

## EMCCD 图像自适应模糊中值滤波算法研究

齐 蕾, 张闻文, 陈 钱, 顾国华

(南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 针对电子倍增 CCD(EMCCD)图像噪声密度随着增益的变化而变化,提出了一种基于噪声点检测的自适应模糊中值滤波算法。该算法由模糊滤波模块和自适应模块两部分组成。首先,该算法对滤波窗口内的中心点进行噪声检测;然后对检测为噪声的像素点引入双阈值,并根据引入的阈值和滤波窗口内的中值建立噪声点的模糊隶属函数,根据模糊隶属函数对噪声点进行滤波处理后输出;最后采用自适应模块调整待处理图像的像素。仿真及实验结果表明,新算法不仅能够有效地将图像中的噪声去除,而且很好地保护了图像中的细节和边缘,PSNR 比传统的自适应中值滤波算法平均提高了 15 dB 以上;该算法在低噪声密度情况下性能明显好于其他中值滤波器,在高噪声密度情况下性能也比较稳定。

**关键词:** 中值滤波; 模糊推理; 隶属函数; 自适应; EMCCD 图像处理

**中图分类号:** TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-3150-06

## Research of EMCCD image filtering method based on adaptive fuzzy median filter

Qi Lei, Zhang Wenwen, Chen Qian, Gu Guohua

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The noise density of Electron Multiplying CCD (EMCCD) image varies with the gain, a noise detection based on adaptive fuzzy median filter (AFMF) algorithm was proposed. The algorithm consisted of fuzzy filtering module and adaptive module. First, the noise pixels in the center of the filter window was identified. Second, the double thresholds were introduced for these detected "noise points", basing on the thresholds and median of the filtering window, the fuzzy membership function of noise points was put forward, and the fuzzy membership function was utilized to filter the noise points. Finally, the adaptive module was used to adjust the pixel in the image. Simulation and experimental results indicate that the new algorithm is able to remove noise pixels effectively and protect the details well in the image. Compared with the adaptive median filtering, the average PSNR improves at least 15 dB. The performance is better than the other median filters under the condition of low noise density and relatively stable under the condition of high noise density.

**Key words:** median filtering; fuzzy reasoning; membership function; adaptive; image processing of EMCCD

收稿日期: 2013-03-06; 修订日期: 2013-04-03

基金项目: 核高基(2013ZX01015001); 装备预研(40405030202); 江苏省自然科学基金(BK20131354); “紫金之星”资助

作者简介: 齐蕾(1988-), 男, 硕士生, 主要从事微光图像滤波方面研究。Email: qilei\_nj@163.com

导师简介: 张闻文(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要从事微光图像处理研究。Email: zhangqww@mail.njust.edu.cn

## 0 引 言

数字图像的获取、传输及储存过程中,会在图像中叠加噪声。噪声的存在会严重影响图像的质量并给后续的图像处理带来相当大的困难,因而,对数字图像噪声滤除的研究一直是数字图像处理领域基础而至关重要的一方面。

国内外使用较多的滤波算法如中值滤波算法<sup>[1-4]</sup>,在滤除噪声的同时使图像的细节变模糊。另一方面,由于模糊理论非常适合于对不确定情况建立模型,在图像处理时,图像中噪声的判断存在不确定性,而利用模糊理论方式处理图像因多灰度所引起的不确定性问题比用普通集合的方法更加合理。因此在图像处理领域中模糊理论很快得到广泛的应用,并提出了很多行之有效的方法。Farbiz F<sup>[5]</sup>提出了一种基于模糊逻辑滤波的图像增强算法,Russo F<sup>[6]</sup>提出了一种加性噪声的模糊滤波方法,Kenny<sup>[7]</sup>提出了一种模糊阈值开关椒盐噪声滤波算法。

