

# 基于 Contourlet 的图像感知质量评价

孙玉宝<sup>1,2</sup>, 费 选<sup>1</sup>, 韦志辉<sup>1</sup>, 肖 亮<sup>1</sup>, 胡晰远<sup>1</sup>, 吕战强<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学计算机科学与技术学院模式识别与智能系统实验室, 江苏南京 210094;

2. 中国人民解放军总参谋部第六十研究所训练科研处, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 图像感知质量评价是图像信息工程的基础技术之一. 结合人类视觉系统(HVS)的感知特性, 在 Contourlet 变换域建立了一个新的可计算 JND 门限模型, 该模型综合考虑了 HVS 的空间频率敏感性、方向敏感性、对比度掩盖与邻域掩盖特性. 由于邻域掩盖模型的引入, 能够有效鉴别图像中平滑、边缘与纹理结构区域对失真的不同掩盖强度, 实现更加精确的掩盖阈值计算. 借助于建立的 JND 模型, 定义每个系数的感知误差, 进而建立了感知质量评价标准 HVSNR. 实验结果表明该定量评价标准能够有效匹配人类的视觉感觉.

**关键词:** 质量评价; contourlet; HVS; JND; 邻域掩盖

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0649-07

## Image Perceptual Quality Assessment Using Contourlet Transform

SUN Yu-bao<sup>1,2</sup>, FEI Xuan<sup>1</sup>, WEI Zhi-hui<sup>1</sup>, XIAO Liang<sup>1</sup>, HU Xi-yuan<sup>1</sup>, LÜ Zhan-qiang<sup>2</sup>

(1. Lab of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Institute of Computer Science and Technology, University of Science and Technology,

Nanjing, Jiangsu 210094, China; 2. Scientific Research Department of Military Training, 60th Research Institute of General

Staff Department, Chinese People's Liberation Army, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Image perceptual quality assessment is a key problem in image processing engineering. According to the perceptual characters of Human Visual System (HVS), a Just Noticeable Distortion (JND) threshold model is constructed using contourlet transform, which can well qualify spatial frequency sensitivity, orientation sensitivity, contrast masking and neighborhood masking effects of HVS. As a result of taking account of neighborhood masking additionally, this JND model can distinguish the different masking intensity of smoothness, edge and texture domain, and implement more accurate JND threshold. Based on our JND threshold model, the perceptual error between contourlet coefficients is defined, and then a quantitative perceptual quality metric HVSNR is proposed. Experiments demonstrate that our metric can provide quality evaluation well correlated with those given by human observers.

**Key words:** quality assessment; contourlet; HVS; JND; neighborhood masking

## 1 引言

图像质量评价是图像处理领域中的一个基本问题. 由于数字图像处理结果的最终接受者是人, 因此在评价图像质量时必须考虑到人类视觉系统(Human Visual System: HVS)的特性. 然而, 广泛使用的 MSE 与 PSNR 标准并不能匹配 HVS 的感知特性, 因此期望能够建立图像的感知评价标准, 如同人类视觉系统一样定量地评估图像的视觉感知质量.

当前结合 HVS 的图像评价标准是一个研究热点问题, 并取得了一定的成果. 然而先前的感知标准通常只考虑了 HVS 的空间频率敏感性与对比度掩盖特性<sup>[1-3]</sup>, 由于对比度敏感函数(Contrast Sensitivity Func-

tion: CSF)模型只是在简单的均匀模式背景下测量获取的, 同时对对比度掩盖特性仅考虑了背景信号的对比度特性, 并不能有效刻画人类对复杂图像模式的感知敏感性, 为此还必须进一步将邻域掩盖特性引入到评价标准中. 同时现有的可计算视觉模型主要集中于小波变换域<sup>[4,5]</sup>, 但小波变换的方向分辨率较低, HH 子带中混合了 45°与 -45°方向, 而这两个方向间并不能相互充分掩盖<sup>[6,7]</sup>. 与小波相比, Contourlet 可具有更为精细的方向分辨率<sup>[11]</sup>, 且可随径向频率作自适应选择, 从而能够更加有效匹配 HVS 理想的多通道结构. 基于上面的考虑, 本文首先建立了 Contourlet 域的 JND(Just Noticeable Distortion)阈值门限模型, 确定每个系数所能掩盖的最大误差, 而 HVS 对此最大误差恰可察觉. 该模型综合考虑了

HVS的空间频率敏感性、方向敏感性、对比度掩盖与邻域掩盖特性.同时对 Daly 提出的邻域掩盖模型进行了改进,定义了邻域波动度,对图像邻域进行了更细的结构类型分类,并结合形状自适应邻域窗的概念,实现了对邻域掩盖更加精确的建模.掩盖阈值计算更加准确,能够匹配 HVS 对图像中平滑、边缘与纹理结构类型区域的掩盖强度.基于建立的 JND 模型,定义了退化图像与参考图像变换系数间的感知误差,形成了一种新的感知质量评价标准 HVSNR,实验结果验证了本文标准的有效性,能够准确地反映人眼对图像质量的主观感受.

