

[文章编号] 1003—4684(2022)05-0023-05

一种新的卡尔曼滤波图像复原算法

张 琦, 张 慧, 潘 健, 刘松林

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 电气与工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为了更好地对退化图像进行降噪, 提升算法运行效率, 同时保留复原图像边缘细节信息, 提出了一种交替卡尔曼滤波图像复原算法。与传统方法相比, 该算法不需要估计退化函数, 仅需将退化图像的信息矩阵第一行(或列)代入卡尔曼滤波预测方程作为初始值进行滤波, 然后将第一次滤波图像的信息矩阵第一列(或行)代入卡尔曼滤波预测方程作为初始值进行第二次滤波获得复原图像。仿真结果表明, 交替卡尔曼滤波图像复原算法在去除退化噪声保证图像清晰的同时, 还能快速完成图像复原, 其计算时间降为维纳滤波复原法计算时间的 2%。

[关键词] 交替卡尔曼滤波; 图像复原; 维纳复原; 预测方程; 退化图像

[中图分类号] TP391 [文献标识码] A

随着科技的不断发展, 数字图像在医学、日常生活、军事、天文学等方面受到更多的关注, 逐渐成为人类获取信息的主要途径之一^[1]。但是图像在形成、采集、传输、存储等过程中容易遭受以高斯噪声为主的噪声干扰, 造成图像退化, 为后续图像进一步处理增加困难^[2]。传统的经典复原方法可以获得良好的复原效果, 但仍存在着算法运行时间长和不能保持复原图像的边缘细节等问题^[3-9]。1960 年, 卡尔曼等人提出了适用于多维随机过程的状态空间法描述系统, 数据存储量小, 过程具有递推性的卡尔曼滤波法^[10]。在卡尔曼滤波的基础上, 学者将卡尔曼滤波应用到不同的场景, 包括图像复原领域, 但卡尔曼滤波图像复原方法不能得到清晰的复原图像^[11-17]。为了解决噪声干扰问题, 对退化图像进行降噪, 且提升算法运算效率, 同时对复原图像的边缘细节信息进行保留, 基于卡尔曼滤波算法无偏估计且以最小方差为准则的特点, 本文提出了一种交替卡尔曼滤波图像复原算法。该算法优势是不需要估计退化图像的退化函数, 仿真结果表明, 该算法能有效地减少噪声对图像的干扰, 提升算法运算效率, 同时保证图像良好的清晰度。

1 图像退化—复原模型及评价标准

1.1 图像退化模型

图像受到噪声干扰会产生退化, 建立相应的数学模型有助于利用算法消除噪声干扰, 得到与原始

图像特征相近的复原图像。实际上, 建立目标数学模型是相当困难的, 但是通过大量的实验研究发现, 大部分退化过程可以模拟成线性模型^[2]。因此人们通过在线性区域内加入噪声干扰, 近似模拟出退化图像的数学模型(图 1)。

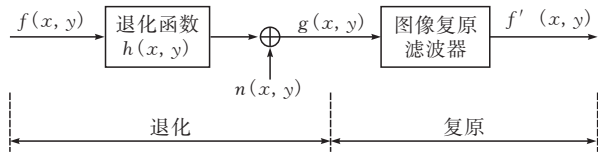


图 1 图像退化—复原的数学模型

一般地, 采用线性时不变系统对图像系统建模, 退化图像 $g(x, y)$ 的表达如下:

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

式中, $g(x, y)$ 表示退化图像, $f(x, y)$ 表示原始图像, $h(x, y)$ 表示退化函数, $n(x, y)$ 为模拟噪声干扰, “*” 为卷积符号。

1.2 复原图像的评价指标

一般地, 复原图像的评价指标分为主观和客观两个层面。

主观评价主要是依靠人眼分辨图像的清晰度, 容易受到复原图像本身的特征、观察者自身主观因素及观察环境的影响。

与主观评价不同的是, 客观评价是根据理想图像和复原图像的像素、灰度值和峰值信噪比等实际参数的比较, 以此判断复原图像质量的优劣。

1.2.1 峰值信噪比 (PSNR) 图像峰值信噪比的大

[收稿日期] 2021—07—29

[基金项目] 湖北省重点实验室开放基金(HBSEES201902)

