

2 维加窗全相位图像滤波模板的设计

黄翔东 王兆华 李文元

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 为克服常用滤波模板的缺陷, 消除传统图像滤波中存在的振铃现象和方块效应, 提出了任意正交变换下的 2 维加窗全相位滤波算法。在严格证明任意正交变换下的 2 维全相位模板的计算通式基础上, 进一步推导出傅里叶变换下的加窗全相位模板的简化公式。通过对亚奈图像的恢复实验证明: 相比于反傅氏变换法生成的模板, 用全相位 DFT (discrete Fourier transform) 模板恢复出的图像 PSNR (峰值信噪比) 值要高出 7dB 以上, 且消除了振铃现象。通过实验还证明, 用全相位 DCT (discrete cosine transform) 模板滤波可完全消除传统分块滤波中的方块效应。

关键词 模板 2 维加窗全相位滤波 振铃现象 方块效应 任意正交变换

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)06-0811-07

Design of 2D All-phase Image Filtering Template with Window

HUANG Xiang-dong, WANG Zhao-hua, LI Wen-yuan

(School of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract To overcome commonly-used filtering template's drawback and remove the ringing artifact & block effect in conventional image filtering, this paper presents 2D all-phase window filtering under arbitrary orthogonal transform. Based on the general calculating formula of 2D all-phase template under arbitrary orthogonal transform, the concise formula of all-phase template with window under DFT is deduced. The restoration experiment on the sub-sampled image proves that: compared with the template constructed by IDFT, the PSNR of the image restored by all kinds of all-phase template is above 7dB higher and ringing artifact can be eliminated. Another experiment shows that block effect in conventional block filtering can be completely removed by employing 2D all-phase DCT template.

Keywords template, 2D all-phase filtering with window, ringing artifact, block artifact, arbitrary orthogonal transform

1 引言

传统图像滤波通常有两种方法: 空间域法和频率域法^[1]。空间域法可直接对像素值进行处理, 其典型的方式是模板滤波, 如用于平滑的 Box 模板和高斯模板^[2], 用于边缘检测的 Laplacian 模板等。这些模板的生成过程各有不同, 如 Box 模板是通过领域像素值简单平均而成^[2]; 高斯模板是通过 2 维高斯函数采样得到^[3]; 而 Laplacian 模板是由 2 阶差分算子形成^[3]。虽然它们形式简单, 使用起来方便快捷。但当实际图像滤波对频率特性提出更高要

求时, 这些模板因其尺寸太小, 难以满足需要。频率域法的基础是 2 维正交变换, 而任何正交变换都是有限变换, 因而必须对图像进行分块。其最为典型的应用就是各种图像与视频压缩标准的滤波: 如 JPEG、H. 261 及 MPEG-2 等, 都是把图像分成 8×8 的子块进行 DCT (discrete cosine transform) 变换, 通过对系数值小的系数进行较粗量化而剔除高频系数 (这实际是个低通处理), 再反变换回像素域形成滤波输出。这样恢复的图像会沿方块边界出现可视的伪边缘, 称为“方块效应”^[4]。

本文提出 2 维全相位滤波^[5] 兼顾了两种传统滤波优点, 表现在: 它是从频域直接设计, 物理意义明

收稿日期: 2005-05-30; 改回日期: 2005-09-02

第一作者简介: 黄翔东 (1979 -), 男, 天津大学在读博士研究生。主要研究方向为数字图像处理及数字滤波器设计。E-mail: laohuang0423@eyou.com

确;它可把部分常用模板的构造统一起来,而且滤波可等效为像素域的模板卷积;另外,滤波性能还可通过加窗来得到改善,因而具有较高的应用前景。

2 两种传统滤波模式

2.1 由傅氏反变换法生成模板滤波

为在像素域进行滤波,一种直接方法就是构造频域特性矩阵 H , 并对其进行傅氏反变换, 即可形成滤波模板。如设计一 5 阶滤波模板, 令:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