## 2 Contourlet 变换

2002 年, Minh N. Do 提出了一种有效的图像稀疏表示方法: Contourlet 变换<sup>[8]</sup>, 它能对图像进行多方向与多分辨率的时频局部分析, 具有良好的各向异性特征, 能很好地捕获图像的边缘与轮廓信息. Contourlet 变换由两个滤波阶段组成, 首先由 LP (Laplacian Pyramid) 变换实现对图像的多尺度分解; 然后对 LP 分解得到的每个高频子带应用方向滤波器组 (Directional Filter Bank: DFB) 进行多方向分解, 能够将分布在同方向上的多个点状奇异性组合为单一的线段型奇异性. 图 1(a) 给出了 Contourlet 滤波器组的分解原理示意图. 图 1(b) 表示 4 层分解的频域分割图, 图中阴影部分表示最低频子带. 对于 Contourlet 变换, 每个子带图像提取原图像特定范围的空间频率和方向的信息. 例如图中所标子带  $S(3,1)$  包含了幅角  $\theta$  从 0 到  $\pi/8$  的方向信息, 若图像垂直方向的最大频率为  $f_{y\max}$ , 通过计算可知, 子带  $S(2,2)$  包含的频率幅值和幅角的范围分别为  $(f_{y\max}/(4\cos(\pi/2-\theta)), f_{y\max}/(2\cos(\pi/2-\theta)))$  和  $(\pi/4, \pi/2)$ . 与小波相比, Contourlet 可具有更为精细的方向分辨率, 且可随径向频率作自适应选择, 从而能够更加有效匹配 HVS 理想的多通道结构, 有利于构建更为精确的 HVS 可计算模型.

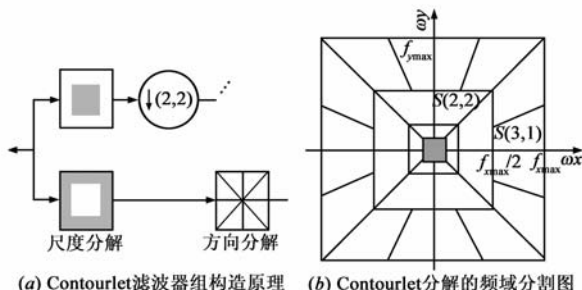


图1 Contourlet变换结构示意图

## 3 Contourlet 域 HVS 可计算模型

关于人类视觉系统的研究表明, HVS 采用多通道机制处理视觉信息, 不同的通道处理特定方向、频率范围的视觉信息, 这种通道通常称为感知通道. 低层视觉

的进一步研究表明, 刺激信号的视觉敏感性依赖于其空间频率、局部对比度、方向以及背景信号的模式与活动性等诸多因素. 为了结合 HVS 特性进行定量的图像质量评价, 首先必须建立 HVS 的可计算模型. 本文拟建立的可计算模型, 主要由以下几个部分组成 (如图 2).



图2 Contourlet域JND可计算阈值模型

第一部分模拟 HVS 的多通道视觉信息处理机制, 应用 Contourlet 感知滤波器组对输入的图像进行多尺度方向分解, 形成特定方向、特定频率范围的子带图像, 以便构建感知模型; 第二部分是利用 Contourlet 变换系数, 计算图像局部对比度; 第三部分是利用 HVS 的频率敏感度, 通过 Contourlet 域对比度敏感函数的建模和计算, 建立每个子带图像的 CSF 权因子或静态检测门限; 第四部分主要考虑对比度掩盖与邻域掩盖效应, 通过定量的建模可预测由于强对比度或活跃区域的出现, 多少误差可以被原图像所掩盖, 形成最终的恰可察觉失真 (JND) 门限模型.

### 3.1 局部对比度定义

人类视觉系统的响应较少依赖于绝对亮度, 而更依赖于周围亮度的局部变化, 即人类视觉系统的响应主要依赖于光度对比度. 图像的对比度具有多种定义, 其中较为完善的是 Eli. Peli 提出的“局部限带对比度” (local band-limited contrast): 它不仅考虑了局部的背景亮度, 还考虑了空间频率、方向以及局部的背景亮度的不均衡性<sup>[9]</sup>. 借鉴于该思想, 定义 Contourlet 域中图像局部对比度  $C_{l,d}(i,j)$  如下:

$$C_{l,d}(i,j) = \frac{I_{l,d}(i,j)}{|I_{0,0}(m,n)| + 1}, (i,j) \in D(m,n) \quad (1)$$

其中  $I_{l,d}(i,j)$  表示 Contourlet 分解第  $l$  层第  $d$  个方向子带  $I_{l,d}$  中  $(i,j)$  位置的 Contourlet 系数,  $I_{0,0}(m,n)$  表示最低频子带中  $(m,n)$  位置的系数, 可表示相应局部块的均值,  $D(m,n)$  表示  $I_{0,0}$  子带中节点  $(m,n)$  所有后代的位置集合.