针对 EMCCD 图像的特点并结合模糊集合理论,提出了一种自适应模糊中值滤波算法,该算法根据引入的模糊隶属函数对噪声点进行滤波处理,然后自适应调整滤波窗口。

## 1 EMCCD 图像特征分析

EMCCD 根据被测景物光强的空间分布来获取图像,在微光或极微光条件下景物的光强很弱,此时 EMCCD 测到的景物光强信息先经过倍增大后再输出,正是在倍增大信号的同时引入了新的噪声源,即噪声因子。在 EMCCD 中主要噪声有光子散粒噪声、暗电流噪声、时钟感生电荷噪声、读出噪声等<sup>[8]</sup>。但是景物的光强信息需要经过大气传输、光学系统、光电转换和电子处理等过程才被转换为微光图像。因此,EMCCD 图像具有如下特点:(1) 由于景物和背景的光强弱,并且传输距离远、大气衰减等因素的影响,EMCCD 图像视觉效果较模糊。(2) EMCCD 成像系统的探测能力和空间分辨率低于可见光 CCD 阵列,使得 EMCCD 图像的清晰度低于可见光图像。(3) 由于 EMCCD 具有倍增结构,噪声源中的部分噪声在信号倍增时也得到倍增大,使得 EMCCD 的图像比普通 CCD 的图像具有更多的噪声。

## 2 自适应模糊中值滤波算法

由中值滤波的工作原理可以知道,为了保护好图像的细节信息,必须尽可能地采用小窗口进行滤波处理,这是因为滤波窗口中与中心点距离越近的邻域像素点与中心点的相似性也就越大,随着窗口变大,滤波窗口内与中心点像素相似性较小的点就越多,最终导致输出灰度与原来的灰度相差较大,从而破坏了图像的细节。

对图像进行滤波处理,首先要判断出噪声的位置,然后再进行滤波处理。通常噪声是伴随着信号的存在而存在的,这也就增大了对噪声位置判定的难度。自适应中值滤波算法对图像中噪声点的判定依据是滤波窗口的中值或中心点的灰度值是否为滤波窗口中的最小或最大值,如果该点为噪声,然后用滤波窗口中的中值来替换当前点。仅依据该点灰度值是否为滤波窗口中的最小或者最大值就判定该点为噪声点,这样就会把灰度值为滤波窗口中最小或最大值的非噪声点错误地当作噪声点来处理,这在噪声密度较大或者微光图像中误判的概率会很大。

为了更好地保持图像细节、减少噪声点的误判,应尽可能地使用小窗口进行滤波,并根据滤波窗口中非噪声点的数量来判断是否要增大滤波窗口,同时对判定为噪声点的信号引入滤波系数,即模糊隶属函数。基于此原则,提出了一种改进的自适应中值滤波算法,即自适应模糊中值滤波算法。该算法由模糊滤波和自适应模块两部分组成。

### 2.1 模糊滤波

EMCCD 图像中的噪声为加性噪声,图像中噪声点的灰度值将非常接近 0 或者 255,故通常将噪声点的灰度值设为 0 和 255。在滤波窗口大小为  $(2k+1) \times (2k+1)$ ,设中心点像素灰度为  $g(i,j)$ 。通常情况下,仅将  $g(i,j)$  与 0 或 255 比较,来进行噪声判定,若  $g(i,j)$  等于其中之一,判定  $g(i,j)$  为噪声点。这种判定方法有时也会将真实像素判定为噪声像素,为减少误判的发生,先引入模糊推理<sup>[6-7]</sup>的概念。定义变量:

$$h(i+m,j+n)=|g(i+m,j+n)-g(i,j)| \quad (1)$$

其中,  $\{(m,n) \in [-k,k], \text{且不同时为 } 0\}$ ,则  $h(i+m,j+n)$  代表  $g(i,j)$  与邻域像素点灰度值  $g(i+m,j+n)$  的灰度差。定义:

$$H(i, j) = \max\{h(i+m, j+n)\} \quad (2)$$

则  $g(i, j)$  是噪声像素点的概率与  $H(i, j)$  的大小成正比, 即  $H(i, j)$  越大, 更接近于噪声像素; 反之  $g(i, j)$  更接近于原始像素。由于不能准确地界定  $g(i, j)$  是否为噪声点, 采用线性模糊加权的方法来估计原始图像的像素值。即:

$$y(i, j) = (1 - t_{i,j})g(i, j) + t_{i,j}z_{med} \quad (3)$$

式中:  $y(i, j)$  表示滤波后像素点的灰度值;  $z_{med}$  为当前滤波窗口灰度值的中值,  $t_{i,j}$  定义为像素点  $g(i, j)$  的模糊隶属函数,  $t_{i,j}$  越大, 则  $g(i, j)$  为噪声像素的可能性就越大。当  $t_{i,j}=0$  时, 判定当前像素为真实值, 不做滤波处理。当  $t_{i,j}=1$  时, 判定其为噪声像素, 输出邻域中值替换。  $t_{i,j}$  介于 0 和 1 之间时, 采取折中的方法, 通过线性加权得出估计值。

采用  $H(i, j)$  的单增线性函数表示  $t_{i,j}$ , 则根据上述描述定义  $t_{i,j}$  如下:

$$t_{i,j} = \begin{cases} 0, & H(i, j) < T1 \\ \frac{H(i, j) - T1}{T2 - T1}, & T1 \leq H(i, j) \leq T2 \\ 1, & H(i, j) > T2 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T1, T2$  为设定的阈值。如图 1 所示,  $(0 \sim T1)$  为不需要滤波的区域, 输出原始像素值;  $(T1 \sim T2)$  为模糊加权区域, 输出为原始像素和中值的加权;  $(T2 \sim 255)$  为中值滤波区, 输出为邻域中值。

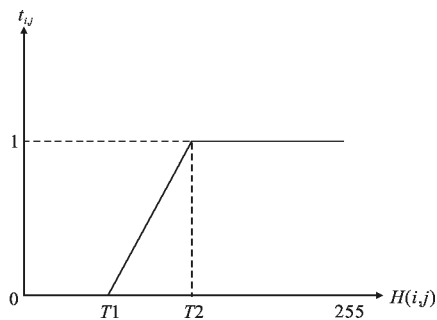


图 1 模糊集合  
Fig.1 Fuzzy sets

模糊阈值算法理论而言在图像边缘处有较好的滤波效果, 接下来举例分析该滤波器对图像的处理效果。考虑文中滤波方法对灰度平坦区域的处理效果, 对如图 2(a)所示的  $3 \times 3$  平坦区域, 中心点像素对应的  $H(i, j)$  都大, 可以判定其为噪声点, 用邻域中值替换当前像素点, 其结果与用中值滤波处理所得结

果相同。如图 2(b)中邻域像素点灰度与中心点一样取极值(0 或 255), 图像在中心点处沿垂直方向存在一条明显的灰度突变线, 可认定其为图像中景物的边缘。中值滤波方法判别该点为噪声点, 中值滤波输出结果明显与边缘上其他像素点的灰度值不同, 图像边缘信息被模糊。但采用模糊中值滤波法进行滤波处理时, 得到  $H(i, j)$  显然较小, 由此可以判定其为真实像素点, 因而不进行滤波, 边缘模糊得以避免。从此例可以看出, 模糊中值滤波在边缘的处理上明显优于传统中值滤波方法。

119	129	129
235	255	135
255	143	142

18	16	13
23	0	7
33	4	22

(a) (b)  
图 2 含噪声的  $3 \times 3$  滤波区域各像素点灰度值  
Fig.2 Gray of pixel in  $3 \times 3$  filter with noise

## 2.2 自适应模块

为了保持图像的细节, 先对当前像素点进行处理, 即判断是否为噪声, 如果不是噪声则输出不变, 否则利用上文提到模糊隶属函数对噪声点进行滤波处理后再输出。然后基于滤波窗口中像素灰度值的极值特性, 当某点的灰度值为极值时, 则此点极有可能是噪声像素点。依据中值滤波算法, 应取邻域中值代替该点像素值。但中值也有可能为噪声点, 故首先对中值进行判断, 若其不为极值是时, 用中值代替, 若其恰好为极值时, 扩大滤波窗口再次探测, 以减小误判。

根据上述分析, 采取自适应算法对传统中值滤波算法改进<sup>[9-10]</sup>。根据窗口的中值判断当前区域的受污染程度, 进而改变滤波窗口的大小, 即文中算法的自适应模块。

