梁英¹ 于洵¹ 陶禹² 龚昌妹¹ 姜旭³

(1.西安工业大学 光电工程学院 西安 710021; 2.中国人民解放军 32180 部队 北京 100000;

3.西安应用光学研究所 西安 710065)

摘要: 针对编码孔径成像在图像复原过程中产生的振铃效应,提出了一种改进梯度平滑边界算法。首先对模糊图像进行均值滤波,计算出梯度平滑图像;然后对该图像进行反射插值延拓,延拓的图像经最优窗处理得到预处理图像;最后经改进维纳滤波算法恢复出原图像。实验表明,改进算法能有效抑制振铃同时保留图像细节信息,与梯度平滑边界算法相比复原图像的结构相似度提高了27%,图像质量指数提高了19%。

关键词: 振铃效应;梯度平滑;维纳滤波

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Algorithm on border ringing reduction of defocus image

Liang Ying¹ Yu Xun¹ Tao Yu² Gong Changmei¹ Jiang Xu³

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Unit 32180 of PLA, Beijing 10000, China; 3. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: This paper proposed an improved gradient smoothing boundary algorithm for the ringing effect generated by coded aperture imaging in image restoration. As the first step, the blurred image is filtered by means, and the gradient smoothing image is calculated. Then the image is extended by reflection interpolation, and the preprocessed image is obtained by the optimal window processing. Finally, the original image is restored by the improved Wiener filter algorithm. Experimental results suggest that the improved algorithm can effectively suppress the ringing and retain the details of the image. Compared with the gradient smoothing boundary algorithm, the structural similarity of image restoration is improved by 27% and the image quality index is increased by 19%.

Keywords: ringing effect; gradient smoothing; Wiener filtering

0 引言

随着军事武器的不断发展,以及在军事战场上为满足高分辨率成像、远距离探测与预警的要求,编码孔径成像技术被应用到提升成像质量的成像系统中。编码孔径成像技术是通过改变光学系统中孔径形状的改变来改变光瞳函数,使得整个系统的点扩散函数得到调制,实现点光源的理想聚焦,对光波经过编码孔径后在接收平面上得到的重叠、退化模糊图像能够进行精确的去模糊操作,提高成像分辨率。图像模糊退化的两类常见模式分别为散焦模糊和运动模糊。散焦模糊产生的主要原因是光学系统在成像时对焦不准;运动模糊主要是因为被拍摄的图像和成像系统之间存在相对运动。为了获得藏匿在模糊图像中的有效信息,需要利用退化图像中的先验知识扩散函数、噪声类型以及成像系统等来进行复原。

图像复原可看成是图像退化的逆过程,对编码孔径成像系统中的模糊图像进行复原时只需要知道该系统的退化模型,对该模型进行求逆运算就可恢复原图像。常用的图像复原算法有 RL(Richardson-Lucy)算法^[1]、基于高斯先验的反卷积算法^[2]、维纳滤波算法^[3]以及最大似然期望最大化算法^[4](maximum likelihood expectation maximization, MLEM)。前两种算法虽然可以去除模糊但会出现光晕失真,维纳滤波算法简单高效、通用性强且滤波效果好,但在复原中容易产生振铃现象,MLEM 算法会随着迭代次数的增加放大噪声对复原图像的影响。对于噪声的影响需要提前进行滤波处理,为防止边界失真,可以对模糊图像进行延扩,在复原过程中由于模糊核的估计误差以及模糊图像边界处的截断效应会使复原图像产生二次退化,即振铃效应。

