

图象工程（上）

图 象 处 理

（第3版）

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



第4单元 拓展技术

- 第11章 图象水印
- 第12章 彩色图象处理
- 第13章 视频图象处理
- 第14章 多尺度图象处理

对图象的研究和应用一直是一个活跃的领域，新的理论、新的方法不断涌现，新的技术、新的手段也在不断拓展。基于前三个单元介绍的图象处理技术，进一步拓展。



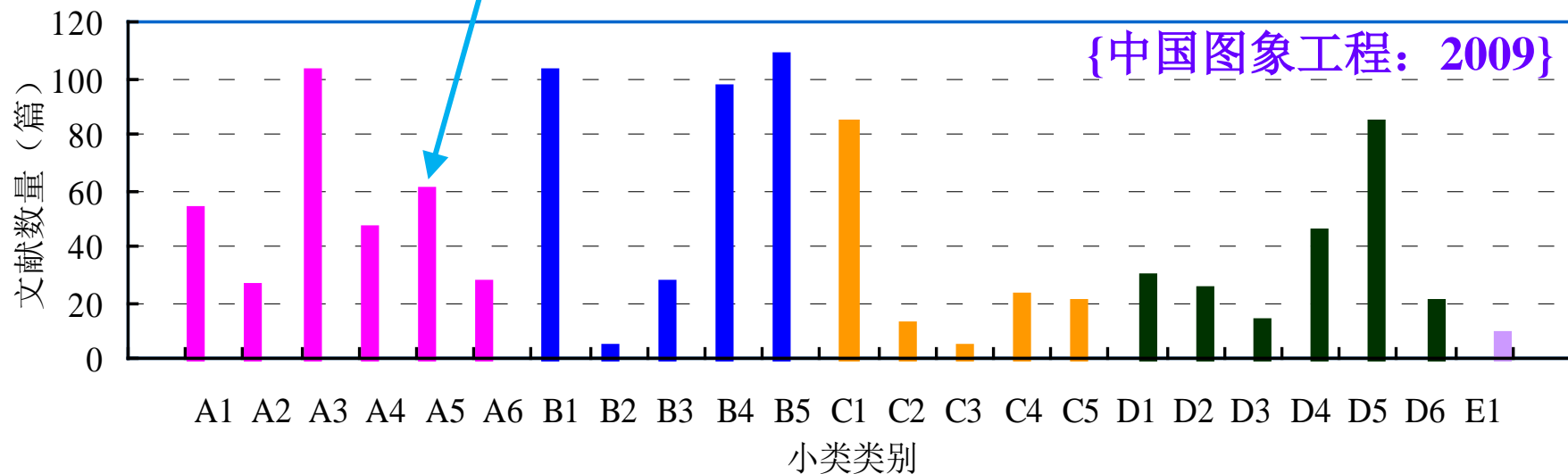
第11章 图象水印

2002年《图象工程》第1版（附册）

2006年《图像工程》第2版（上册）

中国图象工程——A：图象处理

A5：图象数字水印和图象信息隐藏





第11章 图象水印

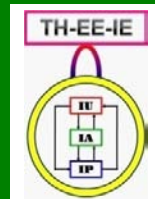
图象水印的主要用途包括

- (1) 版权鉴定：提供证明所有者的信息，从而保护图象产品的版权（著作权）
- (2) 使用者鉴定：可将合法用户的身份记录在水印中，并用来确定非法复制的来源
- (3) 真实性确认：水印的存在可以保证图象没有被修改过
- (4) 自动追踪：通过追踪水印，从而知道何时何地图象被使用，有利于版税征收
- (5) 复制保护：利用水印可以规范对图象的使用，如仅播放而不复制



