

# 基于卡尔曼滤波的相干激光雷达距离像复原仿真

夏志伟 李琦 王琪

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要** 采用基于单步预测的卡尔曼滤波器,利用含噪声图像的自身特性估计噪声参数,研究了一种对多帧静止相干激光雷达距离像进行复原的方法。通过对仿真图像进行复原,研究了在可利用图像帧数较少时的滤波性能和帧数足够多时滤波性能的极限值,并与在相同帧数下的图像平均法进行比较。结果表明,该算法收敛速度快、具有更高的图像改善信噪比和极限值。

**关键词** 图像处理;图像复原;卡尔曼滤波;相干激光雷达

**中图分类号** TN957.52 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.051002

## Simulation of Coherent Lidar Range Image Restoration Based on Kalman Filtering

Xia Zhiwei Li Qi Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

**Abstract** A restoration method for multi-frame stillness coherent lidar images is studied based on one-step predictive Kalman filter. Parameters of noise are estimated from the characteristic of the degradation images. In the image restoration progress of simulation, performance of the filter is studied under the condition of using less available images, as well as the limit value of the performance under the condition of using enough available images. The data are compared with those of an image averaging method. The results show that the method has a fast convergence speed, a higher improvement-in-signal-to-noise-ratio and a higher limit value.

**Key words** image processing; image restoration; Kalman filtering; coherent lidar

**OCIS codes** 100.2000; 100.3020; 070.6110; 330.6110

## 1 引言

数字图像在获取和传输的过程中,不可避免地受到各种物理条件的影响,如大气湍流、光学系统的像差及噪声干扰等,都会造成图像模糊,成像质量下降等问题。图像复原技术目前已被广泛应用于国防、工业、医学等领域<sup>[1]</sup>。相干激光雷达可同时成强度像和距离像,这两种像均反映了目标的本征性质,且由于距离像的存在,增加了信息量,从而提高了目标识别能力。但相干激光雷达直接采集到的图像往往带有很多噪声,如散斑噪声,严重地降低了目标识别的精度。为了更好的利用距离像,需要对距离像进行图像复原<sup>[2]</sup>。

卡尔曼滤波器用于红外图像处理中已有不少研究<sup>[3,4]</sup>,而在相干激光雷达图像处理方面的研究不多。本文采用了一种基于卡尔曼滤波的图像复原法,对多帧静止相干激光雷达距离像复原进行仿真研究。算法中所需的噪声参数从图像自身特性中进行估计,通过对仿真图像进行复原,研究了在可利用图像帧数较少的情况下的滤波性能,并将结果与在相同帧数下图像平均法的滤波结果进行比较;在图像帧数足够多的情况下,比较了本算法和图像平均法所能达到的滤波性能的极限值。

**收稿日期**: 2010-08-02; **收到修改稿日期**: 2010-11-10

**作者简介**: 夏志伟(1982—),男,硕士研究生,主要从事激光图像处理方面的研究。E-mail: xiazhw@126.com

**作者简介**: 李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光主动成像技术方面的研究。E-mail: hit\_liqi@yahoo.com.cn

## 2 图像模型的建立

用  $f(x, y)$  二维函数表示图像, 图像退化过程可模型化为: 一个输入图像  $f(x, y)$  上的冲激响应  $h(x, y)$  和加性噪声  $\eta(x, y)$  联合产生退化图像  $g(x, y)$ 。退化系统的物理过程, 用数学表达式写成如下的形式<sup>[5,6]</sup>

$$g(x, y) = h(x, y)f(x, y) + \eta(x, y). \quad (1)$$

图像采集过程为: 不断采集  $n(n = 1, 2, 3, \dots)$  个时刻的图像  $\mathbf{S}(n)$ , 得到多帧图像  $\{\mathbf{S}(1), \mathbf{S}(2), \mathbf{S}(3), \dots, \mathbf{S}(n), \mathbf{S}(n+1), \dots\}$ 。该过程可以用广义马尔可夫过程描述

$$\mathbf{S}(n) = \mathbf{C}\mathbf{S}(n-1) + \mathbf{U}(n), \quad (2)$$

式中  $\mathbf{C}$  为模型参数矩阵, 表示第  $n$  帧和第  $n-1$  帧图像之间的关系,  $\mathbf{U}(n)$  为均值为零的高斯白噪声。

假设帧  $\mathbf{S}(n)$  作为“现在”, 则“过去”为  $\{\mathbf{S}(1), \mathbf{S}(2), \mathbf{S}(3), \dots, \mathbf{S}(n-1)\}$ , “将来”为  $\{\mathbf{S}(n+1), \mathbf{S}(n+2), \dots\}$ <sup>[7]</sup>。这里所划分的三种状态与一维情况的卡尔曼滤波器的状态定义有所不同, 如图 1 所示。