实验采用的自适应滤波算法工作在两个层面, 用 Level A 和 Level B 表示。

Level A: 若  $z_{min} < z_{med} < z_{max}$ , 则转向 Level B, 否则增加窗口尺寸  $M$ , 若窗口尺寸小于等于  $M_{max}$ , 重复 Level A, 否则输出  $z_{med}$ ;

Level B: 若  $z_{min} < g(i, j) < z_{max}$ , 则输出  $g(i, j)$ , 否则

输出  $z_{med}$ 。式中,  $z_{min}, z_{max}, z_{med}$  分别代表当前滤波窗口  $w \times w$  中像素点灰度值的最小值, 最大值和中值;  $w_{max}$  为预设的自适应窗口的最大尺寸;  $g(i, j)$  为当前像素点的灰度值。

上述算法仅对窗口中最大最小值的像素点进行中值替换, 当邻域中值为极大或极小值时, 通过增加窗口的尺寸再进行判定, 对未受污染图像进行了较好的保护, 可以有效地提升滤波效果。

### 3 滤波算法流程

根据提出的两个模块, 用算法实现滤波流程如下: 当  $g(i, j)$  为非噪声像素时, 不对其进行滤波, 当  $g(i, j)$  判定为噪声时, 通过模糊隶属函数对输出进行模糊加权, 然后自适应调整滤波窗口。以下为自适应模糊中值滤波的算法流程:

(1) 滤波窗口  $S$  初始大小为  $w=3$ , 并设窗口最大值  $w_{max}=7$ 。

(2) 判断  $g(i, j)$  是否为噪声, 若不是噪声则保持输出不变, 即  $u_{i,j}=g(i, j)$ ; 否则利用模糊隶属函数做滤波处理, 输出  $u_{i,j}=f \times S_{med}^{w \times w} + (1-f)g(i, j)$ 。

(3) 计算滤波窗口  $S$  中的最小、最大和中值  $S_{min}^{w \times w}, S_{max}^{w \times w}, S_{med}^{w \times w}$ , 判段  $S_{min}^{w \times w} < S_{max}^{w \times w} < S_{med}^{w \times w}$  是否成立, 若成立转(4), 否则转(5)。

(4) 判断  $S_{min}^{w \times w} < g(i, j) < S_{max}^{w \times w}$  是否成立, 若成立不作处理, 否则  $g(i, j)=S_{med}^{w \times w}$ 。

(5) 增大滤波窗口  $w=w+2$ , 若  $w \leq w_{max}$  则转(2), 否则  $g(i, j)=S_{med}^{w \times w}$ 。

### 4 仿真及实验结果分析

根据上述算法流程, 通过 MATLAB 仿真来验证 AFMF 的优越性。首先, 选取 8 灰度级的标准 Lena 图像, 加入密度为 0.5 的椒盐噪声来比较各滤波算法的效果。结果如图 3 所示, 图 3 中(a)~(e)分别为原始图像, 加入 0.5 椒盐噪声的图像, 自适应滤波器<sup>[10]</sup> (AMF)输出, Kenny<sup>[7]</sup>提出的噪声自适应模糊阈值开关滤波算法(NAFSW)输出及自适应模糊阈值滤波器 (AFMF)的输出。其中, 自适应滤波器窗口初值为  $3 \times 3$ , 最大滤波窗口为  $7 \times 7$ , 模糊阈值为  $T1=10, T2=30$ <sup>[6]</sup>。从图 3 可以看出, AMF, NAFSW 和 AFMF 滤波后图

像质量都得到提升。对比图像的边缘细节和滤波图像中的颗粒大小可以看出, AFMF 滤波后得到的图像在细节及颗粒大小方均优于前两者, 故而验证了 AFMF 的优越性。



图 3 不同算法的滤波效果

Fig.3 Filtering result of various algorithms

为了更客观更精确地对比各种算法的性能, 采用峰值信噪比 (PSNR) 进一步描述处理效果。PSNR 定义为:

$$PSNR = 10 \times \lg \left( \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \right) \quad (5)$$