显然 H 满足线性相位条件:

$$H_{u,v} = H_{N-u,N-v}, \quad u, v = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

对 H 进行 IDFT 并进行中心移位得到如下模板

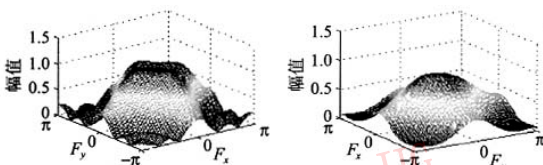
$$h = \begin{bmatrix} -0.0124 & -0.0400 & 0.0429 & -0.0400 & -0.0124 \\ -0.0400 & 0.0324 & 0.1771 & 0.0324 & -0.0400 \\ 0.0429 & 0.1771 & 0.3600 & 0.1771 & 0.0429 \\ -0.0400 & 0.0324 & 0.1771 & 0.0324 & -0.0400 \\ -0.0124 & -0.0400 & 0.0429 & -0.0400 & -0.0124 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其频率响应为

$$H_{u,v} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-M}^M h_{m,n} e^{-j(mu+nv)} \quad (4)$$

$$M = \frac{N-1}{2} \quad -\pi \leq u, v \leq \pi$$

则其 2 维传递函数的曲面如图 1(a) 所示, 可以看出: 该曲面的通带和阻带都有较大的起伏 (即容易使恢复的图像产生振铃现象)。为获得平坦特性, 可通过加窗处理改善, 加 2 维三角窗后其传递函数曲面如图 1(b) 所示, 可以看出, 曲面虽然变平坦, 但



(a) 不加窗模板曲面 (b) 加 2 维三角窗模板曲面

图 1 直接傅氏反变换生成的传输特性曲面

Fig. 1 Transfer surface of the template constructed by direct IDFT

过渡带增大。

2.2 正交变换域里的分块滤波方法

基于正交变换的滤波^[6]模式如下:

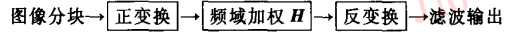


图 2 正交变换滤波模式

Fig. 2 Filtering mode based on orthogonal transform

各种视频压缩标准中基本都采用这种滤波模式^[7]。这种滤波是在频率域进行, 可方便地通过改变频域特性矩阵 H 来调整滤波特性, 物理意义明确, 其缺陷在于图像分块的机械性, 由于强制对图像数据进行截短, 使得各子块的 2 维频谱不能完全反映原始局部图像的真实频谱, 会引起频谱泄漏, 因而滤波后的图像在块与块的边界处产生“方块效应”。

3 2 维全相位滤波的数据处理流程

将正交变换滤波法通过重叠方式来进行是改善滤波的有效途径^[8]。通过改变图 2 的图像分块方式, 可形成一种性能较好的“2 维全相位滤波法”。

为消除方块效应, 对某像素点滤波时, 可将包含该像素的所有方块全部考虑。很明显, 若各方块大小为 $N \times N$ 时, 则包含该像素点的方块共有 N^2 个, 这样该像素点将遍历方块所有位置, 即遍历了所有相位, 故称全相位滤波。简单以 $N=2$ 为例, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 包含滤波点 a_{11} 的方块共有 4 个: $A^{(0,0)}, A^{(0,1)}, A^{(1,0)}, A^{(1,1)}$, 对这 4 个块分别按图 2 的滤波模式处理, 则会形成 4 个对应 a_{11} 的输出: $d_{00}^{(00)}, d_{01}^{(01)}, d_{10}^{(10)}, d_{11}^{(11)}$, 取其平均即可得全相位滤波输出 d 。

另外, 还可以看出: 为实现 $N \times N$ 阶的全相位滤波, 需要用到 $(2N-1)^2$ 个数据, 而图 2 的块处理方法只用到块内的 N^2 个数据, 因此全相位方法充分利用了相邻块之间的像素相关性, 滤波性能必然更好。