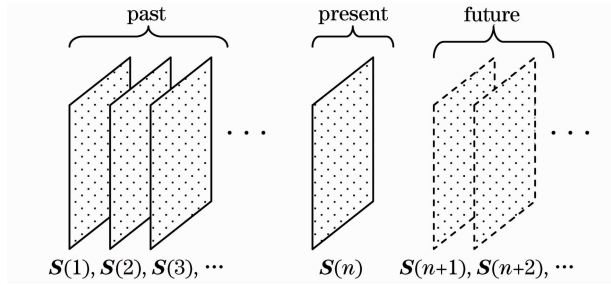


图 1 模型的三种状态

Fig. 1 Three states of model

设第  $n$  帧图像的状态矢量  $\mathbf{X}(n)$  为

$$\mathbf{X}(n) = \begin{bmatrix} x_n(1,1), x_n(1,2), x_n(1,3), \dots, x_n(1,N); \\ x_n(2,1), x_n(2,2), x_n(2,3), \dots, x_n(2,N); \\ \dots \\ x_n(M,1), x_n(M,2), x_n(M,3), \dots, x_n(M,N) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $x_n(i, j)$  为第  $n$  帧图像上的像素点  $(i, j)$  的灰度值。

基于上述假设, 建立状态空间模型, 其传输过程和测量过程的数学方程为

$$\mathbf{X}(n) = \mathbf{C}\mathbf{X}(n-1) + \mathbf{U}(n), \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}(n) = \mathbf{H}\mathbf{X}(n) + \mathbf{V}(n), \quad (5)$$

式中  $\mathbf{C}$  为从  $n-1$  时刻到  $n$  时刻的转移矩阵,  $\mathbf{Y}(n)$  为测量矢量,  $\mathbf{H}$  为  $n$  时刻的测量矩阵,  $\mathbf{U}(n)$  为过程噪声,  $\mathbf{V}(n)$  为测量噪声。当探测目标场景静止时, 有  $\mathbf{C} = \mathbf{I}$  ( $\mathbf{I}$  为  $M \times M$  单位矩阵),  $\mathbf{H} = \mathbf{I}$ 。

于是, 对于状态矢量  $\mathbf{X}(n)$  中的每一个像素点  $x_n(i, j)$ , 有

$$x_n(i, j) = x_{n-1}(i, j) + u(i, j), \quad (6)$$

$$y_n(i, j) = x_n(i, j) + v(i, j), \quad (7)$$

式中  $y_n(i, j)$  为像素点  $(i, j)$  的测量值,  $u(i, j)$  和  $v(i, j)$  分别为像素点  $(i, j)$  的过程噪声和测量噪声, 它们均服从均值为零的高斯分布, 方差分别为  $\sigma_u^2(i, j)$  和  $\sigma_v^2(i, j)$ , 有<sup>[8]</sup>

$$\sigma_u^2(i, j) = E\{[x_n(i, j) - x_{n-1}(i, j)]^2\}, \quad (8)$$

$$\sigma_v^2(i, j) = E\{[y_n(i, j) - x_n(i, j)]^2\}. \quad (9)$$

有了状态空间模型, 就可以应用卡尔曼滤波法进行图像复原了。

## 3 基于卡尔曼滤波的图像复原流程

1) 卡尔曼滤波过程包括预测和更新两个阶段。

预测阶段表示为

$$\bar{x}_n(i, j) = \hat{x}_{n-1}(i, j), \quad (10)$$

$$\bar{P}_n(i, j) = \hat{P}_{n-1}(i, j) + \sigma_u^2(i, j). \quad (11)$$

更新阶段表示为

$$K_n(i, j) = \frac{\bar{P}_n(i, j)}{\bar{P}_n(i, j) + \sigma_v^2(i, j)}, \quad (12)$$

$$\hat{x}_n(i, j) = \bar{x}_n(i, j) + K_n(i, j)[y_n(i, j) - \bar{x}_n(i, j)], \quad (13)$$

$$\hat{P}_n(i, j) = [1 - K_n(i, j)]\bar{P}_n(i, j). \quad (14)$$

式中  $\bar{x}_n(i, j)$  是利用  $n-1$  状态的预测估计,  $\bar{P}_n(i, j)$  是  $\bar{x}_n(i, j)$  对应的协方差,  $\hat{x}_{n-1}(i, j)$  和  $\hat{x}_n(i, j)$  分别是  $n-1$  和  $n$  状态的滤波估计,  $\hat{P}_{n-1}(i, j)$  和  $\hat{P}_n(i, j)$  分别是  $\hat{x}_{n-1}(i, j)$  和  $\hat{x}_n(i, j)$  对应的协方差,  $K_n(i, j)$  是卡尔曼增益,  $u(i, j)$  和  $v(i, j)$  分别为过程噪声和测量噪声。

