包装印刷

顾及边缘信息的多尺度误差扩散半色调算法

易尧华，刘磊，刘菊华，梁正宇
（武汉大学，武汉 430079）

摘要：目的 为了解决传统多尺度误差扩散半色调算法会导致半色调结果图像阶调变暗和边缘模糊的问题，提出一种顾及边缘信息的多尺度误差扩散半色调算法。**方法** 根据当前像素邻域内像素点的处理状态，设计动态非时序误差扩散滤波器；利用图像局部平均灰度与空间变化率提取图像边缘信息，结合图像边缘信息与灰度信息确定半色调处理顺序。**结果** 半色调处理结果视觉效果均匀，阶调信息和边缘结构信息与原图像一致性良好，峰值信噪比、加权信噪比和结构相似度分别提高了 0.7~1.2 dB, 0.9~1.5 dB，0.11~0.18。**结论** 该算法解决了多尺度误差扩散算法的图像阶调变暗和边缘模糊的问题，有效提高了半色调输出质量。

关键词： 多尺度；误差扩散；半色调；动态非时序滤波器；边缘信息
中图分类号： TP391 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2017)23-0192-07

Multi-scale Error Diffusion Halftone Algorithm Considering Edge Information

YI Yao-hua, *LIU Lei*, *LIU Ju-hua*, *LIANG Zheng-yu*
(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward a multi-scale error diffusion halftone algorithm considering edge information, in order to solve the problems of tone darkening and edge blurring of the resulting halftone image caused by the traditional multi-scale error diffusion halftone algorithm. Firstly, a dynamic non-causal error diffusion filter was designed according to the states of the pixel points in the neighborhood of the pixel being processed currently. Then, the image edge information was extracted by means of the local average gray scale and spatial change rate of the image. Finally, the halftone processing sequence was determined by combining the edge and gray scale information. The visual effect of halftone processing results was uniform. The tone and edge structure information was well consistent with the original image. PSNR, WSNR and SSIM were respectively improved by 0.7-1.2 dB, 0.9-1.5 dB and 0.11-0.18. The proposed algorithm solves the problems of tone darkening and edge blurring of the multi-scale error diffusion algorithm, thus effectively improving the halftone output quality.

KEY WORDS: multi-scale; error diffusion; halftone; dynamic non-causal filter; edge information

由于图像输出设备（如印刷机、打印机等）通常为二值设备[1]，进行图像输出时需要对连续调图像进行半色调处理，将连续调图像转换为半色调二值图像[2—3]。调频半色调方法是将大小相同的记录网点以尽可能随机的方式排列，通过改变单位面积内网点的数量来反映图像阶调。经典的调频半色调算法是由 Floyd 和 Steinberg 提出的误差扩散算法[4]，该算法以其优良的半色调成像质量成为目前最流行的半色调处理算法之一。经典误差扩散算法采用时序误差扩散滤波器，按照固定顺序扫描图像像素进行量化，量化误差只能向固定方向扩散，不考虑图像的内容信息，只保证半色调图像与原始图像的平均灰度一致，因此

收稿日期： 2017-05-22
基金项目： 国家自然科学基金（61601335）；国家科技支撑计划（2013BAH03B01）；国家测绘地理信息局卫星测绘技术与应用重点实验室经费资助项目（KLSMTA-2016-04）；中国博士后科学基金（2015M582277）；中央高校基本科研业务费专项基金（2042015kf0059）
作者简介： 易尧华（1976—），男，博士，武汉大学教授、博导，主要研究方向为彩色数字成像技术。