### 3.2 对比度敏感函数

CSF 描述了 HVS 对不同空间频率与方向刺激模式的对比度敏感性变化, 是人眼对特定空间频率及对比度敏感程度的定量描述. 关于 CSF 模型根据不同的视觉实验有多种表达形式, 但这些模型大部分都未考虑方向的因素, 而视觉研究表明在对角方向人眼的敏感性下降. 本文将采取 Daly 提出的 2D CSF( $\omega, \theta$ ) 模型<sup>[1]</sup>, 该模型综合考虑了不同频率  $\omega$  和方向  $\theta$  的刺激模式的视觉敏感性. 由图 1(b) 的频域分割图可知, 每个 Contourlet 子带覆盖了一定的频率与方向范围, 因此只能对

每个子带计算一个 CSF 权因子. 这里通过平均法计算, 即计算  $\text{CSF}(\omega, \theta)$  在某个子带的频率和方向范围内的平均, 以此作为该子带图像的权因子. 根据第二节的说明, 可以计算出每个子带系数所包含的频率和幅角范围. 例如对于 4 层 Contourlet 分解, 以子带  $S(3, 1)$  为例, 由平均法, 可计算出该子带的 CSF 权因子  $\omega_{3,1}$  为:

$$\omega_{3,1} = \frac{\int_0^{\pi/8} \int_{f/(2\cos\theta)}^{f/\cos\theta} \text{CSF}(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\int_0^{\pi/8} \int_{f/(2\cos\theta)}^{f/\cos\theta} d\omega d\theta} \quad (2)$$

相应地,  $I_{l,d}$  子带无掩盖信号存在时的静态对比度检测门限  $T_{l,d}$  的表示式如下:

$$T_{l,d} = \frac{1}{w_{l,d}} \quad (3)$$

表 1 给出了对于 5 层 Contourlet 分解 (由低频到高频每层分解的方向个数为 1, 4, 4, 8, 16), 采用 Daly 模型及平均法计算各子带的权因子, 由于最低频子带视觉感知的重要性, 其权因子通常取为 1.

表 1 五层 Contourlet 分解各子带的权因子

层 次 号	方向号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1							
1	0.8955	0.8955	0.8955	0.8955				
2	0.6416	0.6414	0.6416	0.6416				
3	0.3724	0.1922	0.1909	0.3716	0.3724	0.1922	0.1909	0.3716
4	0.1127	0.0815	0.0414	0.0158	0.0153	0.0402	0.0801	0.1121
层 次 号	9	10	11	12	13	14	15	16
4	0.1127	0.0815	0.0414	0.0158	0.0153	0.0402	0.0801	0.1121

### 3.3 对比度掩盖

掩盖效应是视觉中非常重要的现象, 它描述了刺激信号之间的相互作用. 掩盖效应一般表现为一个刺激信号本身是可视的, 但由于另一个刺激信号的出现而不能被感知或检测, 我们称前者为被掩盖信号 (masked signal), 而后者为掩盖信号 (masking signal), 也就是说由于掩盖信号的影响, 图像的另一信号的可视性下降. 对比度掩盖 (contrast masking) 是一种重要的掩盖现象, 通过被掩盖信号的检测门限的提升来定量描述掩盖的强度, 也就是在不同对比度的掩盖信号背景上添加被掩盖信号, 然后分别检测能区分出被掩盖信号的对比度检测门限. 许多研究者从不同角度研究了对于对比度掩盖现象及其提升门限的数学建模, 其中较为著名的是由 Daly 提出的模型<sup>[1]</sup>, 如下:

$$\text{CM}_{l,d}(m, n) = (1 + (k_1 \cdot (k_2 \cdot |\bar{C}_{l,d}(m, n)|)^s)^b)^{\frac{1}{b}} \quad (4)$$

其中,  $k_1, k_2$  为常数,  $s \in [0.65, 1]$ ,  $b \in [2, 4]$ ,  $\bar{C}_{l,d}(m, n) = C_{l,d}(m, n) / T_{l,d}$  为经整体检测门限  $T_{l,d}$  调节后的归一化局部对比度. 后续实验中本文将设置  $s = 0.65$ ,  $b = 4$ .