2) 为了便于计算,  $\sigma_u^2(i, j)$  和  $\sigma_v^2(i, j)$  不采用(8)、(9)式, 用以下两式进行估计<sup>[8]</sup>,

$$\sigma_v^2(i, j) = [y_n(i, j) - \hat{x}_{n-1}(i, j)]^2, \quad (15)$$

$$\sigma_u^2(i, j) = [\hat{x}_n(i, j) - \hat{x}_{n-1}(i, j)]^2 = K_n^2(i, j)\sigma_v^2(i, j). \quad (16)$$

卡尔曼滤波器的实现存在严重的数值问题, 由有限字长运算造成的数值不精确导致了卡尔曼滤波器的不稳定, 这种现象称为发散现象<sup>[9]</sup>。为了克服发散现象, 人为地在  $\sigma_v^2(i, j)$  的估计中加上了在归一化条件下均值为零、方差为 0.01 的高斯白噪声。

3) 计算复原图像的改善信噪比(ISNR), 计算公式为<sup>[10]</sup>

$$f_{\text{ISNR}} = 10 \lg \frac{\sum_{i,j} [s(i, j) - o(i, j)]^2}{\sum_{i,j} [r(i, j) - o(i, j)]^2}, \quad (17)$$

式中  $s, o, r$  分别表示退化图像、原始图像和复原图像,  $\sum_{i,j}$  表示对整个图像求和。ISNR 的值越大, 表示复原图像的质量就越好。

## 4 仿真结果分析

利用 25 帧静止相干激光距离像进行仿真测试, 每帧中的随机噪声各不相同。每帧图像的分辨率均为 64 pixel × 32 pixel。该测试中, 在对第  $n$  帧含噪声图像进行卡尔曼滤波处理后, 计算出该帧时复原图像的 ISNR。同时, 为了和卡尔曼滤波法相比较, 采用了一种图像平均法, 该图像平均法的计算公式为

$$\hat{z}_n(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k(i, j), \quad (18)$$

其中  $n$  为当前帧数,  $\hat{z}_n(i, j)$  为第  $n$  帧复原图像中像素点  $(i, j)$  的估计。

该测试中, 图像平均法利用和卡尔曼滤波帧数相同( $n$  帧)的噪声图像, 得到另外一幅复原图像, 同样计算出该复原图像的 ISNR。图 2 给出了相干激光距离像、噪声像以及分别使用卡尔曼滤波法和图像平均法获得的复原图像。

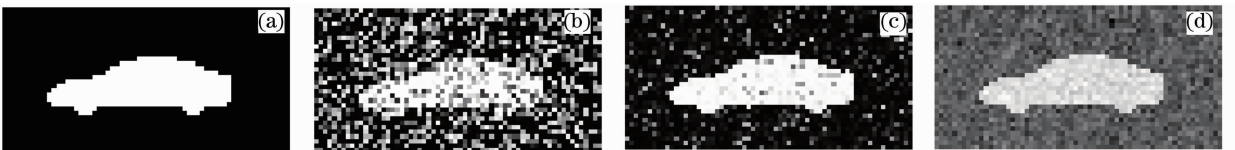


图 2 相干激光距离像及复原图像。(a)原始图像,(b)加噪声图像( $f_{\text{SNR}} = 10$  dB),  
(c)卡尔曼滤波法的复原图像,(d)图像平均法的复原图像

Fig. 2 Coherent lidar images and restored images. (a) Original image, (b) one frame of noise images ( $f_{\text{SNR}} = 10$  dB),  
(c) restored image of Kalman filtering, (d) restored image of image averaging

由卡尔曼滤波法和图像平均法获得的复原图像的 ISNR 的数据可以绘制出如图 3 所示的曲线图。从图 3 可以看出, 卡尔曼滤波法的收敛速度比图像平均法的要快, 卡尔曼滤波法图像的 ISNR 明显高于图像平

均法,如在第 25 帧时卡尔曼滤波法的 ISNR 值为 8.83,图像平均法的 ISNR 值仅为 4.97。并且图像平均法的计算量随着图像帧数的增多而增大,其图像的 ISNR 的提高却不明显。

由于卡尔曼滤波法的 ISNR 随着图像帧数的增多而逐渐提高,从图 3 可以看出,在图像帧数小于 25 帧时其提高接近线性。为研究 ISNR 在该算法下提高的极限值,得到 ISNR 与图像帧数更准确的关系,于是利用 300 帧静止相干激光距离像进行仿真测试,得到仿真图像的 ISNR 曲线图,如图 4 所示。可以看出,从 100 帧之后,ISNR 的提高趋于平缓,200 帧之后提高接近于极限,ISNR 最大值为 15.45。而图像平均法的 ISNR 在 50 帧之后一直处于平坦状态,其最大值为 5.34。对于卡尔曼滤波法的计算量,在 CPU 主频 1.8 GHz、内存 2 GB 的计算机上测试,卡尔曼滤波法处理 300 帧仿真图像所消耗的 CPU 计算时间为 0.079 s。