很容易造成半色调输出结果边缘退化，出现方向性纹理，伪轮廓与蠕虫等问题。

针对以上问题，Jarvis, Stevenson, Arce[5]与Stucki[6]等通过扩大滤波器的扩散范围来消除蠕虫现象的影响。Ulichney[2], Zhang[7]与 Asano[8]相继提出“蛇”形扫描法、Hilbert 曲线扫描法与 Sierpinsky 曲线扫描法，通过改变图像像素的处理顺序，在一定程度上减少了方向性纹理，但仍无法消除由时序误差扩散滤波器带来的伪轮廓问题。Eschbach R[9]提出了参数控制的边缘增强误差扩散算法。Kwak N J[10]在此基础上提出基于人眼视觉系统特性的边缘增强方法，在一定程度上强化了图像的边缘信息。Ioannis Katsavounidis 提出多尺度误差扩散半色调算法（MED）[11—12]，该算法不指定扫描顺序，而是根据图像像素点的灰度值来确定半色调处理顺序，同时采用非时序误差扩散滤波器，在一定程度上缓解了方向性纹理和伪轮廓的产生。Fung Y H 等[13—15]在该算法基础上，通过判断图像中少数点类型以强化图像边缘，提高算法效率，但仍然存在半色调图像视觉效果不均匀、图像阶调变暗与图像边缘模糊等问题。

文中在多尺度误差扩散半色调算法的基础上，设计动态非时序误差扩散滤波器，扩大误差扩散范围，防止误差泄漏，同时受 Kwak N J 启发，根据人眼系统的特性，利用图像的局部平均灰度和空间变化率提取图像的边缘信息，结合图像边缘信息与灰度信息确定半色调处理顺序，有效地解决了多尺度误差扩散半色调算法存在的半色调图像阶调变暗与边缘模糊等不足。

1　多尺度误差扩散半色调算法

多尺度误差扩散半色调算法基本原理是：首先将半色调输出结果设为全黑，然后根据连续调图像建立图像四叉树，从低分辨率尺度向高分辨尺度搜索图像中灰度最大的像素点，将半色调图像中的该点设置为白点，并进行误差扩散，迭代执行该过程，直至半色调图像与连续调图像的平均灰度相等。

该算法主要分为 5 个步骤。

1）初始化半色调图像为全黑，即像素值全部设为 0。

2）建立图像四叉树，得到不同分辨率尺度下的图像 X_k。

$$X_k(i_k,j_k)=\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1}X_{k+1}(2i_k+i,2j_k+j)$$
$$i_k,j_k=0,1\cdots 2k-1;k=r-1,r-2\cdots 0 \tag{1}$$

式中：X_r 为原始连续调图像；X_0 为最低分辨率尺度图像，只有一个像素，其值为整幅图像的灰度值总和，控制半色调输出图像中白点总个数（N_{DotNum}）。

3）从第 2 层图像 X_1 中搜索灰度值最大的像素点，然后找出该点对应下一层图像区域中灰度值最大的像素点。依次进行搜索，得到原始图像 X_r 的像素点 (i_k,j_k)，并将半色调图像中该点对应的像素点设置为白，即像素值设为 1，同时 N_{DotNum} 减少 1。若 N_{DotNum} 小于 0.5，则停止搜索，得到最终的半色调结果，否则进行步骤 4）和 5）。

4）计算原始图像 X_r 的像素点（i_k,j_k）的量化误差，利用式（2）所示的非时序误差扩散滤波器将误差扩散至邻域像素。

$$F=\frac{1}{12}\begin{bmatrix}1 & 2 & 1\\ 2 & x & 2\\ 1 & 2 & 1\end{bmatrix} \tag{2}$$

5）将 X_r（i_k,j_k）的灰度值设置为 0，同时更新图像四叉树，返回执行步骤 3）。

多尺度误差扩散半色调算法与经典误差扩散半色调算法及其改进相比，根据图像的灰度信息确定半色调处理顺序，利用非时序误差扩散滤波器将误差扩散至当前像素的 8 邻域，可以在一定程度上缓解方向性纹理、伪轮廓与蠕虫现象等问题，但是由于多尺度误差扩散半色调算法在执行过程中存在误差泄露和只根据图像的灰度信息确定半色调顺序等问题，导致半色调图像视觉效果不均匀、图像阶调变暗与图像边缘模糊，因此该算法仍有待改进。