### 3.4 邻域掩盖

邻域掩盖 (neighborhood masking) 是另一种重要的掩盖效应, 表现为一个失真信号在图像平滑区域容易被察觉, 而在活跃区域 (如纹理区域) 却难以察觉的现象. 因此对邻域掩盖强度的定量描述依赖于相邻区域的信号的整体性质. 根据 Xiaonong Ran 等提出的基于感知的图像三成份模型<sup>[10]</sup>, 可以把图像分解为强边, 纹理, 和平滑三种不同类型的结构区域, 其中构成人类视觉的刺激的主要的来源是图像的强边部分. 所谓强边是指有较大的亮度变化和较小的边缘宽度的图像区域; 相应的亮度变化强度较小, 变化规律性不明显的区域则为纹理部分; 而平滑部分为亮度缓慢变化的区域. 因为强边对人类的视觉效果至关重要, 所以要保护强边, 对强边部分采取较小的掩盖强度的策略. 而平滑区域, 虽然在产生视觉感知时不如强边, 但是人眼对平滑部分的失真却很敏感, 不能提供较强的掩盖, 因此掩盖的主体将是纹理区域. 一个好的掩盖模型 (活跃性掩盖) 必须能提供一种统一的方法处理这三种成份.

2000 年 Daly 等在 JPEG2000 的框架下, 提出了一种小波域的邻域掩盖模型<sup>[11, 12]</sup>. 该模型中的  $q$  范数可以区分强边邻域和较强的纹理邻域, 但没有考虑到当位于平滑区域时, 虽然小波系数很小但对人眼也是相当敏感的, 而因为  $q < 1$ ,  $q$  范数将把小于 1 的系数放大, 这样计算出的阈值超过了平滑区域所能掩盖的范围, 同时小波分辨率较低不利于分析 HVS 对方向的敏感性. 基于上面的分析, 本节将对 Daly 提出的邻域掩盖模型进行改进, 建立 Contourlet 变换域中的邻域掩盖模型, 改进后的模型如下:

$$M_{l,d}(m, n) = a \sum_{(i,j) \in \Gamma(m,n)} \frac{D(i,j)}{N_{\Gamma(m,n)}}, \quad D(i,j) = \begin{cases} |\bar{C}_{l,d}(i,j)|, & |\bar{C}_{l,d}(i,j)| < 1 \\ |\bar{C}_{l,d}(i,j)|^q, & |\bar{C}_{l,d}(i,j)| \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\bar{C}_{l,d}(i, j) = C_{l,d}(m, n) / T_{l,d}$  同样为经子带检测门限  $T_{l,d}$  调节后的归一化局部对比度,  $\Gamma(m, n)$  为系数  $C_{l,d}(i, j)$  的局部邻域,  $N_{\Gamma(m,n)}$  为该邻域包含的系数总数,  $a$  为规范化因子, 通常取  $q = 0.2$ . 对小于 1 的系数直接取其绝对值可避免系数放大的问题. 同时我们发现平滑邻域、纹理邻域和强边邻域的 Contourlet 系数在空间分布上表现出波动性. 而这对于判断系数所处的邻域是纹理邻域还是平滑邻域很重要, 纹理邻域的 Contourlet 系数一般而言波动性大, 平滑邻域小波系数小而且变化平缓, 而强边邻域的小波系数存在峰值, 但在峰的两端, 基本是单调变化的. 因此 Contourlet 系数的波动度应该成为区分平滑邻域、纹理邻域和强边邻域的一个重要指标. 下面我们定义邻域系数波动度. 对于系数  $C_{l,d}(m, n)$ , 在  $I_{l,d}$  子带中取大小为  $(2h + 1) \times$

( $2w+1$ )的窗口,定义垂直波动度与水平波动度分别为  $F_{h,i}, F_{v,i}$ , 如下:

$$F_{l,d}^h(m,n) = \frac{1}{2h+1} \sum_{k=m-h}^{m+h} \frac{\sum_{j=n-w}^{j=n+w-1} |C_{l,d}(k,j) - C_{l,d}(k,j+1)|^p}{\sum_{j=n-w}^{j=n+w} |C_{l,d}(k,j)|^p},$$

$$F_{l,d}^v(m,n) = \frac{1}{2w+1} \sum_{j=n-w}^{j=n+w} \frac{\sum_{k=m-h}^{k=m+h-1} |C_{l,d}(k,j) - C_{l,d}(k+1,j)|^p}{\sum_{k=m-h}^{k=m+h} |C_{l,d}(k,j)|^p} \quad (6)$$

其中取  $p=2$ , 邻域系数的波动度为:

$$F_{l,d}(m,n) = 0.5 \cdot F_{l,d}^h(m,n) + 0.5 \cdot F_{l,d}^v(m,n) \quad (7)$$

其取值在 0 和 1 之间. 最后形成经邻域系数波动度调节的邻域掩盖调节因子:

$$M_{l,d}(m,n) = a \sum_{(i,j) \in \Gamma(m,n)} \frac{D(i,j)}{N_{\Gamma(m,n)}} F_{l,d}(m,n) \quad (8)$$