第11章 图象水印

- 11.1 水印原理和特性
- 11.2 DCT域图象水印
- 11.3 DWT域图象水印
- 11.4 水印性能评判
- 11.5 信息隐藏

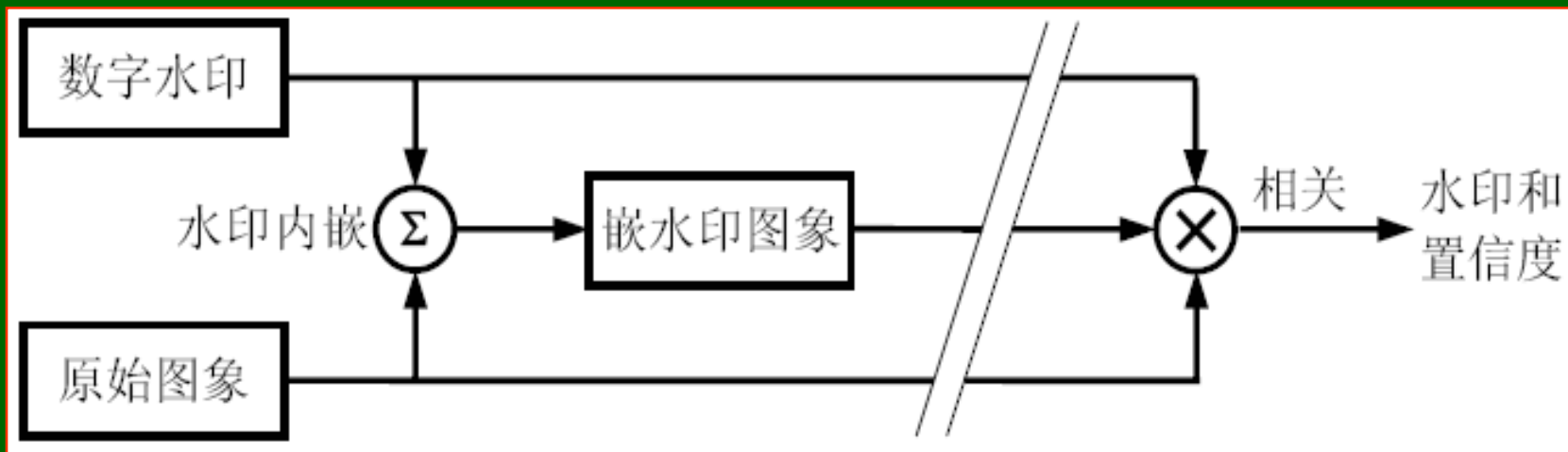


11.1 水印原理和特性

- 11.1.1 水印的嵌入和检测
- 11.1.2 水印特性
- 11.1.3 水印分类

11.1.1 水印的嵌入和检测

- ◆ 利用水印保护数字产品需进行两个操作：
 - 水印的嵌入：在数字产品使用前将水印加入到数字产品中以进行保护
 - 水印的检测：将嵌入到数字产品中的水印提取出来以验证或表明版权

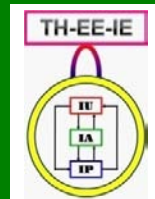


11.1.1 水印的嵌入和检测

- ◆ 设原始图象为 $f(x, y)$ ，水印为 $W(x, y)$ ，嵌入水印的图象为 $g(x, y)$
- 水印嵌入： $g = E(f, W)$
- 给出待检测图象 $h(x, y)$ ，抽取待验证的可能水印 $w(x, y)$ ： $w = D(f, h)$
- 考虑原始水印和可能水印的相关函数 $C(., .)$
如果（ T 为预先确定的阈值）：

$$C(W, w) > T$$

则认为水印存在，否则认为水印不存在



11.1.2 水印特性

1. 显著性

不可感知性或不易察觉性

一是水印不易被接收者或使用者察觉，二是水印的加入不影响原产品的视觉质量

2. 稳健性

抗攻击性或鲁棒性，抵御外界处理的能力

图象产生失真情况下，仍保证其自身完整性和对其检测的准确性

易损水印对外界处理有敏感的反应



11.1.2 水印特性

1. 安全性

指水印不易被复制和伪造的能力，以及不易被非法检测的能力

2. 低复杂性

指水印嵌入和提取的计算复杂度低

3. 唯一性

对所有权有唯一确定的判断

4. 通用性

同样的水印技术是否可适用于不同的媒体



11.1.3 水印分类

3. 含义/内容分类

(1) 无意义水印

- 利用伪随机序列表达有无，难以伪造
- 无水印: $H_0: g - f = n$
- 有水印: $H_1: g - f = w + n$

(2) 有意义水印

- 本身有特定/确切含义（多比特信息）
- 文字串、图标、图象等，可提供的信息多，对其嵌入和检测的要求也高



11.1.3 水印分类

4. 变换域水印

- 尽管图象水印的嵌入可在空域，即图象域中进行的，但大多数图象水印的嵌入都是在变换域中进行的。变换域法的主要优点包括：
 - (1) 水印信号的能量可广泛分布到所有像素上，有利于保证不可见性
 - (2) 可以比较方便地结合人类视觉系统的某些特性，有利于提高稳健性
 - (3) 变换域方法与大多数图象编码国际标准兼容，可直接实现压缩域内的水印算法（此时的水印也称比特流水印），从而提高效率