2　顾及边缘信息的多尺度误差扩散半色调算法

根据分析，文中针对多尺度误差扩散半色调算法存在的缺陷，从误差扩散滤波器与半色调处理顺序 2 个方面进行改进：设计动态非时序误差扩散滤波器与结合图像边缘信息与灰度信息确定半色调处理顺序，并将这 2 个改进相结合，提出顾及边缘信息的多尺度误差扩散半色调算法。

2.1　动态非时序误差扩散滤波器

多尺度误差扩散半色调算法采用式（2）所示的非时序误差滤波器，该误差扩散滤波器的范围较小，因此容易导致半色调图像视觉效果不均匀。同时，由于该误差扩散滤波器并没有考虑到其邻域像素点可能存在已经被处理的情形，若将量化误差扩散到已处理过的像素点，当该扩散误差积累到一定值时，已经处理过的像素点会再一次被设置为白点，导致半色调图像中白点总数减少，从而降低图像平均灰度，最终得到的半色调图像阶调变暗。

针对以上缺陷，文中根据当前处理像素点邻域内像素点的处理状态，设计了 5×5 的动态非时序误差扩散滤波器。因为图像中像素点对其邻域内像素点的影

响呈高斯分布，与该像素点的欧式距离越近，影响越大，反之则越小。同时，由于人类视觉对水平和垂直方向上信息的敏感程度大于对角线方向的敏感程度，为了尽量保证半色调图像在水平和垂直方向上与原始图像的一致性，将水平和垂直方向上的误差扩散系数向上微调，使其大于对角线方向上的误差扩散系数，因此文中设计初始滤波器见式（3），其中 $N(i,j)$ 为当前处理像素点 $P(i,j)$ 的 5×5 邻域区域内对应的扩散系数总和。$N(i,j)$ 的计算公式为式（4），$C(i,j)$ 为滤波器对应位置的系数，如果某点为已处理点，则将该系数 C 设置为 0，否则为初始滤波器中对应位置的系数，于此同时按照式（4）动态地更新 N，从而动态更新误差扩散滤波器 F，达到最终解决半色调图像阶调变暗的问题。将滤波器的大小从 3×3 扩大至 5×5，可以将误差扩散至距离当前处理像素点更远的区域，保证半色调图像在更大局部区域内平均灰度与原始图像一致，有效解决半色调图像视觉效果不均匀的问题。

$$F=\frac{1}{N(i,j)}\begin{bmatrix}1&4&7&4&1\\4&16&26&16&4\\7&26&P(i,j)&26&7\\4&16&26&16&4\\1&4&7&4&1\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$N(i,j)=\sum_{m=-2}^{2}\sum_{n=-2}^{2}C(i+m,j+n) \tag{4}$$

2.2 结合图像边缘信息与灰度信息确定半色调处理顺序

由于人眼不仅对图像本身的灰度信息敏感，对图像边缘信息也同样敏感，然而多尺度误差扩散半色调算法在确定半色调处理顺序时，只利用图像灰度信息，而忽略图像本身的边缘结构信息，因此很容易造成半色调图像边缘模糊。针对这个问题，该算法利用图像的局部平均灰度和空间变化率提取图像边缘信息，然后结合图像边缘与灰度信息确定半色调处理顺序，以保持原始图像的边缘结构信息。

利用图像局部平均灰度与空间变化率提取图像边缘信息的步骤如下所述。

1）首先求得图像 3×3 邻域的平均灰度，见式（5）。

$$\overline{X}(i,j)=\frac{1}{3\times3}\sum_{k=-1}^{1}\sum_{l=-1}^{1}X(i+k,j+l) \tag{5}$$

2）计算像素空间局部变化率 $V(i,j)$，计算公式见式(6)，空间局部变化率 $V(i,j)$ 越大，说明该像素邻域区域内像素的一致性越差，表明该邻域为图像边缘像素区域或者纹理结构像素区域的可能性越大，反之则说明该区域为图像平滑区域的可能性越大。

$$V(i,j)=\sum_{k=-1}^{1}\sum_{l=-1}^{1}W(k,l)\times\left|X(i+k,j+l)-\overline{X}(i,j)\right| \tag{6}$$