需指出的是, 图 3 的方法计算效率并不高, 在反变换后的各个块 $D^{(00)}, D^{(01)}, D^{(10)}, D^{(11)}$ 中, 生成了 $(N-1) \times N$ 个除 $d_{00}^{(00)}, d_{01}^{(01)}, d_{10}^{(10)}, d_{11}^{(11)}$ 外的无用数据。故需寻求减少计算量的途径, 构造 2 维全相位滤波模板可解决此问题。

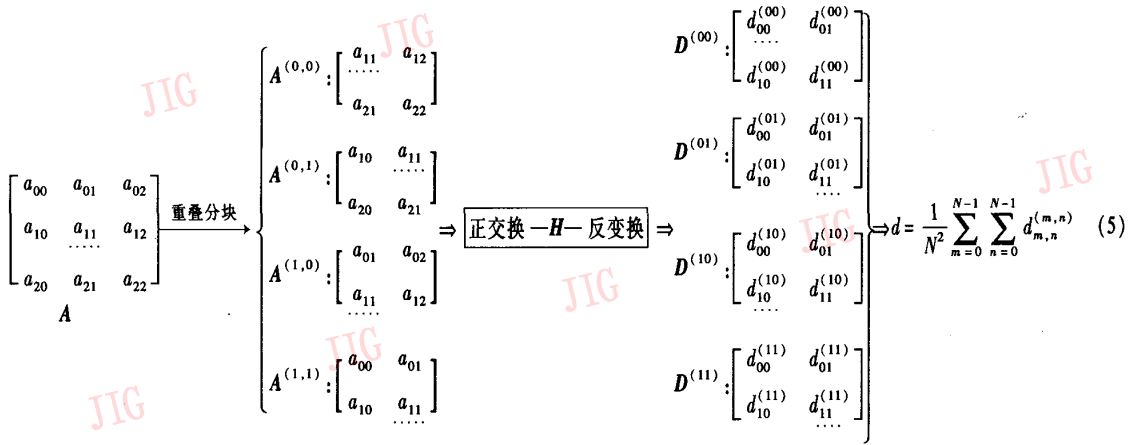


图3 全相位的2维滤波过程(N=2)

Fig.3 2D all-phase filtering process(N=2)

4 2维全相位滤波模板的构造

4.1 无窗全相位滤波模板的设计

先研究一 $N \times N$ 的像素块 A 经过正变换— H —反变换的数据处理后变为数据块 D 的过程。假设正变换矩阵为 α , 反变换矩阵为 β , B 为正变换后的谱矩阵, C 为已滤波的谱矩阵^[9]。则有

$$B = \alpha A \alpha^T \quad (6)$$

$$C = B \otimes H \quad (7)$$

$$D = \beta C \beta^T \quad (8)$$

符号 ' \otimes ' 表示两矩阵对应元素相乘。式(6)~(8)的时域表示为

$$b_{mn} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \alpha_{mk} \alpha_{kl} \alpha_{ln}^T \quad (9)$$

$$c_{mn} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \alpha_{mk} \alpha_{kl} \alpha_{ln}^T H_{mn} \quad (10)$$

$$d_{ij} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \alpha_{kl} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} \beta_{im} \alpha_{mk} \cdot H_{mn} \cdot \alpha_{ln}^T \beta_{nj}^T \quad (11)$$

令:

$$X_{kl}^{ij} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_{im} \alpha_{mk} H_{mn} \alpha_{ln}^T \beta_{nj}^T \quad (12)$$

则有

$$d_{ij} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X_{kl}^{ij} A_{kl} \quad (13)$$

$i, j = 0, \dots, N-1$

式(12)中的 X 为一个4维数组, 它由 N^2 个2维矩阵构成, X_{kl}^{ij} 的上标表示2维矩阵的编号, 下标表示矩阵内部元素的行列标号。

再研究 $(2N-1) \times (2N-1)$ 的数据块在中心元

素 a_{xy} 处的滤波值, 如图4所示, 可重叠地将数据分为 N^2 个块: $A^{(0,0)}, \dots, A^{(m,n)}, \dots, A^{(N-1,N-1)}$ 。注意: 在任意块 $A^{(m,n)}$ 中, a_{xy} 出现的位置与其块的标志符号相同, 故块 $A^{(0,0)}$ 出现在图4的右下方:

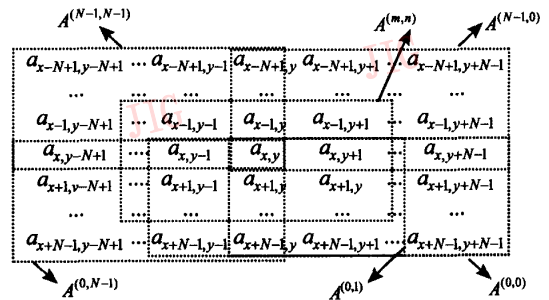


图4 $(2N-1) \times (2N-1)$ 输入数据及其分块示意图

Fig.4 Sub-blocks of $(2N-1) \times (2N-1)$ input data

根据式(13), 其中, 块 $A^{(m,n)}$ 对 a_{xy} 的滤波值为

$$d_{mn}^{mn} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X_{kl}^{mn} \cdot A_{kl}^{(m,n)} \quad (14)$$

$m, n = 0, \dots, N-1$

将式(14)代入式(5)中, 得

$$d_{xy} = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X_{kl}^{mn} A_{kl}^{(m,n)} \right) \quad (15)$$

显然块 $A^{(m,n)}$ 中的元素可表示为

$$A_{kl}^{(m,n)} = a_{x-m+k, y-n+l} \quad (16)$$

将式(16)代入到式(15)得

$$d_{xy} = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} X_{kl}^{mn} a_{x-m+k, y-n+l} \right)$$

$$\frac{k' = -m+k}{l' = -n+l} \frac{1}{N^2} \sum_{k'=-m}^{N-1-m} \sum_{l'=-n}^{N-1-n} a_{x+k', y+l'} \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} X_{m+k', n+l'}^{mn} \right)$$

$$= \frac{1}{N^2} \sum_{k=-m}^{N-1-m} \sum_{l=-n}^{N-1-n} a_{x+k,y+l} \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} X_{m+k,n+l}^{mn} \right) \quad (17)$$

交换 m, k 及 n, l 的求和次序, 并且对 k, l 在区间 $[-N+1, -1]$ 和 $[0, N-1]$ 分别进行讨论, 则式(17)可变为

$$d(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} \sum_{l=-(N-1)}^{N-1} T_{kl} a_{x+k,y+l} \quad (18)$$

其中, T 为 $(2N-1) \times (2N-1)$ 的滤波模板:

$$T = \begin{bmatrix} T_{-N+1,-N+1} & \dots & T_{-N+1,-1} & T_{-N+1,0} & T_{-N+1,1} & \dots & T_{-1,-N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{-1,-N+1} & \dots & T_{-1,-N+1} & T_{-1,0} & T_{-1,1} & \dots & T_{-1,-N+1} \\ T_{0,-N+1} & \dots & T_{0,-1} & T_{0,0} & T_{0,1} & \dots & \dots \\ T_{1,-N+1} & \dots & T_{1,-1} & T_{1,0} & T_{1,1} & \dots & T_{1,-N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{N-1,-N+1} & \dots & T_{N-1,-1} & T_{N-1,0} & T_{N-1,1} & \dots & T_{N-1,-N+1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

模板 T 的各元素值为

$$T_{k,l} = \begin{cases} \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1-k} \sum_{n=0}^{N-1-l} X_{m+k,l+n}^{mn}; 0 \leq k \leq N-1, 0 \leq l \leq N-1 \\ \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1-k} \sum_{n=-l}^{N-1} X_{m+k,l+n}^{mn}; 0 \leq k \leq N-1, -N+1 \leq l \leq -1 \\ \frac{1}{N^2} \sum_{m=-k}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1-l} X_{m+k,l+n}^{mn}; -N+1 \leq k \leq -1, 0 \leq l \leq N-1 \\ \frac{1}{N^2} \sum_{m=-k}^{N-1} \sum_{n=-l}^{N-1} X_{m+k,l+n}^{mn}; -N+1 \leq k \leq -1, -N+1 \leq l \leq -1 \end{cases} \quad (20)$$