在计算调节因子时,必须考虑另一个重要的问题是邻域的大小,形状和算法的自适应性. 本文采用长方形的窗口,长宽满足关系  $\text{length}/\text{width}=2$ , 长方形主轴方向与子带方向保持一致,对于不同子带,通过旋转矩阵  $Q = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$  作自适应调整,其中  $\theta$  即为该方向子带的中心方向的角度,从而使得邻域中参与掩盖因子计算的系数所成的方向与子带的方向基本保持一致. 同时根据不同的分解层数,采取大小自适应的邻域窗. 具体做法是第  $i+1$  层的 contourlet 系数的邻域的大小是第  $i$  层邻域的  $\alpha$  倍,考虑到第  $i$  层系数是第  $i+1$  层次采样的结果,  $\alpha$  取 2 较为合理. 又由于在算法中,要求所计算的系数位于邻域正中心,但在计算子带边缘系数的邻域掩盖值时,其邻域所覆盖的系数(滑动窗口)越出了子带的边界,为此本文复制图像边界数据,采用延拓法处理边界处的系数.

### 3.5 JND 门限模型

建立 Contourlet 变换域 HVS 可计算模型的第四步是结合前面几小节已经建立的掩盖模型以及 CSF 权因子等视觉因素,形成恰可察觉失真(JND)门限模型,以确定图像感知评价中人类恰可察觉的最大允许失真,最终每一 Contourlet 系数的 JND 门限阈值为:

$$\bar{T}_{l,d} \cdot (1 + (k_1 \cdot (k_2 \cdot |\bar{C}_{l,d}(m,n)|^s)^b)^{\frac{1}{b}} \cdot (1 + M_{l,d}(m,n))) \quad (9)$$

其中第一项  $\bar{T}_{l,d}$  表示整个  $l_{l,d}$  子带的检测门限,由 HVS 的 CSF 确定,本文就取为  $l_{l,d}$  的静态检测门限  $T_{l,d}$  (见式

(3)). 在度量掩盖效应之前,首先我们用整体检测门限  $\bar{T}_{l,d}$  对局部对比度进行调节,产生归一化局部对比度:

$$\bar{C}_{l,d}(m,n) = C_{l,d}(m,n) / \bar{T}_{l,d} \quad (10)$$

第二项刻画了 HVS 的对比度掩盖效应(同式(4)),度量强对比度对视觉检测门限的提升. 第三项为邻域掩盖模型,对检测阈值作进一步修正,采用本文改进后的式(8)进行计算. 虽然两者都是由于存在干扰信号从而使视觉敏感度下降,但是对比度掩盖一般表现为点对点形式,是描述信号对自身产生失真的掩盖程度. 邻域掩盖与对比度掩盖的重要区别在于空间支撑区域不同,邻域掩盖考虑的是一个信号的邻域信号对于该信号失真可视性具有可预测性. 由于考虑了邻域掩盖效应,本文的 JND 模型可有效鉴别图像中平滑、边缘与纹理三种结构类型区域对失真的不同掩盖能力,从而建立了更加精确的 JND 建模,实验结果(见第 5 节)表明:本文 JND 模型能够更加匹配 HVS 的感知特性.

## 4 图像感知质量评价标准

上一节建立了 Contourlet 域的 JND 模型,可定量度量每一系数可承受的最大失真程度. 基于此,本节将建立基于 Contourlet 的图像感知质量定量评价标准,图 3 给出了系统框图.

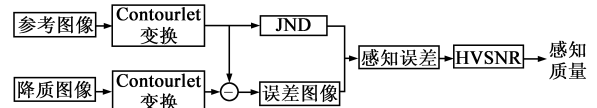


图3 基于contourlet的图像感知质量定量评价系统

Contourlet 变换域中,参考图像与降质图像间对应变换系数间的差值偏离其 JND 门限越大,则此点的视觉感知失真越大;当一点的“误差”比 JND 门限小时,此点的视觉感知失真几乎可以忽略,当一点的“误差”比门限大时,则此点的误差必须给予足够的重视. 鉴于以上分析,首先每个 Contourlet 系数的感知误差定义为:

$$\frac{|E_{l,d}(m,n)|}{\text{JND}(C_{l,d}(m,n))} \quad (11)$$

综合考虑不同尺度、方向、位置系数的感知误差,形成整体感知误差为:

$$\text{VE} = \left( \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{d=1}^{D_l} \sum_{m=1}^{N_{l,1}} \sum_{n=1}^{N_{l,2}} \left| \frac{E_{l,d}(m,n)}{\text{JND}(C_{l,d}(m,n))} \right|^4 + \sum_{m=1}^{N_{0,1}} \sum_{n=1}^{N_{0,2}} |I_{0,0}(m,n) - \hat{I}_{0,0}(m,n)|^4 \right)^{1/4} \quad (12)$$