式中：$W(k,l)$ 为空间权重函数，由于人眼在水平和垂直方向上的敏感度比在对角线上高，所以取对角线方向权重为 0.1035，水平、垂直方向权重为 0.1465[10]。

$$W(k,l)=\begin{bmatrix}0.1035&0.1465&0.1035\\0.1465&x&0.1465\\0.1035&0.1465&0.1035\end{bmatrix} \tag{7}$$

3）计算像素点与其邻域内像素点平均灰度的差异程度 $\Delta X(i,j)$，计算公式为式（8），差异程度体现了该像素点在局部区域内的显著程度，差异程度越大，则越像素点视觉效果越突出，为图像平滑区域像素可能性越小。

$$\Delta X(i,j)=\left|X(i,j)-\overline{X}(i,j)\right| \tag{8}$$

4）由于人眼观察到的图像边缘信息不仅与像素点在邻域内的空间变化率和其局部差异程度相关，还与邻域的平均灰度相关，在高亮度背景下对像素亮度偏差的辨别能力相比在低亮度区要强得多[16—17]，因此，定义图像的边缘信息 $E_{\text{edge}}(i,j)$见式（9）。

$$E_{\text{edge}}(i,j)=\alpha\times\overline{X}(i,j)\times V(i,j)\times\Delta X(i,j) \tag{9}$$

式中：α 为归一化参数；$E_{\text{edge}}(i,j)\in[0,1]$。

最后按照文中所设计的结合图像边缘与灰度信息来确定半色调处理顺序，通过式（10）来确定当前处理像素点 $L(i^*,j^*)$ 的位置。

$$L(i^*,j^*)=\arg\left[\max\left(\beta_1\times X(i,j)+\beta_2\times E_{\text{edge}}(i,j)\right)\right] \tag{10}$$

式中：β_1, β_2 为图像灰度与边缘信息的权重因子（$\beta_1+\beta_2=1$），文中取值为 $\beta_1=\beta_2=0.5$。

3 实验结果与分析

3.1 主观评价

采用 Floyd-Steinberg 滤波器（顺序扫描法和“蛇”形扫描法）和 Stucki 滤波器（顺序扫描法）的经典误差扩散半色调算法以及采用固定非时序滤波与动态非时序滤波器的多尺度误差扩散半色调算法对灰梯尺的半色调处理结果见图 1。图 1 中灰梯尺半色调结果的局部放大图（43%灰度级处）见图 2。由图 1b—d 和图 2a—c 可以看出经典误差扩散及其改进算法的半色调结果存在明显的规律性条纹。由从图 1e 和图 2d 可以看出传统多尺度误差扩散半色调算法虽然有效解决了规律性条纹的问题，但是存在视觉效果不均匀与图像阶调变暗等不足。文中设计的动态非时序滤波器（图 1f 和图 2e）可以有效解决视觉效果不均匀与图像阶调变暗的问题，半色调结果视觉效果较好。

采用 Floyd-Steinberg 误差扩散算法、文献[10]算法、多尺度误差扩散半色调算法、文献[14]算法与文中改进算法对测试图 Barbara 与测试图 Lena 进行半色

调处理的实验结果及其局部放大对比见图 3—4。从图 3b 和图 4b 中可以看到 Floyd-Steinberg 误差扩散算法导致半色调结果产生蠕虫和方向性纹理等问题，并且边缘信息的保持较差。文献[10]通过结合人眼视觉特性以调整误差扩散的输入，在一定程度上强化了图像的边缘结构信息，但是由于其仍然采用固定扫描顺序和非时序误差扩散滤波器，无法避免伪轮廓和方向性纹理等问题。