从式(18)可以看出, 2 维全相位滤波最终可表示为像素点与模板 T 的连续卷积过程。滤波时只需用模板 T 中心对准像素点 a_{xy} 进行乘累加运算即可。省去了正反变换过程。从式(20)可以看出, T 的求取仅和 4 维数组 X 相关, 因而求取 X 是模板设计的关键。

4.2 2 维加窗全相位滤波模板的设计

为改善滤波性能, 可给输入的 N^2 个子块数据加 2 维前窗 F , 也可给输出的 N^2 个子块数据加 2 维后窗 B (假设 F, B 都为对称窗), 则式(12)的 X 表示为

$$X_{kl}^{ij} = F_{k,l} \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_{im} \alpha_{mk} H_{mn} \alpha_{ln}^T \beta_{nj}^T \right) B_{i,j} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)即可生成加窗 2 维全相位模板:

$$T_{k,l} = \begin{cases} \frac{1}{C} \sum_{m=0}^{N-1-k} \sum_{n=0}^{N-1-l} X_{m+k,l+n}^{mn}; 0 \leq k \leq N-1, 0 \leq l \leq N-1 \\ \frac{1}{C} \sum_{m=0}^{N-1-k} \sum_{n=-l}^{N-1} X_{m+k,l+n}^{mn}; 0 \leq k \leq N-1, -N+1 \leq l \leq -1 \\ \frac{1}{C} \sum_{m=-k}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1-l} X_{m+k,l+n}^{mn}; -N+1 \leq k \leq -1, 0 \leq l \leq N-1 \\ \frac{1}{C} \sum_{m=-k}^{N-1} \sum_{n=-l}^{N-1} X_{m+k,l+n}^{mn}; -N+1 \leq k \leq -1, -N+1 \leq l \leq -1 \end{cases} \quad (22)$$

其中,

$$C = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} F_{k,l} B_{k,l} \quad (23)$$

为归一化因子。

显然, 当 F, B 都为 2 维矩形窗时, 有 $C = N^2$, 则对应于式(20)不加窗的情况, 可称为无窗全相位滤波。将 F, B 择其一矩形窗的情况称为单窗全相位滤波; 将 F, B 都不为矩形窗情况称为双窗全相位滤波。

注意: 式(21)、(22)是模板的构造通式, 只要将具体的正反变换矩阵 α, β , 频率矩阵 H 及前后窗矩阵 F, B 代入式(21)~(23)中, 就可生成任意正交变换下的 2 维加窗全相位模板 T 。不难证明, T 总是对称的^[9]。在 DFT (discrete Fourier transform) 情况下, T 具有简单形式。

4.3 2 维加窗全相位 DFT 滤波模板的设计

离散傅里叶变换的正反变换矩阵分别为

$$\alpha_{m,k} = W^{mk}; W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}; m, k = 0, \dots, N-1 \quad (24)$$

$$\beta_{i,m} = \frac{1}{N} W^{-im}; i, m = 0, \dots, N-1 \quad (25)$$

将式(24)、(25)分别代入式(21):

$$X_{kl}^{ij} = F_{k,l} \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} W^{-m(i-k)} H_{mn} W^{-n(j-l)} \right) B_{i,j} = F_{k,l} h_{i-k,j-l} B_{i,j} \quad (26)$$