式中:  $n$  为每个像素点采样值的比特数;  $MSE$  为图像的均方误差, 其定义为:

$$MSE = \frac{\sum_{n=1}^{Framesize} (I^n - P^n)^2}{Framesize} \quad (6)$$

式中:  $I, P$  分别为处理前后的灰度值;  $Framesize$  表示图像像素的个数。PSNR 越大, 表示处理后的图像失真越小, 即滤波效果越好; 反之, 滤波效果越差。分别用 PSNR 表示各种滤波器对噪声的滤除效果。

图 4 为含有不同椒盐噪声密度的 Lena 图像各滤波算法滤波效果对比图。由图 4 中曲线可知, AFMF 在噪声密度较低时, 性能和 NAFSW 均衡, 但明显好于其自适应滤波器, 随着噪声密度的增加, 其性能也比较稳定, 并且好于另外两种滤波器。

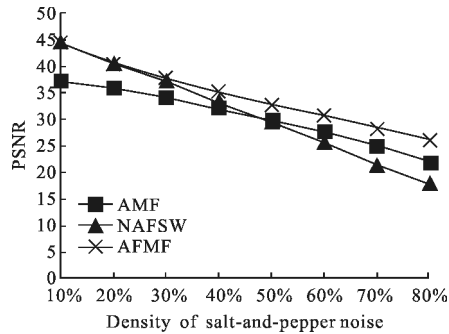


图 4 含有不同椒盐噪声密度“Lena”图像滤波效果对比

Fig.4 Simulation results of "Lena" image corrupted with different densities of salt-and-pepper noise

其次, 考虑 EMCCD 的增益对滤波性能的影响。采集增益  $G=100$  和  $G=200$  时的图像, 比较各滤波算法的滤波效果, 各滤波器参数同上, 结果如图 5 和图 6 所示。图 (a)~(d) 分别为原图像、自适应中值滤波噪声、自适应模糊阈值开关滤波、自适应模糊阈值滤波滤波结果。图 7 为不同增益时各滤波算法滤波效果对比图, 表 1 为图像信息熵对比。图像信息熵反映了图像中信息量的多少, 表示图像中灰度分布的聚集特征, 令  $p_i$  表示图像中灰度值为  $i$  的像素所占的比例, 则灰度图像的信息熵为:

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i \quad (7)$$

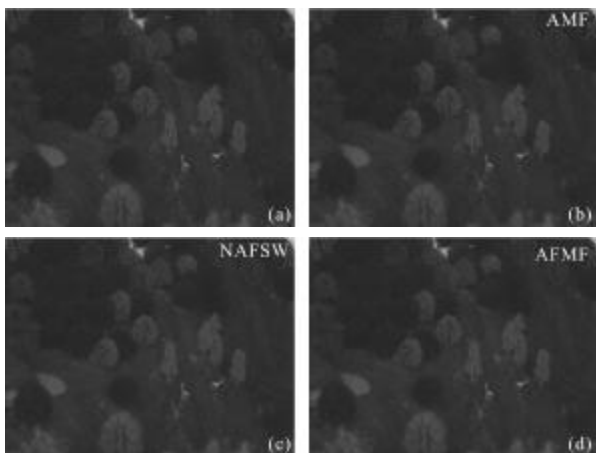


图 5 增益为 100 时的滤波结果

Fig.5 Filtering results with gain=100

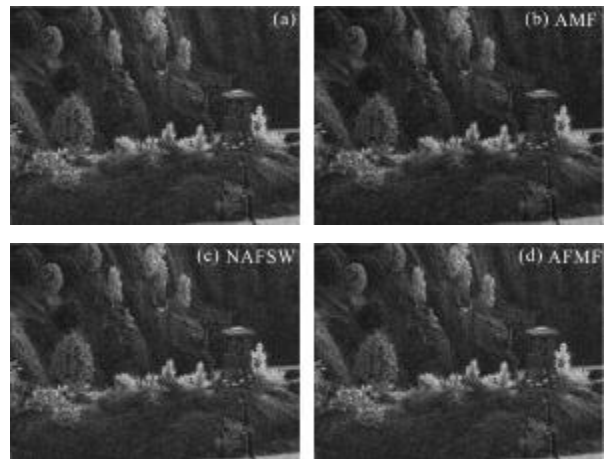


图 6 增益为 200 时的滤波结果

Fig.6 Filtering results with gain=200

图 7 中 AFMF 和 NAFSW 明显比 AMF 性能好, 并且 AFMF 比 NAFSW 也有所提高。由表 1 同样可以得出 AFMF 相对前两种滤波器性能的提升。