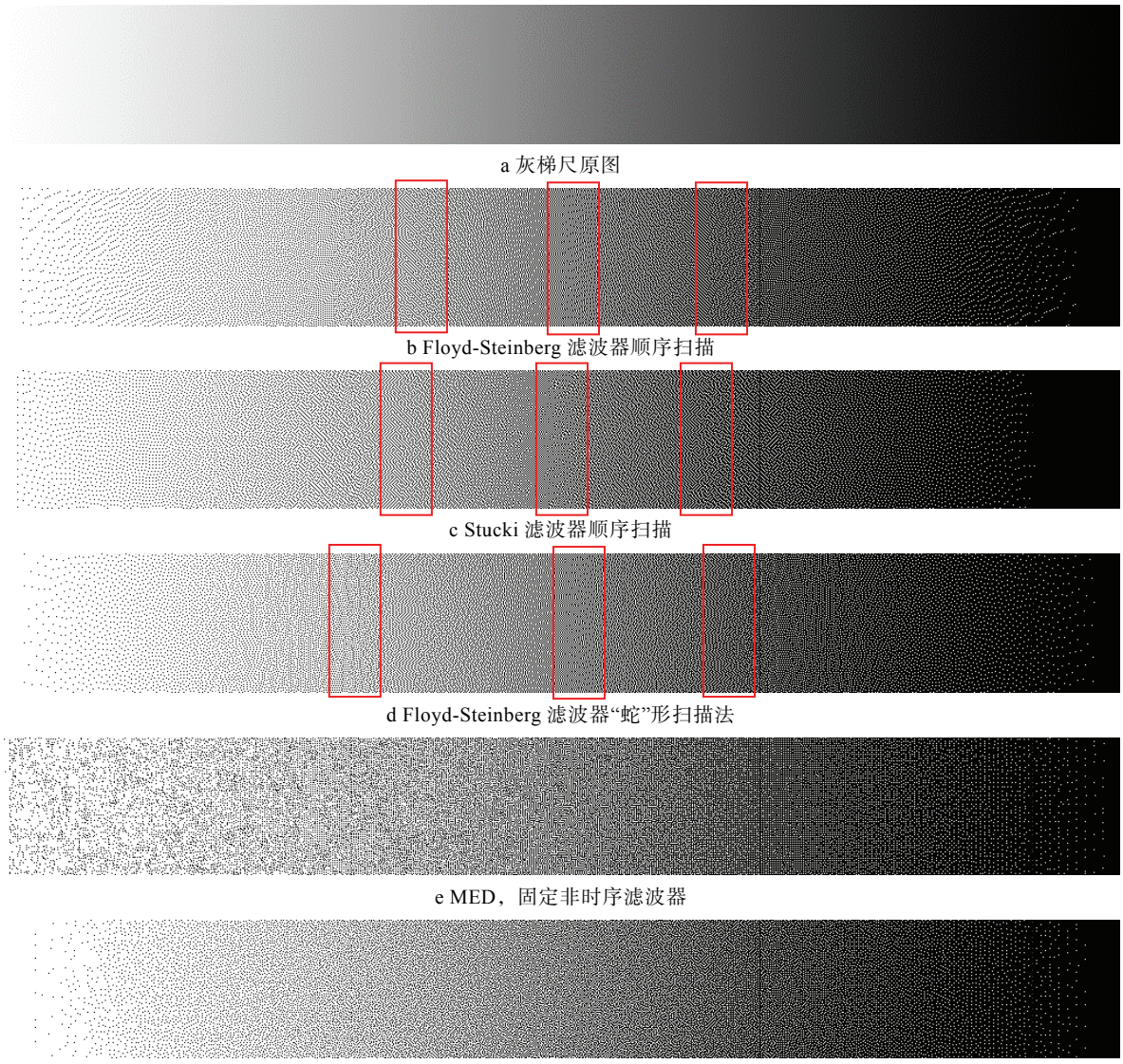


图 1　灰梯尺半色调结果比较

Fig.1 Comparison of gray scale halftone results

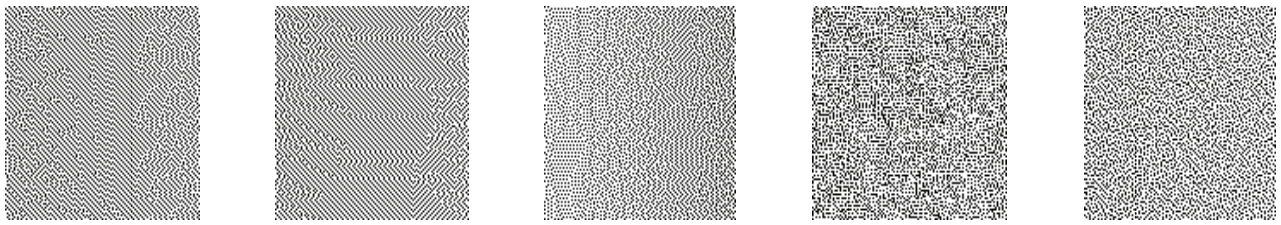


图 2　灰度级为 43%处的比较

Fig.2 Comparison at 43% gray scale



a 原图　b Floyd-Steinberg 算法　c 文献[10]算法　d 多尺度误差扩散算法　e 文献[14]算法　f 文中算法

图 3　测试图 Barbara 半色调结果比较

Fig.3 Comparison of Barbara halftone image



a 原图　b Floyd-Steinberg 算法　c 文献[10]算法　d 多尺度误差扩散算法　e 文献[14]算法　f 文中算法

图 4　测试图 Lena 半色调结果比较

Fig.4 Comparison of Lena halftone image

从图 3d 和图 4d 中可以看出，原多尺度误差扩散半色调算法解决了方向性纹理和伪轮廓的问题，但是半色调处理结果的图像边缘较为模糊，且图像阶调明显偏暗，图 3d 中丝巾部位的条形纹理几乎完全丢失，图 4d 中帽檐和眼睛部位明显变模糊。文献[14]针对图像中少数点对图像的结构信息的重要程度不同的特点，根据图像阶调信息动态选择少数点以增强图像边缘，从图 3e 和图 4e 可以看出，文献[14]对图像边缘的保持较原始算法有所提高。文中算法在多尺度误差扩散算法的基础上，通过设计动态非时序误差扩散滤波器可以有效的保证半色调图像的视觉均匀性，同时结合图像边缘与灰度信息来确定半色调处理顺序，使得半色调图像边缘结构与原图像边缘基本保持一致，而从图 3f 和图 4f 可以看出，文中算法很好地解决了多尺度误差扩散半色调算法存在的阶调变暗与边缘模糊问题。