其中,  $E_{l,d}(m,n) = C_{l,d}(m,n) - \hat{C}_{l,d}(m,n)$  为参考图像与退化图像间的物理误差,  $C_{l,d}(m,n), \hat{C}_{l,d}(m,n)$  分别为参考图像与退化图像的局部对比;  $L$  为 Contourlet 分解的总层数,  $D_l$  为 Contourlet 分解中第  $l$  层所分解的

方向子带个数,  $N_{l,1}$ ,  $N_{l,2}$  分别为相应子带的长和宽.  $I_{0,0}(m,n)$ ,  $\hat{I}_{0,0}(m,n)$  分别为参考图像和退化图像最低频的平滑子带.  $JND(C_{l,d}(m,n))$  为参考图像由公式(9)确定的 JND 门限值. 本文采取加高次幂方法(本文采用 4 次幂)来突出超出门限的误差,最后定义感知信噪比为:

$$HVSNR = -10\log_{10}MVE \quad (13)$$

其中:  $MVE =$

$$\frac{VE}{\left( \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{d=1}^{D_l} \sum_{m=1}^{N_{0,1}} \sum_{n=1}^{N_{0,2}} |I_{0,0}(m,n)|^4 + \sum_{m=1}^{N_{l,1}} \sum_{n=1}^{N_{l,2}} |C_{l,d}(m,n)|^4 \right)^{1/4}}$$

为归一化后的整体感知误差.

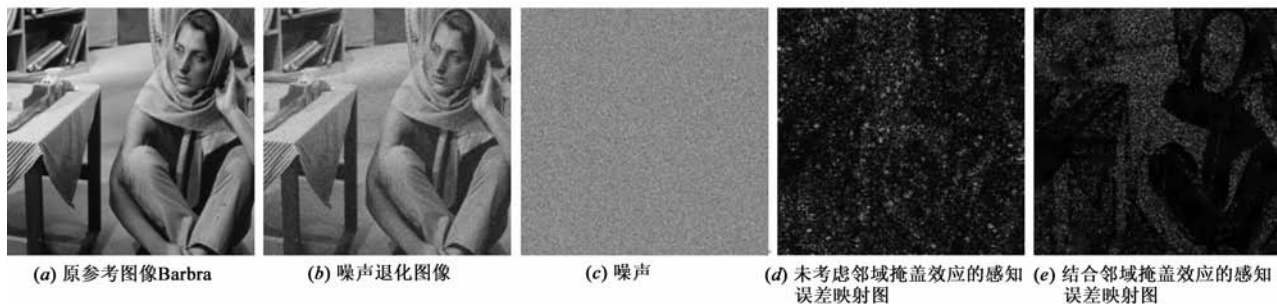


图4 本文Contourlet域HVS可计算模型中邻域掩盖效应的分析与比较(图像Barbra)

图 4(a) 为参考图像 Barbra, 这是一幅包含平滑、边缘、纹理结构的图像. 图 4(b) 为图 4(a) 加入高斯噪声后的图像, 噪声标准差为 15, 图 4(c) 为加入的噪声图像. 为了直观地呈现退化图像的感知误差, 将每一点的感知误差作为 Contourlet 系数重建后, 形成感知误差强度映射图, 映射图中灰度由暗到亮表示感知误差的由小到大, 可直观地体现每一像素点对应的感知失真程度. 图 4(d) 为按照本文模型(9)未考虑邻域掩盖效应时计算出的感知误差强度映射图像, 图 4(e) 则为进一步综合考虑邻域掩盖效应后的感知误差强度映射图像. 图 4(d) 中过低估计了纹理区域的掩盖强度, 从而放大了纹理区域的感知误差, 而从图 4(e) 可以看出, 进一步考虑邻域掩盖效应后的 HVS 可计算模型能够有效鉴别图像中平滑、边缘与纹理不同结构类型由弱到强的视觉掩盖强度, 纹理区域处的感知误差明显降低, 有效匹配 HVS 对相应结构类型的视觉敏感性, 说明了结合邻域掩盖模型的必要性, 同时也验证了本文 Contourlet 域 HVS 可计算模型的有效性.

图 5(a)、(b) 分别为对图像 Cat 在平滑和纹理区域加入相同的高斯噪声(标准差为 20, 大小为  $256 \times 256$ ) 后的退化图像. 图 5(c)、(d) 分别为(a)、(b) 相应的感知误差强度映射图, 同样亮度由暗道亮表示感知误差的由小到大. 由于纹理区域对噪声的掩盖强度较大, 相应的大部分感知误差较小, 而 HVS 对平滑区域的噪声更为敏感, 感知误差较大, 因此(b) 的视觉感知效果要

可以认为感知信噪比 HVSNR 越大, 图像感知质量越好.