[第一作者] 张 琦(1996—), 男, 湖北荆州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程

[通信作者] 潘 健(1962—), 男, 湖北武汉人, 湖北工业大学教授, 研究方向为控制理论与控制工程

小也可以反映图像的质量好坏,峰值信噪比大小与图像质量好坏呈正相关^[6]。其表达式如下:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{\text{MSE}} \right)$$

1.2.2 均方误差 (MSE) 均方误差是变量差值比较常用的尺度之一,将理想图像 $f(x,y)$ 在坐标 (x,y) 处的灰度值与复原图像 $\hat{f}(x,y)$ 在坐标 (x,y) 处的灰度值看作随机变量,按照均方差最小准则,均方误差值越小表示复原图像还原度越高,其表达式如下:

$$\text{MSE} = \frac{1}{P \times Q} \sum_{x=1}^P \sum_{y=1}^Q (f(x,y) - \hat{f}(x,y))^2$$

式中, P 和 Q 分别表示图像长度和宽度上的像素个数。

主观评价标准通过肉眼观察,速度快,但随机性较强;客观评价标准通过数值计算进行比较分析,速度较慢,评价较为准确。根据二者的特点,将二者结合作为图像复原程度的评价标准。

2 改进卡尔曼滤波图像复原算法

2.1 尔曼滤波图像复原算法

1) 卡尔曼 (Kalman) 滤波 卡尔曼滤波基本思想以 $k-1$ 时刻的状态值 $\hat{x}_{k-1,k-1}$ 为准,根据一步预测方程,得到 k 时刻的状态值 $\hat{x}_{k,k-1}$,同时利用传感器等对状态进行观测,得到观测量 Z_k ,通过观测量的更新对预测值进行修正,得到 k 时刻最优状态估计 $\hat{x}_{k,k}$ ^[16]。

随机线性离散系统的状态方程和量测方程如下:

$$\begin{cases} X_k = \alpha_{k,k-1} X_{k-1} + \beta_{k,k-1} W_{k-1} \\ Z_k = \mu_k x_k + V_k \end{cases}$$

其中 $\alpha_{k,k-1}$ 表示 $k-1$ 到 k 时刻的 $n \times n$ 维非奇异状态一步转移矩阵; $\beta_{k,k-1}$ 是 $k-1$ 时刻的 $n \times p$ 维系统噪声矩阵; μ_k 是 k 时刻的 $m \times n$ 维观测矩阵; W_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的 p 维系统噪声; V_k 为 k 时刻的 m 维观测噪声^[16]。

假设 W_k 和 V_k 都是均值为零的高斯白噪声, W_k 和 V_k 相互独立^[16]。统计特性如下:

$$\begin{cases} E[W_k] = E[V_k] = 0 \\ E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj} \\ E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj} \\ E[W_k V_j^T] = 0 \end{cases}$$

式中, Q_k 、 R_k 分别是系统过程噪声 W_k 和观测噪声的方差,一般地, Q_k 是半正定的, R_k 是正定的, δ_{kj} 为 Kronecker- δ 函数^[16]。

状态一步预测方程如下:

$$\hat{X}_{k,k-1} = \alpha_{k,k-1} \hat{X}_{k-1,k-1} \tag{1}$$

状态估计方程如下:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - \mu_k \hat{X}_{k,k-1}] \tag{2}$$

滤波增益方程如下:

$$K_k = P_{k,k-1} \mu_k^T [\mu_k P_{k,k-1} \mu_k^T + R_k]^{-1} \tag{3}$$

进一步预测均方差方程如下:

$$P_{k,k-1} = \alpha_{k,k-1} P_{k-1,k-1} \alpha_{k,k-1}^T + \beta_{k,k-1} Q_{k-1} \beta_{k,k-1}^T \tag{4}$$