3.2　客观评价

测试图 Barbara 和测试图 Lena 的半色调图像的客观评价结果比较见表 1—2，文中采用的图像质量的评价指标分别是峰值信噪比（PSNR）、加权信噪比（WSNR）和结构相似度（SSIM）[18]。

1）峰值信噪比。将原始图像视作信息，半色调图像与原始图像的差异视作噪声，峰值信噪比峰值信号能量与平均噪声能量的比值，计算公式见式(11)。

$$\mathrm{PSNR}=10\ln\left(\frac{255^2\times M\times N}{\sum_{i=0}^{M}\sum_{j=0}^{N}\left(f(i,j)-b(i,j)\right)^2}\right) \tag{11}$$

式中：M 和 N 为图像的宽和高；f 和 b 分别为原始图像和半色调图像。PSNR 值越大表明半色调图像与原始图像越接近，半色调效果越好。

2）加权信噪比。加权信噪比为平均信号能量与平均噪声能量之比，衡量图像非线性失真以及噪声情况的一个量度，其计算公式见式（12）。

$$\mathrm{WSNR}=10\ln\left(\frac{\sum_{i=0}^{M}\sum_{j=0}^{N}\left|f(i,j)C(i,j)\right|^2}{\sum_{i=0}^{M}\sum_{j=0}^{N}\left|\left(f(i,j)-b(i,j)\right)C(i,j)\right|^2}\right) \tag{12}$$