Tekalp 等^[5]从数学角度对振铃效应作了分析,根据振

铃效应产生的因素可分为点扩散函数估计误差振铃、图像噪声滤波振铃、图像边界截断振铃等。循环边界法^[6]是通过反射对称的方式将观测图像进行延拓使其成为一个边界结合处平滑且可微的新观测图像,减弱振铃效应。黄捷等^[7]提出了移位反射边界条件的去振铃算法来改善边界处的连续性。Serra-Capizzano 等^[8]提出了抗反射边界条件法,不仅可以保持图像边界的连续性还可以保持其边界一阶导数的连续性,从而抑制边界振铃。王辉登^[9]提出的梯度平滑边界算法,不仅能有效抑制振铃而且对模糊核的类型无限制,但上述算法的运算量较大。王靖等^[10]提出了改进的最优窗法,不仅能减弱振铃而且能够复原出图像的边缘细节信息,但是其对噪声的抑制较弱。

本文采用均值滤波来减小噪声,对模糊图像的延拓范围进行限制以减小计算量。首先分析了图像退化模型以及振铃现象产生的原因;然后研究设计了改进的维纳滤波算法和梯度平滑边界算法;最后介绍了图像复原算法的评价标准。实验结果表明,改进后的算法可以得到图像的边缘细节信息、提高复原效率,有效抑制振铃并保留图像的完整性。

1 编码孔径成像技术

编码孔径成像技术^[11]是在单针孔成像的基础上发展起来的多针孔成像技术。其基本原理是在成像系统光路的人瞳处插入一个由多个通光孔元构成的特定形状的编码板,编码板中孔元的排列方式需要按照一定的规律进行排放,而且各个孔径的通光率不同,编码掩模板提高了测量值的亮度和系统信噪比。编码孔径成像过程可以分为编码和解码两部分。编码过程可以描述为原始图像遵循光学成像原理照射到编码板上,透过编码板的光线在探测器上形成重叠的模糊图像,解码过程为模糊图像通过滤波以及图像复原算法最终重建出原图。编码孔径成像流程如图1所示。

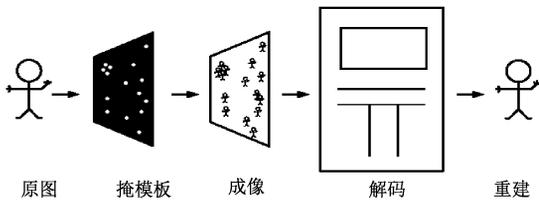


图1 编码孔径成像原理

2 图像退化模型及改进维纳滤波算法

图像的退化模型如图2所示,可表示为:

$$g(x,y) = g_0(x,y) * h_k(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

式中: g 表示观察到的模糊图像; g_0 表示原始清晰图像; h_k 表示由编码模板和透镜组共同决定得到的点扩散函数(PSF); n 表示加性的高斯白噪声; “ $*$ ”表示线性卷积运算。

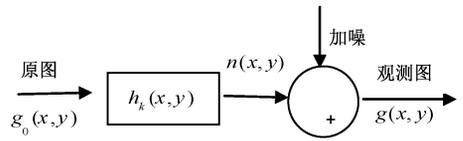


图2 图像退化模型

对式(1)两边进行傅里叶变换,可以得到成像系统模型的频率域特性,如式(2)所示。

$$G(\mu,\nu) = G_0(\mu,\nu)H_k(\mu,\nu) + N(\mu,\nu) \quad (2)$$

改进的维纳滤波算法是将传统维纳滤波算法中由最优常数 k 近似代替 $S_n(\mu,\nu)/S_0(\mu,\nu)$ 得到的滤波结果作为第2次维纳滤波的原始图像估计值,从而估算出原始图像的功率谱密度,经维纳滤波后就可以恢复出原图像。维纳滤波器的频域表示为:

$$H_{MW}(\mu,\nu) = \frac{H^*(\mu,\nu)}{|H(\mu,\nu)|^2 + \sigma_n^2 / \hat{s}_0(\mu,\nu)} \quad (3)$$

式中: $\hat{s}_0(\mu,\nu)$ 表示估计的原始图像的功率谱密度; σ_n^2 表示噪声的功率谱密度; $H^*(\mu,\nu)$ 表示编码孔径成像系统传递函数的复共轭。