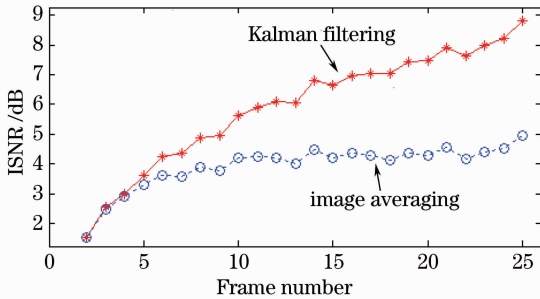


图 3 ISNR 的曲线图

Fig. 3 Curves of ISNR

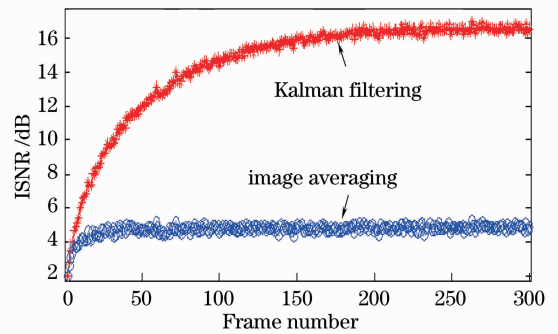


图 4 300 帧 ISNR 的曲线图

Fig. 4 Curves of ISNR by using 300 frames

## 5 结 论

采用基于单步预测的卡尔曼滤波器,利用含噪声图像的自身特性估计出所需噪声参数,研究了一种对多帧静止相干激光雷达距离像进行复原的方法。通过对仿真图像进行复原,研究了在可利用图像帧数较少的情况下的滤波性能,并与在相同帧数下的图像平均法进行比较。结果表明,该算法收敛速度快、具有更高的图像改善信噪比。在图像帧数足够多的情况下,本算法所能达到的滤波性能的极限值也远大于图像平均法的极限值。在实际应用中相干激光雷达的探测目标场景静止的情况较少,因此需要对探测场景中存在运动目标的情况做进一步研究,对运动目标的特性进行分析,从而对图像复原算法做出相应的改进。

## 参 考 文 献

- Lou Shuai, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Iterative image restoration algorithm based on contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2768~2773  
 娄 帅, 丁振良, 袁 峰. 基于 Contourlet 变换的迭代图像复原算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2768~2773
- Li Qi, Wang Yongzhen, Wang Qi *et al.*. Noise suppression algorithm of coherent ladar range image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 581~584  
 李 琦, 王永珍, 王 骐 等. 相干激光雷达距离像的噪声抑制算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 581~584
- Zhou Huixin, Wei Yajiao, Qin Hanlin *et al.*. Kalman-filtering nonuniformity correction algorithm based on nonlinear model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 378~381  
 周慧鑫, 魏亚姣, 秦翰林 等. 基于非线性模型的卡尔曼滤波非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 378~381
- Liu Yongjin, Zhu Hong, Zhao Yigong. Nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays based on steady-state kalman filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1697~1702  
 刘永进, 朱 红, 赵亦工. 基于稳态卡尔曼滤波的红外焦平面阵列非均匀校正算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1697~1702
- Jing Yuefeng, Zhang Xiaolin, Guan Yonghong *et al.*. Constrained conjugate gradient algorithm for image restoration in high-energy radiography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(2): 277~280  
 景越峰, 张小琳, 管永红 等. 基于约束共轭梯度的高能闪光照相图像复原算法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(2): 277~280
- Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing (Second Edition)[M]. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. 2007. 175~176

- 拉菲尔·冈萨雷斯, 理查德·伍兹. 数字图像处理(第二版)[M]. 阮秋琦, 阮宇智 等译. 北京:电子工业出版社, 2007. 175~176
- 7 John W. Woods, Clack H. Radewan. Kalman filtering in two dimensions[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1977, **23**(4): 473~481
- 8 Jiang Heping, Li Biao, Shen Zhenkang. Design of adaptive Kalman filter based on FPGA implementation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(1): 89~92  
江和平, 李 彪, 沈振康. 基于 FPGA 实现的自适应卡尔曼滤波器的设计[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(1): 89~92
- 9 Simon Haykin. Adaptive Filter Theory (Four Edition) [M]. Zheng Baoyu Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 369~393  
赫 金. 自适应滤波器原理(第四版)[M]. 郑宝玉译. 北京: 电子工业出版社, 2003. 369~393
- 10 Wang Nan, Li Wencheng, Li Yan. Image restoration based on Kalman filtering [J]. *OME Information*, 2010, **27**(2): 28~31  
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