估计均方差方程如下:

$$P_k = [I - K_k \mu_k] P_{k,k-1} \tag{5}$$

上述方程中式(1)~(2)是滤波计算方程; (3)~(5)是增益计算方程。

卡尔曼滤波的初始化参数值设定会影响滤波效果,即影响图像复原效果。一般地,设定卡尔曼滤波初始值需要根据工程实践经验总结^[14]。在工程经验总结参数范围内,通过多次仿真试验,确定较为理想参数值: $\alpha_{k,k-1} = 1, \beta_{k,k-1} = 0, \mu_k = 1, R_k = 0.25, Q_k = 0.25$ 。

2.2 算法步骤与流程图

由于 Kalman 滤波复原存在问题,按行或列进行图像复原,行间或列间没有关联,为充分利用复原点四周的像素信息,提升 Kalman 图像复原效果,提出交替卡尔曼滤波图像复原算法。该算法的思路:进行第一次卡尔曼滤波时,其过程是行滤波,即取图像(矩阵)的行作为输入值,然后开始迭代运算。在进行第二次卡尔曼滤波时,取经过第一次滤波后得到的图像(矩阵)的列作为第二次滤波的输入值。

本算法的详细步骤(图 2)如下: 1) 读取理想的图像; 2) 若是彩色图像,需要灰度化处理; 3) 为理想的图像加上噪声; 4) 进行卡尔曼行滤波; 5) 进行卡尔曼列滤波; 6) 求两次滤波后图像的平均图像; 7) 计算步骤 3)、4)、5)、6) 复原结果图像的均方误差和峰值信噪比(图 2),其中 1)~3) 为进行研究而增加的图像。实际应用中主要为 4)~7)。

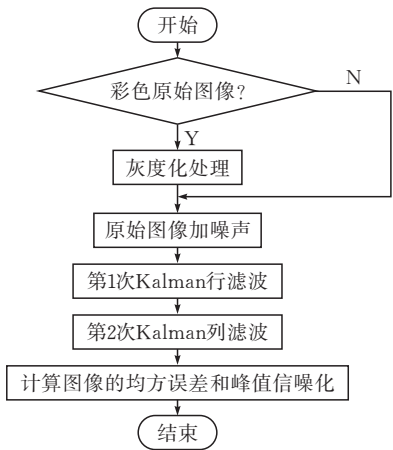


图 2 交替 Kalman 滤波图像复原流程

2.3 仿真结果与分析

图像(矩阵)通过行列的不同顺序组合方式有四

种结果,改进的卡尔曼滤波复原法根据组合方式的不同进行滤波,分为四类:行-行组合、行-列组合、列-列组合、列-行组合。分析图 3、图 4 可得,与施加噪声干扰图像(b)相比,4 种改进卡尔曼滤波复原图像中的噪声点均明显减少,说明本文提出的方法有较好的降噪能力。与图(c),(e)相比,图(c),(e)经过行列交替进行图像复原,复原图像较清晰,故将退化图像矩阵的行、列信息交叉进行卡尔曼滤波复原时效果较优,将这种行、列信息交叉进行图像复原的算法称为交替卡尔曼滤波复原法。