3 梯度平滑边界算法

振铃效应^[12]指图像中高对比边缘的抖动现象,一般出现在对比度高的边界区域,主要是由于高频分量的粗量化而产生的。该现象的发生是图像处理中的一种常见现象,在图像复原结果图的边缘区域会出现明暗相间的周期重复条纹,并且振铃条纹由边缘向中心移动,振铃强度依次减弱。

模糊核及噪声的估计误差会影响图像复原质量,它们也是产生振铃现象的原因。由于模糊图像的边缘信息无法被充分利用,导致复原时边界存在截断误差同时出现振铃。用维纳滤波算法对图像进行复原时需要对被观测图像进行快速傅里叶变换(FFT),但先要对其进行周期延拓使成为周期序列^[13],由于边缘被截断信息的缺失导致边界处梯度发生跳变,使周期延拓序列在边界区域不可微分,产生了周期性边缘误差,模糊图像复原后出现振铃条纹。

梯度平滑边界算法为了减小图像复原时由于高对比强边缘而产生的边界振铃现象,需要对观测图像进行平滑处理使其不再具有明显的强边界。首先需要对其进行平滑,应用的平滑方法为高斯滤波,可以较好的去除高斯噪声。再对平滑后得到的图像进行梯度最小化,当图像的 N 阶梯度之和最小时,就可以实现图像的边缘平滑。经过多次尝试发现 $N=2$ 时就可以满足对图像边界的平滑。通过帕斯瓦尔定理^[14]可以知道空域中函数的平方和与其傅里叶变换到频域的平方和相等,遵守能量守恒。图像梯度最小化过程可以在频域表示为:

$$F^*(P) \left\{ \sum_{\gamma^*} \| F(\mathcal{G}^*) \circ F(P) \|^2 + \lambda (\| F(P) - F(S) \|^2) \right\} \quad (4)$$

式中: S 表示均值滤波后的图像; P 表示要得到的图像; λ 表示约束项参数; ∂^* 表示不同阶数梯度算子; $\|\cdot\|_2^2$ 表示二阶范数的平方; $F(\cdot)$ 表示进行傅里叶变换。

对上式进行求导使其结果等于零就可以得到最小化的 $F^*(P), F^*(P)$ 可以表示为:

$$F^*(P) = \frac{\lambda F(S)}{\sum_{\partial^*} F(\partial^*) \cdot \overline{F(\partial^*)} + \lambda} \quad (5)$$

其中, $\overline{F(\partial^*)}$ 表示 $F(\partial^*)$ 的共轭。对式(5)计算得到的结果值进行逆傅里叶变换可得梯度平滑图像 P 。

梯度平滑图像进行复原时用到了维纳滤波算法,复原过程中需要对图像进行快速傅里叶变换,因此图像边界应为周期序列。将图像 P 用其反射以及镜像图像进行填充,填充方式如图 3 所示,然后取其填充图像的一部分作为待复原图像,该图像满足周期循环连续性且扩展外边界图像平滑。

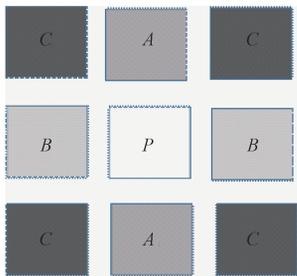


图 3 图像边界延扩

图 3 中的 A, B, C 可以计算如下:

$$A(M-i+1, :) = P(i, :) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$B(:, N-j+1) = P(:, j) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$C(:, N-j+1) = A(:, j) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中: $P(i, :)$ 表示图像 P 的第 i 行; $P(:, j)$ 表示图像 P 的第 j 列; $P(i, j)$ 表示图像 P 像素点为 (i, j) 的值。经过裁剪以后得到的图像用维纳滤波算法复原,虽然振铃现象有所抑制但仍然存在。