式中：M 和 N 为图像的宽和高；f 和 b 分别为原始图像和半色调图像；C 为视觉敏感函数的离散傅里叶变换。WSNR 值越大，半色调图像与原始图像越接近。

3）结构相似度。基于结构相似度的评价方法根据人眼的视觉特点，综合原始图像与半色调图像的亮度相似度 l、对比度相似度 c 和结构相似度 s 这 3 个

指标。计算公式为：

$$l(f,b)=\frac{2\mu_f\mu_b+C_1}{\mu_f^2+\mu_b^2+C_1};$$

$$\mu_x=\frac{1}{MN}\sum_{i=0}^{M}\sum_{j=0}^{N}x(i,j),\ x=\{f,b\} \tag{13}$$

$$c(f,b)=\frac{2\sigma_f\sigma_b+C_2}{\sigma_f^2+\sigma_b^2+C_2};$$

$$\sigma_x=\left(\frac{1}{(M-1)(N-1)}\sum_{i=0}^{M}\sum_{j=0}^{N}\left(x(i,j)-\mu_x\right)^2\right)^{\frac{1}{2}},\ x=\{f,b\} \tag{14}$$

$$s(f,b)=\frac{\sigma_{fb}+C_3}{\sigma_f\sigma_b+C_3};$$

$$\sigma_{fb}=\frac{1}{(M-1)(N-1)}\sum_{i=0}^{M}\sum_{j=0}^{N}\left(f(i,j)-\mu_f\right)\left(b(i,j)-\mu_b\right) \tag{15}$$

$$\mathrm{SSIM}(f,b)=\left[l(f,b)\right]^{\alpha}\cdot\left[c(f,b)\right]^{\beta}\cdot\left[s(f,b)\right]^{\gamma} \tag{16}$$

式中：M 和 N 为图像的宽和高；f 和 b 分别为原始图像和半色调图像；u_f 和 u_b 为图像的灰度值均值，反映了图像 f 和 b 的亮度信息；σ_f 和 σ_b 为图像的方差，反映了图像 f 和 b 的对比度信息，σ_{fb} 为图像 f 和 b 的相关系数，反映了图像结构信息的相似度；C_1, C_2 和 C_3 为接近于 0 的数，防止分母为 0 导致计算异常；α, β 和 γ 为权重因子，用于调整亮度，对比度和结构的权重。

在计算中，取 $\alpha=\beta=\gamma=1$, $C_1=(K_1L)^2$, $C_2=(K_2L)^2$, $C_3=C_2/2$, $K_1\ll1$ 且 $K_2\ll1$，L 为图像的动态范围，对于 8 位图像，L 取值为 255，则 SSIM 计算式（16）可化简为式（17）。

$$\mathrm{SSIM}(f,b)=\frac{\left(2\mu_f\mu_b+C_1\right)\left(2\sigma_f\sigma_b+C_2\right)}{\left(\mu_f^2+\mu_b^2+C_1\right)\left(\sigma_f^2+\sigma_b^2+C_2\right)} \tag{17}$$

SSIM 的取值范围为[0,1]，当 2 幅图像完全相同时，SSIM=1；SSIM 值越大，说明图像失真越小，半色调处理效果越好。从表 1 中客观评价指标来看，使用文中算法得到的半色调图像 PSNR, WSNR 和 SSIM 值最大，保持了原始图像的阶调和结构信息，与原始图像的相似度最高，半色调图像能最好地再现原始图像，客观评价结果与主观评价结果相一致，进一步说明文中所提出的算法改善了半色调图像的效果。

表 1　半色调图像客观质量评价结果

Tab.1 Objective quality assessment results of halftone image

测试图	评价指标	PSNR/dB	WSNR/dB	SSIM
Barbara	Floyd-Steinberg算法	6.7448	6.5697	0.3145
	文献[10]算法	6.8571	6.7950	0.3527
	MED	6.7131	6.4353	0.3013
	文献[14]算法	6.9045	6.9440	0.3536
	文中算法	7.6124	7.8173	0.4736
Lena	Floyd-Steinberg算法	7.0531	5.8423	0.2534
	文献[10]算法	7.3556	5.9761	0.3028
	MED	6.9854	5.7786	0.2674
	文献[14]算法	7.3633	6.0801	0.3294
	文中算法	8.1803	7.2849	0.4368