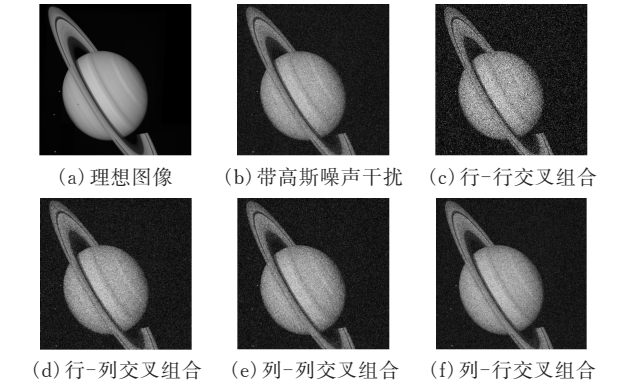


图 3 Saturn 图带高斯噪声干扰图像与四种改进卡尔曼滤波复原图像

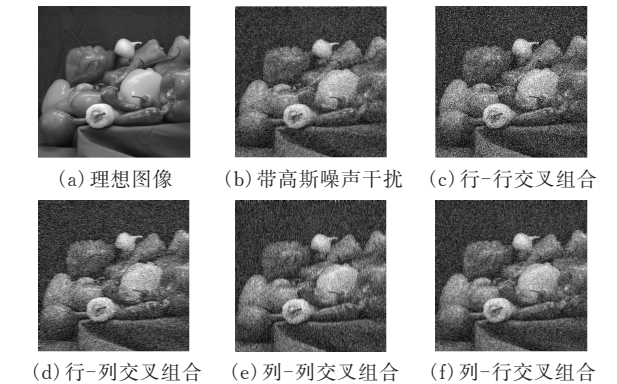


图 4 Peppers 图带高斯噪声干扰图像与四种改进卡尔曼滤波复原图像

分析表 1 可得:同一物体的复原图像和带噪声干扰图像对比,均方误差值大幅降低,且复原图像的峰值信噪比相较带噪声干扰图像获得了提高,说明改进卡尔曼滤波复原法对图像具有良好的降噪能力;四种不同行列顺序组合形式的卡尔曼滤波复原算法中行列交替卡尔曼滤波复原图像的均方误差小于行-行、列-列两种行列信息不交叉复原的算法,同时相应的峰值信噪比也略大,表明交替卡尔曼滤波复原算法的复原效果更好。由表 2 知,同一物体的复原图像进行对比,四种改进卡尔曼滤波复原法运行时间无明显区别。综合图 3、表 1 和表 2 可以看出:相比于行列信息不交叉复原算法的滤波复原图像,交替卡尔曼滤波复原法的滤波复原图像较为

清晰,效果较好。

表 1 带高斯噪声干扰图像与四种改进卡尔曼滤波复原图像的数据比较

图 3、4	峰值信噪比(PSNR)		均方误差(MSE)	
	Saturn	Peppers	Saturn	Peppers
(b)	62.98	61.99	0.0298	0.0376
(c)	66.99	66.12	0.0108	0.0126
(d)	68.22	67.94	0.0098	0.0096
(e)	66.96	66.06	0.0106	0.0124
(f)	67.98	67.88	0.0099	0.0098

表 2 交替卡尔曼滤波复原方法所用时间的对比

复原方法	所用时间/s	
	Saturn	Peppers
行-行组合复原法	0.0886	0.0098
行-列组合复原法	0.0598	0.0089
列-列组合复原法	0.0296	0.0076
列-行组合复原法	0.0596	0.0094

交替卡尔曼滤波复原法分为行-列、列-行两种组合形式,两者复原效果差别很小,为方便讨论,本文选择行-列组合方式对后面的内容进行分析。

2.4 交替卡尔曼滤波复原方法与其它复原方法的对比

观察图 5、图 6 可知,与带高斯噪声干扰图像相比,三种不同滤波复原图像中的噪声点均明显减少,说明维纳复原法、卡尔曼滤波复原法和交替卡尔曼滤波复原法均具有良好的降噪能力。三种复原图像相比图(a)含有的噪声点最少,图(e)次之,图(d)最多。因此,三种不同滤波复原法中维纳滤波复原法降噪能力较优,交替卡尔曼滤波复原法次之,卡尔曼滤波复原法较差。同时,不难看出,维纳滤波复原法的滤波图像相较于交替卡尔曼滤波复原图像清晰度较差。综合分析,交替卡尔曼滤波复原法优于其它复原方法。

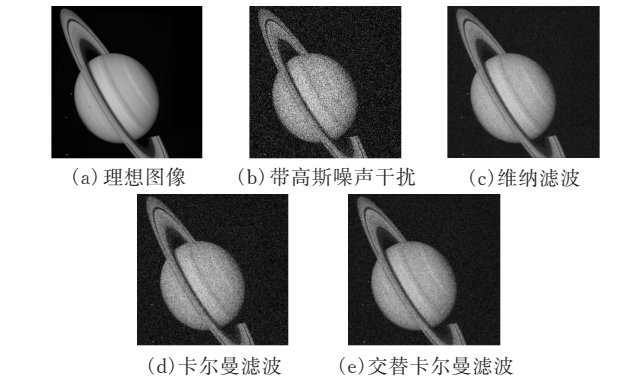
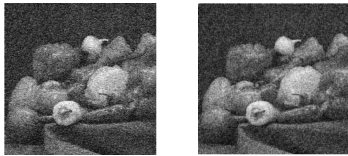