4 改进梯度平滑边界算法

改进梯度平滑边界算法将梯度平滑边界算法得到的图像进行剪切,改进算法剪切图像的大小比原始图像扩大了两行两列,而原算法的剪切范围为原图像的 4 倍,改进算法需要将剪切后的图像经最优窗函数^[15]进行处理,最后经改进维纳滤波算法复原。改进算法对裁剪后的图像用最优窗函数进行优化时,首先需要设置最优窗函数,最优窗函数与预处理图像的大小和复原时的点扩散函数有关,窗函数的大小与预处理图像应该保持一致,其边界像素值依赖于点扩散函数的像素值,窗函数的中间区域像素值一般被设置为 1,窗函数与预处理图像点乘以后,图像边界趋于零。改进梯度平滑边界算法在原算法的基础上结合最优窗函数的优

点,可以恢复图像细节信息,消除边缘截断效应同时有效抑制振铃效应,得到的效果如图 4 所示。

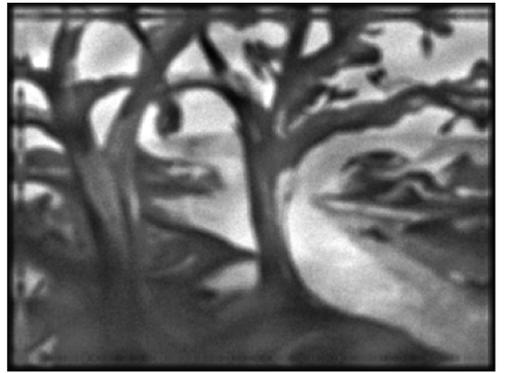


图 4 窗函数处理

5 实验结果及分析

实验中使用的模糊核是通过 MATLAB 仿真得到的,将已选取的编码模板作为先验信息,然后选用合适的高斯核与其进行卷积,卷积后的结果通过下采样处理得到 14×14 大小的点扩散函数估计值,再通过双三次插值算法得到不同尺寸的点扩散函数估计值,其估计结果如图 5 所示。

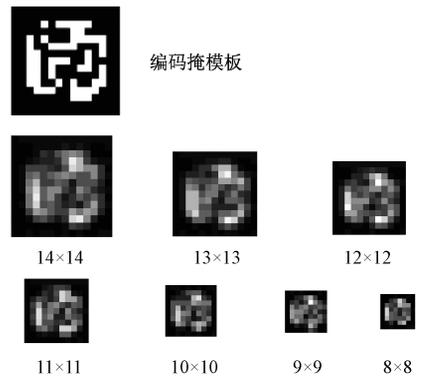


图 5 点扩散函数仿真结果

对模糊图像选用不同尺寸的模糊核以及复原算法进行复原处理,比较复原效果。首先选取一幅人物图像对该图像添加均值为 0,方差为 2 的高斯白噪声并选用 10×10 的模糊核进行修复,如图 6 所示。

选取一幅菊花图像对该图像添加方差为 8 的高斯噪声并选用 14×14 的模糊核进行复原,其结果如图 7 所示。

选取一幅 trees 图像用 8×8 的模糊核对其添加方差为 16 的高斯噪声进行复原,如图 8 所示。

从上述实验结果可以看出,通过添加不同的高斯白噪声以及选用不同的模糊核进行复原,其复原结果会有所不同,但总得来看改进算法相对于维纳滤波算法可以有效抑制图像中的振铃现象,甚至有的复原图中的振铃已经被完



图 6 算法比较(人像)