4　结语

为了解决多尺度误差扩散半色调算法所存在的问题，文中根据当前处理像素的邻域状态动态修正误差扩散滤波器的系数，设计动态非时序误差扩散滤波器，解决了多尺度误差扩散半色调算法存在的视觉效果不均匀与图像阶调变暗等问题。同时，利用图像的局部平均灰度和空间变化率提取图像边缘信息，结合图像的边缘结构与灰度信息确定半色调处理顺序，半色调结果图像结构边缘保持良好，有效地提高了半色调图像的输出质量。

参考文献：

[1] 易尧华, 苏海. 最优迟滞系数的自适应绿噪声半色调算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(9): 1104—1107.
YI Yao-hua, SU Hai. Adaptive Green Noise Halftoning Algorithm with Optimal Hysteresis Constant[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(9): 1104—1107.

[2] 姚海根, 程鹏飞. 数字半色调技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2013.
YAO Hai-gen, CHENG Peng-fei. Digital Halftoning Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2013.

[3] SU Hai, LIU Ju-hua, YI Yao-hua, et al. Optimal Parameters Based Stochastic Dot Model for Tone Compensation of Dither Matrix[J]. Neurocomputing, 2015, 187: 98—108.

[4] FLOYD R, STEINBERG L. An Adaptive Algorithm for Spatial Grayscale[J]. Proc Soc Image Display, 1976, 17(2): 75—77.

[5] STEVENSON R L. Inverse Halftoning Via MAP Estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(4): 574—583.

[6] 梁永峰. 一种改进的误差扩散算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
LIANG Yong-feng. An Improved Error Diffusion Algorithm[D]. Xi'an: XiDian University, 2013.

[7] LIU Ling-yue, CHEN Wei, WONG T T, et al. An Improved Parallel Contrast-aware Halftoning[J]. Journal of Zhejiang Universityence C, 2013, 14(12): 918—929.

[8] ASANO T, RANJAN D, THOMAS R. Digital Halftoning Algorithms Based on Optimization Criteria and Their Experimental Evaluation[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and

Computer Sciences, 1996, 79(4): 524—532.

[9] ESCHBACH R, KNOX K T. Error Diffusion Algorithm with Edge Enhancement[J]. JOSA A, 1991, 8(12): 1844—1850.

[10] KWAKN J, RYU S P, AHN J H. Edge-enhanced Error Diffusion Halftoning using Human Visual Properties [C]// Hybrid Information Technology, 2006 ICHIT' 06 International Conference on, IEEE, 2006, 1: 499—504.

[11] KATSAVOUNIDIS I, KUO C J. A Multiscale Error Diffusion Technique for Digital Halftoning[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(6): 483—490.

[12] SARAILIDIS G, KATSAVOUNIDIS I. A Multiscale Error Diffusion Technique for Digital Multi-toning[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(5): 2693—705.

[13] FUNG Y H, LUI K C, CHAN Y H. Low-complexity High-performance Multiscale Error Diffusion Technique for Digital Halftoning[J]. Journal of Electronic Imaging, 2007, 16(1): 10—12.

[14] FUNG Y H, CHAN Y H. Edge Preserving Multiscale Error Diffusion Algorithm for Green Noise Digital Halftoning[C]// 2010 17th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2010: 557—560.

[15] FUNG Y H, CHAN Y H. Optimizing the Error Diffusion Filter for Blue Noise Halftoning with Multiscale Error Diffusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 22(1): 413—417.

[16] 朱国庆, 李庆武, 林少飞. 基于人眼视觉特性的非下采样轮廓波变换域红外图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 49—54.
ZHU Guo-qing, LI Qing-wu, LIN Shao-fei. Infrared Image Enhancement Algorithm Based Human Visual System Characteristic Via Non-Subsampled Contourlet Transform Domain[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 49—54.

[17] 郑婷. 基于人眼视觉感知图像对比度增强算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
ZHEN Ting. Image Constrast Enhancement Algorithm Based on Human Visual Perception[J]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[18] 褚江, 陈强, 杨曦晨. 全参考图像质量评价综述[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1): 13—22.
CHU Jiang, CHEN Qiang, YANG Xi-chen. Review on Full Reference Image Quality Assessment Algorithms [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(1): 13—22.