其中, h 为 H 的 IDFT, 若 H 满足式(2)的线性相位条件, 则有

$$h_{k,l} = h_{-k,-l} \quad k, l = 0, \dots, N-1 \Rightarrow \quad (27)$$

$$X_{m+k,n+l}^{mn} = F_{m+k,n+l} h_{k,l} B_{m,n} \quad (28)$$

将式(28)代入式(22), 注意 $h_{k,l}$ 可以提到求和号外面, 令

$$Win_{k,l} = \begin{cases} \frac{1}{C} \sum_{m=0}^{N-1-k} \sum_{n=0}^{N-1-l} F_{m+k,n+l} B_{m,n}; k, l \in [0, N-1] \\ \frac{1}{C} \sum_{m=0}^{N-1-k} \sum_{n=-l}^{N-1} F_{m+k,n+l} B_{m,n}; k \in [0, N-1], l \in [-N+1, -1] \\ \frac{1}{C} \sum_{m=-k}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1-l} F_{m+k,n+l} B_{m,n}; k \in [-N+1, -1], l \in [0, N-1] \\ \frac{1}{C} \sum_{m=-k}^{N-1} \sum_{n=-l}^{N-1} F_{m+k,n+l} B_{m,n}; k, l \in [-N+1, -1] \end{cases} \quad (29)$$

由于 F, B 都为 $N \times N$ 的对称窗, 所以 Win 为 F, B 离散卷积形成的归一化后的 $(2N-1) \times (2N-1)$ 的卷积窗:

$$Win = \frac{1}{C} F * B \quad (30)$$

式(30)显然满足: $Win_{0,0} = 1$, 故归一化因子 C 设定正确。由式(22)、(29)和(30)有

$$T_{k,l} = Win_{k,l} h_{k,l}; k, l \in [-N+1, N-1] \quad (31)$$

结合式(24)~(31), 模板可按如下步骤来构造:

- (1) 对频率特性矩阵 H 进行反傅氏变换生成 h 。
- (2) 将 h 进行2维翻转生成 $(2N-1) \times (2N-$

1)的 h' 。

(3) 将前窗和后窗进行2维卷积形成卷积窗 Win 。

(4) 将 h', Win 对应元素相乘即得滤波模板 T 。

按照上述步骤, 仍然取式(1)的频率特性矩阵 H , 用 H 生成的无窗全相位模板和加2维三角窗全相位模板的特性曲面如图5所示。

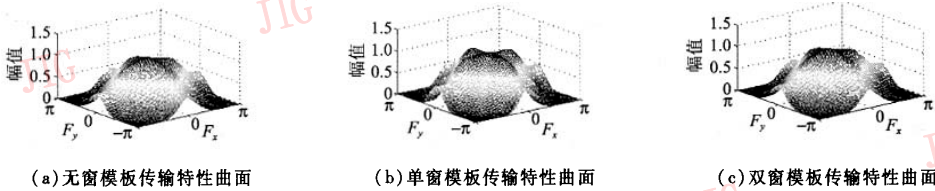


图5 全相位滤波模板的传输特性曲面($N=5$)
Fig. 5 Transfer surfaces of all-phase filtering templates

从图5可以看出: 相比于图1(a)情况, 无窗和单窗曲面(a), (b)阻带内的起伏大大减小, 且过渡带不增宽, 其中单窗情况比无窗性能更好些。而双窗模板过渡带稍有增宽, 但通带和阻带内的起伏都很小。

4.4 部分常用模板在 2×2 全相位滤波下的统一构造

由于 $(2N-1) \times (2N-1)$ 全相位滤波模板对应频率矩阵 H 的大小为 $N \times N$, 而常用模板都为 3×3 , 因而若找到相应 2×2 的频率特性矩阵 H , 按照构造无窗 DFT 模板的4个步骤, 就可生成模板 T , 这样就把常用模板的构造统一起来。其 H, T 关系举例如下:

均值 box 模板

$$H = \begin{bmatrix} 9 & -3 \\ -3 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

高斯模板

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow T = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Laplacian 模板

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \Rightarrow T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

标准低通模板

$$H = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow T = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

.....