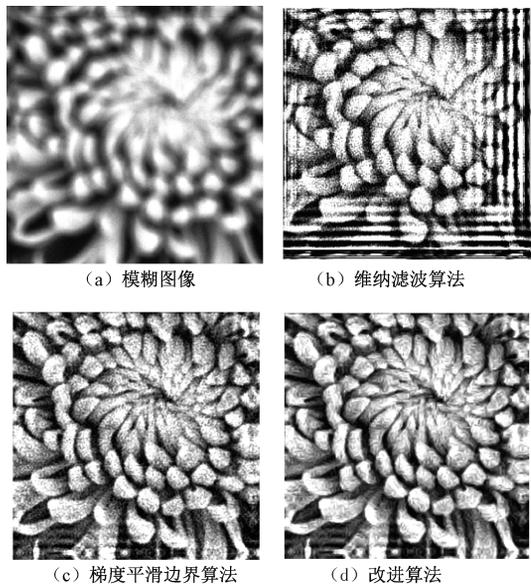


图 7 算法比较(菊花)

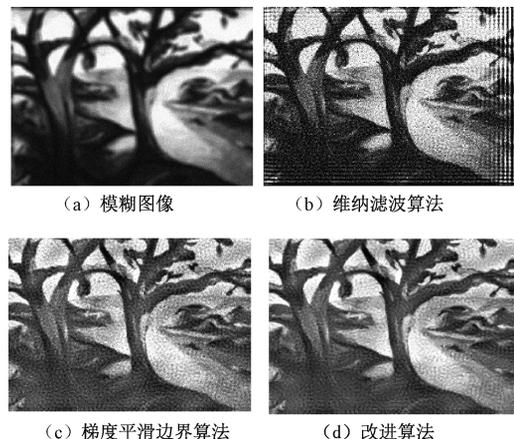


图 8 算法比较(trees)

全消除,与梯度平滑边界算法相比较,改进算法对噪声的抑制能力更强,图像复原结果明显优于其他两种算法。

对实验复原结果进行分析,利用图像质量客观评价方法:均方误差(mean-square error, MSE)、结构相似度(structural similarity, SSIM)以及图像质量指数^[16]Q 等来说明图像复原的质量。

1)MSE 通过计算原始图像与复原图像像素差值的均方值,比较其大小,如果 MSE 越小,则说明两幅图像之间的偏差越小,图像复原效果就越好。

2)SSIMSSIM 算法将图像相似性测量方法分解为亮度、对比度以及结构 3 种因素之间的相互关联。用均值代表亮度的估计,标准差代表对比度的估计,协方差作为结构相似程度的度量。结构相似度的取值范围为-1 到 1,其值越接近于 1,则表明两幅图像越相似,SSIM 的最佳值等于 1。

3)图像质量指数 Q,衡量图像的结构失真,完整反映图像复原质量。首先计算原始图像与复原图像的平均值、方差以及协方差,然后将计算得到的值代入图像质量指数式(9),比较结果值的大小,其值越大,说明图像复原结果越优。

$$Q = \frac{4\delta_{x,y}\bar{x} \cdot \bar{y}}{(\delta_x^2 + \delta_y^2)[x^2 + y^2]} \quad (9)$$

式中: x 表示原始清晰图像; y 表示复原后图像。

根据以上评价方法,选用图 7 来比较各种复原算法的恢复效果,结果如表 1 所示。

表 1 不同复原算法客观评价

图像名称	MSE	SSIM	Q 值
模糊图像	88.753 1	0.082 6	-0.004 7
维纳滤波算法	77.414 8	0.375 3	0.423 9
梯度平滑边界算法	60.537 4	0.554 9	0.590 6
改进算法	53.662 7	0.617 6	0.637 2

选用不同尺寸的模糊核对图 6 模糊图像进行复原,模糊核的大小分别 $8 \times 8, 9 \times 9, 10 \times 10, 11 \times 11, 12 \times 12, 13 \times 13$ 以及 14×14 ,复原结果如图 9 所示,图中的各行分别表示不同模糊核得到的模糊图像,传统维纳滤波算法复原图,梯度平滑边界算法结合传统维纳滤波算法复原图,最后一行表示改进梯度平滑边界算法结合改进维纳滤波算法恢复图,从左到右依次为 8×8 到 14×14 不同尺寸模糊核复原图。图像质量评价结果如表 2 以及图 10~12 所示。