图 5 Saturn 图像复原方法的对比





(d) 卡尔曼滤波 (e) 交替卡尔曼滤波

图 6 Peppers 图像复原方法的对比

分析表 3 可知,对比三种图像滤波复原方法,均方误差值方面,卡尔曼滤波复原图像最大,交替卡尔曼滤波复原图像次之,维纳滤波复原图像最小;峰值信噪比方面,维纳滤波复原图像最大,交替卡尔曼滤波复原图像次之,卡尔曼滤波复原图像最小。

表 3 带高斯噪声干扰图像与三种滤波复原图像的数据比较

图 5、6	峰值信噪比 (PSNR)		均方误差 (MSE)	
	Saturn	Peppers	Saturn	Peppers
(b)	62.98	61.99	0.0298	0.0376
(c)	69.83	67.98	0.0058	0.0084
(d)	65.56	64.96	0.0146	0.0175
(e)	67.98	67.88	0.0098	0.0096

相较于维纳滤波算法的复原图像,交替卡尔曼滤波复原图像的峰值信噪比基本相同,均方误差值方面,Saturn 图,两种复原图像算法分别为 0.0098、0.0058;Peppers 图,两种复原图像算法分别为 0.0096、0.0084,降噪能力较维纳滤波算法略差。

交替卡尔曼滤波复原图像和卡尔曼滤波复原图像相比,峰值信噪比差别不大,均方误差降低 50% 以上,复原效果更接近理想图像,降噪能力优于卡尔曼滤波复原方法。由表 4 可知:在同一幅图像中算法运行时间长短依次为维纳滤波复原法、交替卡尔曼滤波复原法、卡尔曼滤波复原法。

表 4 三种图像滤波复原方法所用时间

复原方法	所用时间/s	
	Saturn	Peppers
维纳滤波复原法	3.8128	0.4496
卡尔曼滤波复原方法	0.0181	0.0058
交替卡尔曼滤波复原方法	0.0598	0.0089

交替卡尔曼滤波图像复原法所需的运行时间较维纳滤波复原法相比,占维纳滤波复原法中的 Saturn 图的 1.57%;Peppers 图的 1.98%,极大提升了算法运行效率缩短了算法运行时间。在能获得较好复原效果的情况下,交替卡尔曼滤波复原方法计算时间降为维纳滤波复原法计算时间的 2% 以下。

结合图 4、表 3 和表 4,综合分析三种滤波复原方法的图像降噪能力、算法运行效率以及滤波复原图像的清晰度,交替卡尔曼滤波图像复原方法优于其他两种图像复原方法。

3 结论

本文提出一种交替卡尔曼滤波图像复原算法,用于复原受高斯噪声污染的图像。通过与维纳滤波复原结果进行对比,以主观评价标准和客观评价标准表明交替卡尔曼滤波复原图像的结果明显优于维纳滤波复原的结果。仿真结果验证了该算法能有效地消除噪声对退化图像的干扰,提升算法运算效率,同时较为清晰的呈现图像的边缘细节信息。

[参 考 文 献]

[1] XUE H Z, CUI H W. Research on image restoration algorithms based on BP neural network[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019, 59: 204-209.

[2] 孙英慧, 孙英娟. 基于维纳滤波的图像还原研究[J]. 长春师范大学学报, 2016, 35(10): 30-33.

[3] 杨东. 模糊降质图像恢复技术研究进展[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 2881-2888.

[4] 闫河, 闫卫军, 李唯唯. 基于 Lucy-Richardson 算法的图像复原[J]. 计算机工程, 2010, 36(15): 204-205, 210.

[5] 钱春强, 王继成. 基于改进约束最小二乘方法的图像复原算法[J]. 计算机技术与发展, 2007(6): 9-11, 14.