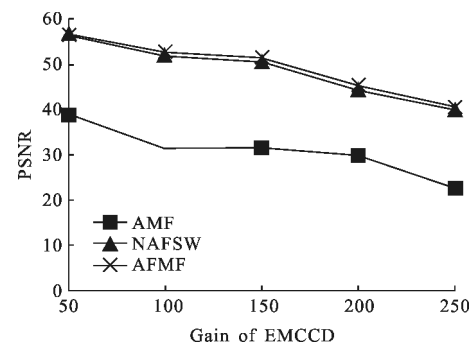


图 7 EMCCD 不同增益下滤波性能对比

Fig.7 Simulation results of EMCCD whit different gains

表 1 EMCCD 不同增益图像信息熵

Tab.1 Entropy of EMCCD with different gains

	AMF	NAFSW	AFMF
Gain=50	4.941 8	5.145 1	5.145 1
Gain=100	5.602 9	5.787 2	5.787 7
Gain=150	5.658 2	5.849 6	5.850 5
Gain=200	5.533 3	5.741 4	5.742 4
Gain=250	7.262 9	7.506 6	7.506 7

## 5 结 论

在自适应滤波器的基础上, 引入模糊隶属函数的概念, 提出一种自适应的模糊中值滤波算法, 既结合了自适应滤波器滤波窗口随窗口中污染程度变化的

特点,又通过添加模糊隶属函数的方法,通过模糊加权得到了对原始像素的更加准确的估计,因而滤波效果也有所提升。通过与 AMF 和 AFMF 对比,数值结果表明,AFMF 对不同噪声密度的标准“Lena”图像 PSNR 平均提高了 4 dB,而对不同增益的 EMCCD 图像则提高了 15 dB 以上。综上所述,AFMF 该方法在滤除噪声的同时,能更好地保护图像的细节和边缘。

#### 参考文献:

- [1] Zhao Gaochang, Zhang Lei, Wu Fengbo. Application of improved median filtering algorithm to image de-noising[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 4(32): 678-682.
- [2] Gou Zhongkui, Zhang Shaojun, Li Zhongfu, et al. New adaptive median filter algorithm based on extreme value[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 98-101. (in Chinese).
- [3] Ng P E, Ma K K. A switching median filter with boundary discriminative noise detection for extremely corrupted images [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2006, 15(6): 1506-1516.
- [4] Chen T, Hong Ren Wu. Adaptive impulse detection using center-weighted median filters [J]. *IEEE Signal Process, Letters*, 2001, 8(1): 1-3.
- [5] Farbiz F, Menhaj M B, Motamedi S A. A new fuzzy logic filter for image enhancement [J]. *IEEE Transaction on Sys Man Cybern*, 2000, 30(2): 110-119.
- [6] Russo F, Ramponi G. A fuzzy filter for images corrupted by impulse noise [J]. *IEEE Signal Process Letters*, 1996, 3(6): 168-170.
- [7] Kenny Kal Vin Toh, Nor Ashidi Mat Isa. Noise adaptive fuzzy switching median filter for salt-and-pepper noise reduction [J]. *IEEE Signal Process Letters*, 2010, 3(17): 281-284.
- [8] Zou Pan, Liu Hui, Zhang Wenwen, et al. Parameter estimation of noise distribution model of EMCCD based on the expectation-maximization method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 268-272. (in Chinese).
- [9] Zhang Xuming, Xiong Youlun. Impulse noise removal using directional difference based noise detector and adaptive weighted mean filter[J]. *IEEE Signal Process Letters*, 2009, 16(4): 295-298.
- [10] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002: 352-356.