从表 2 可以看出维纳滤波算法得到的 MSE 值一直大于其他两种算法,改进算法的 MSE 值虽然大于梯度平滑边界算法但两者相差可以忽略,说明维纳滤波算法复原图与原始图偏差较大。改进算法得到的 SSIM 与 Q 值大于梯度平滑边界算法,而梯度平滑边界算法又一直大于维纳滤波算法,可以表明改进算法得到的结果与原图最相符。同时从上表可以看出模板尺寸越小,SSIM 与 Q 值越大,复原结果越佳。



图 9 图像复原结果

表 2 不同尺寸的模糊核复原客观评价

复原算法	模板尺寸	MSE	SSIM	Q 值
维纳滤波 算法	8×8	146.923 8	0.297 4	0.308 7
	10×10	145.437 8	0.255 7	0.257 0
	12×12	147.347 6	0.256 3	0.250 8
	14×14	145.963 9	0.242 4	0.230 8
梯度平滑 边界算法	8×8	131.971 8	0.631 9	0.584 5
	10×10	130.277 5	0.522 4	0.488 8
	12×12	128.356 5	0.447 8	0.424 3
	14×14	128.828 9	0.423 0	0.402 7
改进算法	8×8	132.308 5	0.799 4	0.718 1
	10×10	132.061 8	0.699 8	0.618 7
	12×12	129.547 1	0.588 1	0.520 4
	14×14	130.084 3	0.540 3	0.481 8