## 5 实验结果与分析

下面将进行具体的数值实验, 验证本文感知评价标准的有效性, 并同现有的 PSNR 与 SSIM<sup>[13]</sup> 定量评价标准进行比较. 事实上, PSNR 反映的是参考图像与退化图像间数量意义上的绝对误差, 而 SSIM 是一种结构相似度的图像质量评价方法, 与 HVS 的主观评价具有一定的相关性. 后续实验中, 在计算本文 JND 阈值模型与评价标准时, 取 5 层 Contourlet 分解(由低频到高频每层分解的方向个数为 1, 4, 4, 8, 16), 按照表 1 设置每一子带的 CSF 权因子, 其余参数均按第四中的说明选取.

优于(a), 对于 PSNR 标准, 由于只是在不同的位置加入了相同的高斯噪声, 两者的 PSNR 几乎相同, 而 SSIM 的定量评价标准也比较接近, 分别为 0.9319, 0.9459, 而本文的感知信噪比 HVSNR 分别为:  $HVSNR = 21.2109\text{dB}$ ,  $HVSNR = 30.8813\text{dB}$ , 能够很好匹配 HVS 对相应结构类

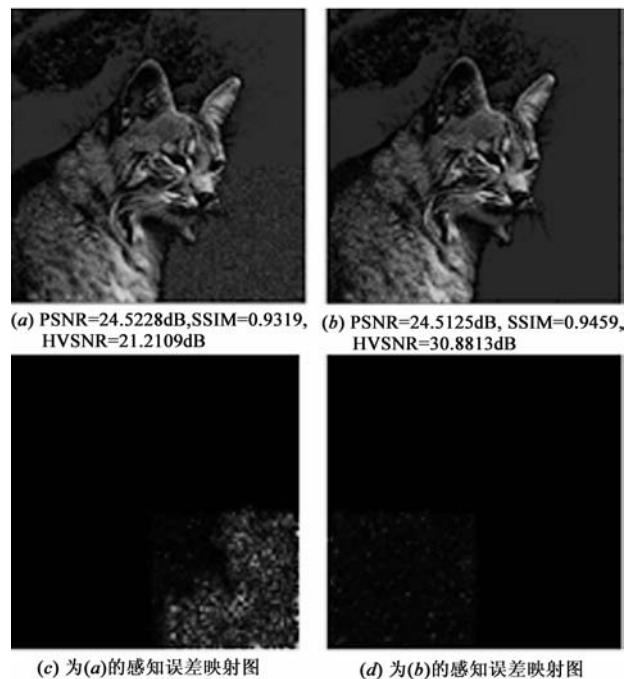


图5 本文感知评价标准HVSNR与PSNR、SSIM标准的比较(图像Cat)

型的视觉敏感性.

下面进一步测试本文评价标准与人类主观感知的一致性.实验测试图像集选用美国 TEXAS 大学图像和视频工程实验室提供的图像质量评估数据库 LIVE<sup>[14]</sup>,该图像库包含了多幅经不同失真形成的退化图像,并给出了每幅图像的主观评分 MOS(Mean Opinion Score)信息,对其中 5 类失真图像:JPEG、JPEG2000 压缩图像、JPEG2000 码流信道传输错误图像、高斯模糊图像和高斯白噪声共 779 幅图像进行仿真试验.通过 Video Quality Experts Group(VQEG)定义的四钟性能指标来定量度量图像质量客观评价结果与主观感知的一致性<sup>[15]</sup>,包

括(1) Person 相关系数 PCC(Person Correlation Coefficient);(2) Spearman 相关系数 SCC(Spearman Correlation Coefficient);(3) MAE(mean absolute error);(4) 均方根误差(Root Mean Square Error).实验中使用 LIVE 库中所有图像作为测试样本,图 6 显示了本文方法以及 PSNR、SSIM 同主观 MOS 值的非线性 Logistic 函数拟合曲线逼近点图,表 2 列出了 PNSR、SSIM 以及本文 HVSNR 标准的定量评测结果.从中可以看出本文算法逼近效果最优,与主观评价价值具有更好的一致性.与 PNSR、SSIM 相比,本文的评价标准 HVSNR 能够与人眼对图像质量的主观感受保持更好的一致性.

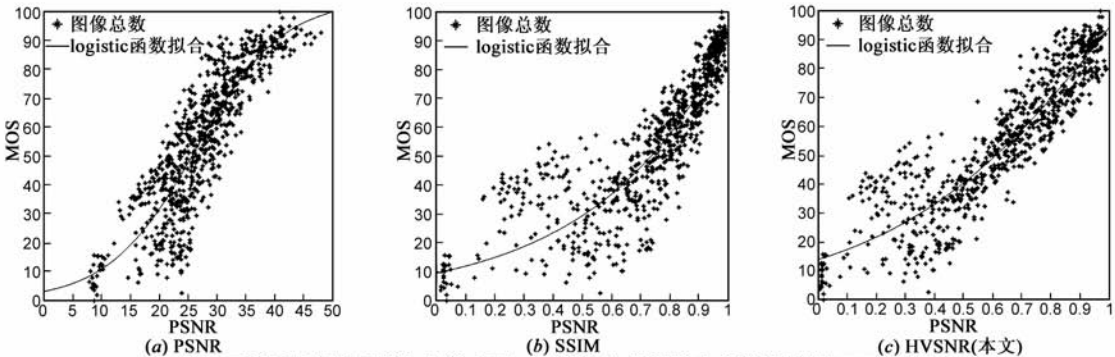


图6 三种质量评价标准与人类主观MOS值的非线性拟合曲线图(使用LIVE中的所有图像)