5 实验

5.1 用 Fourier 模板恢复亚奈图像

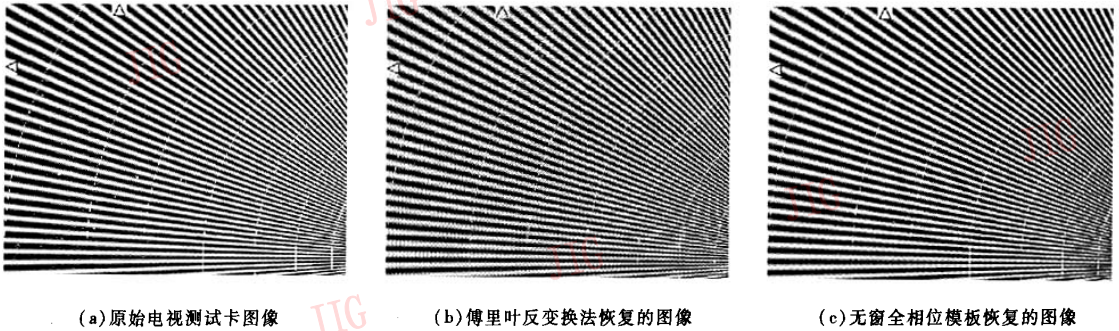
实验选用亚奈奎斯特取样后的电视测试卡图像。亚奈图像的傅里叶频谱既有丰富的低频成分, 又有丰富的高频成分^[8], 其中, 低频区域的频谱主要反映了内插前原图像的信息, 可设计合适的低通模板对亚奈图像处理而恢复出原有图像。分别采用傅氏反变换法生成的模板和全相位无窗、单窗和双窗模板对亚奈图像进行恢复, 恢复的效果如图6所示。

所测得的各模板恢复出图像的信噪比如表1所示。

表1 电视测试卡亚奈图像的模板恢复结果($N=5$)
Tab. 1 Restoration result of sub-sampled TV test card

模板类别	反变换模板	反变换加窗	无窗全相位	单窗全相位	双窗全相位
PSNR	18.7619	19.8558	25.9127	27.9151	27.7448

结合图6(b)和表1可以看出, 用反变换模板恢复的图像在各斜线边缘出现了“振铃”现象, PSNR

图 6 各种低通模板对亚奈图像的恢复 ($N=5$)Fig. 6 Sub-sampled image's restoration by LP templates ($N=5$)

值较低。加窗后 PSNR 仅提高 1.1dB。而从图 (c) 可以看出:用无窗全相位模板可消除振铃现象,PSNR 比直接反变换方法提高了 7.2dB;对全相位模板加单窗后,从表 1 可以看出:PSNR 值还可提高 2dB;而加双窗后,其 PSNR 值比单窗情况稍低些,这是由于模板曲面的过渡带稍增大的缘故。这说明,2 维全相位滤波性能可灵活地通过加单窗或双窗的方式来改善。