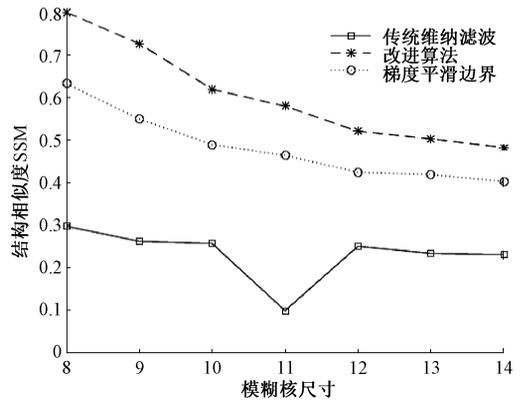


图 11 结构相似度质量评价

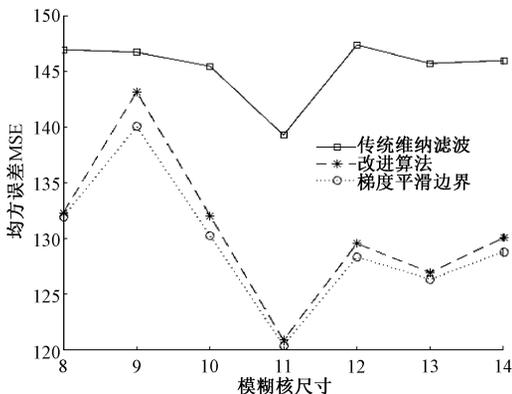


图 10 均方误差质量评价

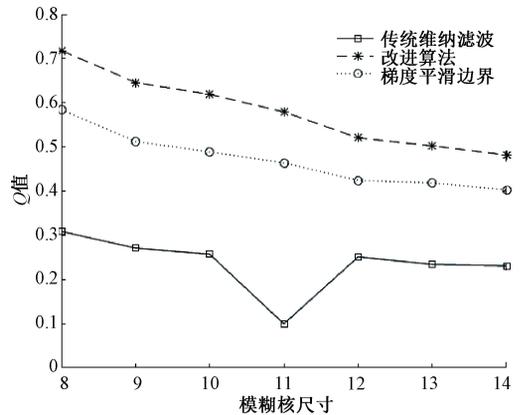


图 12 图像质量指数质量评价

由图10~12可见,随着模糊核尺寸的增大,结构相似性以及图像质量指数呈下降趋势,图像质量变差且丢失了原始图像的某些细节信息。改进算法的MSE值与梯度平滑边界算法得到的值相差很小。对于不同尺寸的模糊核,改进算法得到的SSIM与Q值均高于其他两种算法,其SSIM值相对于梯度平滑边界算法至少提高了27%,Q值提高了19%,说明改进后的梯度平滑边界算法的图像复原效果较好,能够有效抑制振铃现象。若只考虑改进算法的图像复原效果,当模糊核的尺寸较小时,得到的图像结构相似度和Q值均较大,说明模糊核尺寸越小得到的图像复原效果越好。

6 结 论

图像边界存在的高对比度以及截断效应导致图像在复原过程中产生振铃效应,为了有效消除这种振铃效应,提出了改进梯度平滑边界算法,不仅可以抑制振铃与噪声还有效地保存了图像边缘信息,相对于梯度平滑边界算法复原图像有更多的图像细节,比较于最优窗法可以恢复图像的完整性,提高了图像复原质量。同时通过图像质量客观评价方法可以得到改进梯度平滑边界算法相对于梯度平滑边界算法在结构相似度、图像质量指数两方面均有提高。然而,本文还没有比较各个算法的运行效率,而且还需要对其他类型的振铃效应抑制问题进行研究,以期提高方法的通用性。

参考文献

- [1] 杨阳,王宏力,陆敬辉,等.改进的RL模糊星图复原算法[J].传感器与微系统,2016,35(4):148-150.
- [2] 李桐,胡绍海,刘帅奇,等.基于有理数多项式先验模型的图像盲去模糊[J].电视技术,2015,39(14):9-12.
- [3] 朱一帆.基于逆滤波、维纳滤波算法的图像复原技术的研究[J].中国新通信,2018,20(6):238.
- [4] 李汉平,王锋,艾宪芸.编码板成像系统MLEM算法优化[J].核技术,2017,40(2):45-50.
- [5] TEKALP A M, SEZAN M I. Quantitative Analysis of Artifacts in Linear Space-Invariant Image Restoration[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.

- [6] 赵剡,李东兴,许东.抑制复原图像振铃波纹的频域循环边界算法[J].北京航空航天大学学报,2006,32(11):1290-1294.
- [7] 黄捷,黄廷祝,赵熙乐,等.基于移位反射边界条件的图像复原[J].中国科学:信息科学,2012,42(4):504-519.
- [8] SERRA-CAPIZZANO S. A note on anti-reflective boundary conditions and fast deblurring models[J]. Siam Journal on Scientific Computing, 2004, 25(4): 1307-1325.
- [9] 王辉登.基于振铃抑制的运动模糊图像复原方法研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [10] 王靖,施刚,张磊,等.运动模糊图像边缘振铃效应的抑制方法[J].电子测量技术,2013,36(5):62-67.
- [11] 王蒙蒙.编码孔径成像技术[J].中国新技术新产品,2011(4):59-59.
- [12] 赵明华,张鑫,石争浩,等.正弦积分拟合的图像复原边界振铃效应抑制方法[J].中国图象图形学报,2017,22(2):249-256.
- [13] 杨文霞,陈湘平,蔡超.前视红外图像复原及边界振铃效应消除研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(15):150-155.
- [14] CATTERMOLE K W. The Fourier transform and its applications [J]. Electronics & Power, 2009, 11(10):357.
- [15] TAN K C, LIM H, TAN B T G. Windowing techniques for image restoration[J]. Cvgip Graphical Models & Image Processing, 1991, 53(5):491-500.
- [16] 龚梦欢,胡宗福.图像复原的边界振铃效应抑制算法[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2015,33(6):864-867.

作者简介

梁英,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:1273286594@qq.com

于洵,教授,主要研究方向为光电测试技术、光电信息系统与技术。