[6] 贾花萍. 盲去卷积算法在图像恢复中的应用研究[J]. 信息技术, 2011, 35(5): 38-39.

[7] 陈华玲, 冯桂. 数字图像的混合噪声去除[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 150-152.

[8] 王伟鹏, 戴声奎, 项文杰. 一种雾天退化场景快速复原方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 156-160.

[9] 王伟鹏, 戴声奎. 引导滤波在雾天图像清晰化中的应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 263-268.

[10] 赛地瓦尔地·买买提, 阿布都加帕尔·如苏力, 米娜瓦尔·吾买尔. 基于卡尔曼滤波的图像降噪方法研究[J]. 通信技术, 2016, 49(4): 423-42.

[11] 贾英江. 局域自适应卡尔曼滤波器的图像复原[J]. 计算机应用研究, 1993(2): 49-52.

[12] 王楠, 李文成, 李岩. 基于卡尔曼滤波的图像复原[J]. 光机电信息, 2010, 27(2): 28-31.

[13] ZHANG Y, WANG G Y, XU J T, et al. A method of eliminating the signal-dependent random noise from the raw CMOS image sensor data based on Kalman filter[J]. Signal Processing, 2014, 104: 401-406.

[14] 李卓, 王远, 刘洁瑜. 基于卡尔曼滤波初始化的图像恢复[J]. 计算机应用, 2016, 36(S2): 146-148, 178.

[15] 刘萋萋, 武小平, 韦超, 等. 一种基于非局部思想的改

进图像降噪算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(4): 1277-1280.

[16] PAN J, YANG X H, CAI H F, et al. Image noise smoothing using a modified Kalman filter[J]. Neuro-computing, 2016, 173: 1625-1629.

[17] GAO Y,ZHANG S,LI T,et al.A novel two-step noise reduction approach for interferometric phase images [J].Optics & Lasers in Engineering, 2019,121:1-10.

A New Kalman Filter Image Restoration Algorithm

ZHANG Qi,ZhANG Hui,PAN Jian,LIU Songlin

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy
and Operation Control of Energy Storage System ,

School of Electrical and Electronic Engineering ,Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to reduce the noise of the degraded image better, improve the efficiency of the algorithm, and retain the details of the edge of the restored image, an alternative Kalman filter image restoration algorithm is proposed. Compared with the traditional method, this algorithm does not need to estimate the degradation function. It only needs to substitute the first row (or column) of the information matrix of the degraded image into the Kalman filter prediction equation as the initial value for filtering, and then filter the image information for the first time. The first column (or row) of the matrix is substituted into the Kalman filter prediction equation as the initial value to perform the second filtering to obtain the restored image. The simulation results show that the alternative Kalman filter restoration algorithm can quickly complete image restoration while removing degraded noise and ensuring image clarity. The calculation time is reduced to 2% of the calculation time of the Wiener filter restoration method.

Keywords: alternate Kalman Filter; image restoration; Wiener restoration; prediction equation; degraded image

[责任编辑：张岩芳]

(上接第 16 页)

A Double-Supply Eight-Switch Nine-Lever Inverter and Its Modulation Strategy

PAN Jian, CHEN Guangyi, XIONG Jiaxin,CHEN Qingdong

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar
Energy and Operation Control of Energy Storage ,

School of Electrical and Electronic Engineering ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: Aiming at the problems of many devices and complex modulation strategy in the existing multi-level inverter, a double-supply eight-switch nine-level inverter is proposed. The inverter is only composed of two DC input sources, eight switches, one switching capacitor and one diode. It can output nine levels with fewer devices. Among them, additional capacitor voltage balancing circuit and complex control algorithm are not needed because the voltage of the capacitor is self-balancing. The working states of the four pairs of switches are complementary, which further reduces the complexity of the modulation strategy. Firstly, the topology and working principle of the inverter are introduced in detail, and then the modulation strategy of the inverter is designed. Finally, the experimental results verify the effectiveness and feasibility of the topology and its modulation strategy.

Keywords: nine-level inverter; double-supply; switching capacitor

[责任编辑：张岩芳]