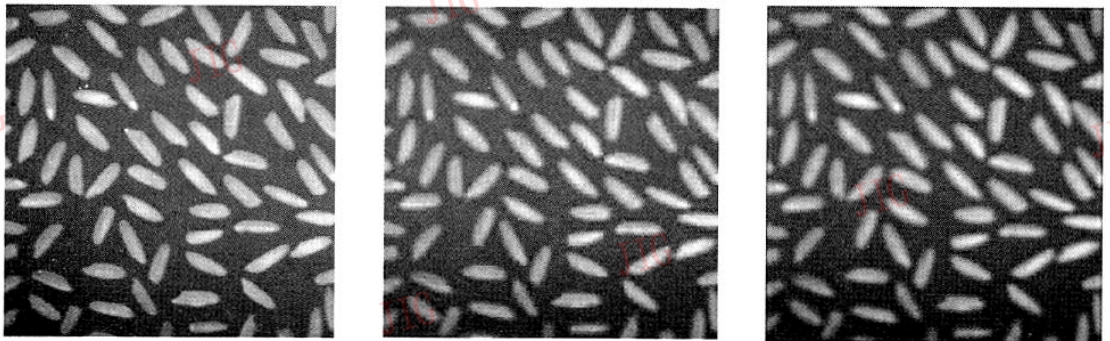
5.2 DCT 域滤波和全相位 DCT 模板滤波比较

选用 256×256 的 rice 图像,对此图像分别采用 8×8 的分块滤波法和根据式 (21) 计算出的 DCT 模

板进行低通滤波。其列率域特性矩阵 H 选为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

原图像及其分别采用分块滤波和用全相位 DCT 模板滤波恢复的图像分别如图 7 所示。

图 7 原有图像和 DCT 域低通滤波后的图像 ($N=8$)Fig. 7 Original image and the LP-filtered images in DCT domain ($N=8$)

从图 7(b)可看出,用分块低通滤波后的图像明显存在方块效应,而图 7(c)表明用全相位 DCT 模板处理消除了方块效应,具有较好的模糊处理效果。

6 结论

本文提出了加窗的 2 维全相位滤波算法,严格

推导了任意正交变换下 2 维全相位滤波模板的公式。2 维全相位滤波具有如下特点:

- (1) 全相位滤波可统一部分经典模板的构造过程。
- (2) 2 维全相位滤波适用于所有正交变换情况。
- (3) 2 维全相位 DFT 滤波模板的频率曲面在无

窗和单窗情况下通过2维频率设置点^[4]。相比于常用模板,更容易控制滤波输出的频率成分。

(4) 2维全相位滤波消除了用傅里叶反变换法生成的模板滤波时,波时存在的振铃现象。

(5) 2维全相位滤波模板在对单个像素进行滤波时,考虑了对单个像素进行分块的所有情况,可以完全消除方块效应。

(6) 2维全相位滤波有灵活的加窗方式,可根据实际需要,选用2维全相位无窗、单窗或双窗模板。

需指出的是,由于与 $N \times N$ 的频率特性矩阵 H 对应的全相位滤波模板的大小为 $(2N - 1) \times (2N - 1)$,因而,全相位滤波性能的改善是以付出一定的计算量为代价的。

参考文献 (References)

- 1 Lee J D. Digital image enhancement and noise filter by use of local statistics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(9): 863 ~ 872.
- 2 Rosenfeld A, Kak. Digital A C Picture Processing[M]. Newyork: Academic, 1976: 130 ~ 170.
- 3 Liu Wen-yao. Opto—electronic Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 106 ~ 111. [刘文耀著. 光电图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 106 ~ 111.]
- 4 Hu J, Sinaceur N, Li F. Removal of blocking and ringing artifacts in transform coded images [J]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1997, 4(4): 2565 ~ 2568.
- 5 Wang Zhao-hua, Hou Zheng-xin, Su Fei. All phase digital filter[J]. Chinese Journal on Signal Processing, 2003, 19(Supp.): 1 ~ 4. [王兆华, 侯正信, 苏飞. 全相位数字滤波[J]. 信号处理, 2003, 19(增刊): 1 ~ 4.]
- 6 Lee J B, Lee B G. Transform domain filtering based on pipelining structure [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(8): 2061 ~ 2064.
- 7 Satoshi Kondo. A method for removing blocking effects in Mpeg-2 video by appling a block classification technique using stream information [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(3): 872 ~ 878.
- 8 Su Fei, Wang Zhao-hua. Design of 2-Dimension Fourier interpolating template with window [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(4): 439 ~ 444. [苏飞, 王兆华. 二维 Fourier 带窗内插模板的设计[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 439 ~ 444.]
- 9 Hou Zheng-xin. The construction of the three kinds of 2-Dimensional superimpose digital filter [J]. Journal of Tianjin University, 1985, 18(1): 29 ~ 49. [侯正信. 三种二维重叠数字滤波器的构造[J]. 天津大学学报, 1985, 18(1): 29 ~ 49.]