表 2 三种评价标准与主观评测结果 MOS 的一致性比较

测试 图像库	评价标准	PCC	SCC	MAE	RMS
LIVE	PSNR	0.8742	0.9983	10.3893	13.2645
	SSIM	0.8992	0.9986	9.5834	11.9577
	HVSNR	0.9151	0.9994	9.0189	11.0051

6 结论与展望

本文首先建立了 Contourlet 变换域的 JND 模型,进而构建了图像感知质量评价标准,该标准综合考虑了 HVS 的多种感知特征,特别是邻域掩盖特征的引入,使得本文的评价标准能够有效匹配人类视觉系统对平滑、边缘与纹理等不同结构类型区域的视觉敏感性.实验结果表明本文的评价标准能够与人眼对图像质量的主观感受保持较好的一致性.进一步研究可将本文的 JND 模型应用于图像的压缩与编码,有利于提高解码图像的感知质量.

参考文献

[1] Daly S. The Visible Differences Predictor: An Algorithm for the Assessment of Image Fidelity [M]. Cambridge: MIT Press, 1993. 179 – 206.

[2] Gao X, Lu W, Tao D, Li X. Image quality assessment based on multiscale geometric analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(7): 1409 – 1423.

[3] Li X, Tao D, Gao X, Lu W. A new natural image quality evaluation metric[J]. Signal Processing, 2009, 89(4): 548 – 555.

[4] Chandler D, M, Hemami S, S. VSNR: A wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(9): 2284 – 2298.

[5] 杨春玲, 高文瑞. 基于结构相似的小波域图像质量评价方法的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 845 – 849.

Yang Chun-ling, Gao Wen-rui. Research on image quality assessment in wavelet domain based on structural similarity[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 845 – 949. (in Chinese)

[6] Zeng W, Daly S, Lei S. An overview of the visual optimization tools in JPEG2000[J]. Signal Processing: Image Communication, 2002, 17(1): 85 – 104.

[7] Ninassi A, Le Meur O, Le Callet P, Barba D. Which semi-local visual masking model for wavelet based image quality metric [A]. IEEE International Conference on Image Processing[C]. San Diego: IEEE Press, 2008. 1180 – 1183.

[8] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans Image Processing, 2005, 14(12): 2091 – 2106.

[9] Peli E. Contrast in complex images[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(10): 2032 – 2040.

[10] Ran X, Farvardin N. A perceptually motivated three-component image model-Part I: Description of the model[J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(4): 401 – 415.

[11] Daly S J, Zeng W, Li J, Lei S. Visual masking in wavelet

compression for JPEG2000[J]. SPIE Symposium on Electronic Imaging, 2000, 3974: 66 – 80.

[12] Zeng W, Daly S J, Lei S. Visual optimization tools in JPEG 2000[A]. International Conference on Image Processing[C]. Vancouver: IEEE Press, 2000. 2: 37 – 40.

[13] Wang Z, Bovik A C, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Trans Image Processing, 2004, 13(4): 600 – 612.

[14] Sheikh H R, Wang Z, et al. Live Image Quality Assessment Database Release 2[EB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/Quality>, 2009.

[15] VQEG, Final Report From the Video Quality Experts Group on the Validation of Objective Models of Video Quality Assessment, Phase II [OL]. <http://www.vqeg.org>, August 2003.

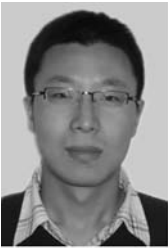


费选男, 生于 1986 年 1 月, 南京理工大学在读博士研究生, 主要研究领域为图像质量评价, 分布式编码理论. E-mail: feixuan@hotmail.com



韦志辉(本文通信作者) 男, 生于 1963 年 11 月, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为基于人类感知的稀疏编码理论及应用. E-mail: gswei@mail.njust.edu.cn

作者简介



孙玉宝 男, 生于 1983 年 9 月, 南京理工大学博士研究生, 主要研究领域为图像感知质量评价, 分布式仿真, 网络虚拟环境设计. E-mail: syb8692833@126.com.



肖亮 男, 1976 年 2 月生, 副教授, 主要研究方向为变分偏微分方程在图像处理中的应用, 三维医学图像处理等. E-mail: xt Xiaoliang@163.com