11.2 DCT域图象水印

{利用AC系数可加强嵌入的秘密性，而利用DC系数可增加嵌入的数据量}

11.2.1 无意义水印算法

11.2.2 有意义水印算法

11.2.1 无意义水印算法

◆ 综合利用DC和AC系数的方案

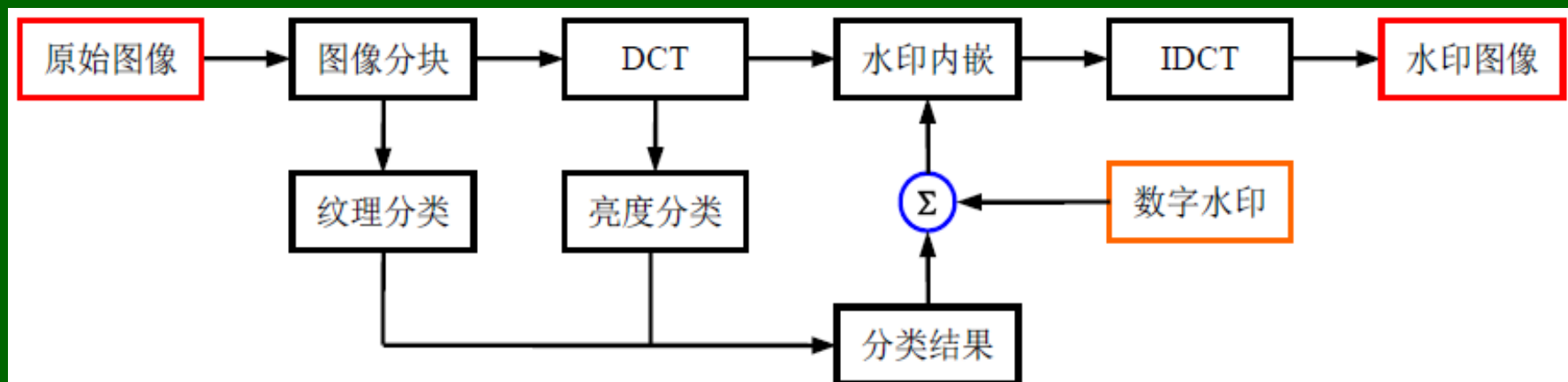
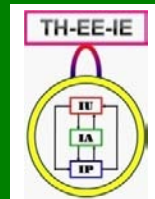


图 11.2.1 DCT 域水印嵌入流程

- 将图象块分为三类：
 - ① 具有低亮度且纹理简单的块（嵌入较少水印）
 - ② 具有高亮度且纹理复杂的块（嵌入较多水印）
 - ③ 其它块（嵌入量适中）



11.2.1 无意义水印算法

◆ 具体步骤/细节

- 产生一个服从高斯分布 $N(0, 1)$ 的随机序列作为拟嵌入的水印 $\{g_m: m = 0, 1, 2, \dots, M-1\}$
- 选取4个DCT系数，即 $F_i(0, 0)$ ， $F_i(0, 1)$ ， $F_i(1, 0)$ 和 $F_i(1, 1)$
- 取随机序列长度为图象分块数的4倍
- 将随机序列乘以适合的拉伸因子后嵌入DCT系数

$$F'_i(u, v) = \begin{cases} F_i(u, v) \times (1 + a \cdot g_m) & m = 4i, \quad (u, v) = (0, 0) \\ F_i(u, v) + b \cdot g_m & m = 4i + \underbrace{2u + v}_{\text{1, 2, 3}}, \quad (u, v) \in \{(0, 1), (1, 0), (1, 1)\} \\ F_i(u, v) & \text{其他} \end{cases}$$

11.2.1 无意义水印算法

◆ 嵌入水印的示例

- 对纹理简单的块, $a = 0.005$; 对纹理复杂的块, $a = 0.01$
- 根据分类结果: 第1类 $b = 3$, 第2类 $b = 9$, 第3类 $b = 6$

原始图

水印图

差值图



图 11.2.2 水印嵌入前后的对比

11.2.1 无意义水印算法

◆ 水印的检测采用假设相关检测方法

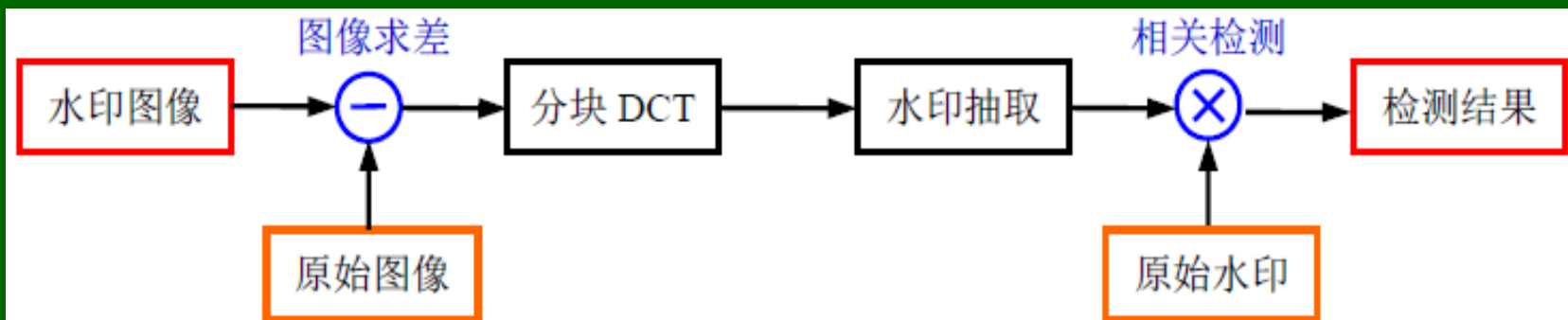


图 11.2.3 水印检测流程

具体步骤

(1) 计算原始图象 $f(x, y)$ 和拟检测图象 $h(x, y)$ 的差

$$e(x, y) = f(x, y) - h(x, y) = \bigcup_{i=0}^{N-1} e_i(x', y') \quad 0 \leq x', y' < 8$$



11.2.1 无意义水印算法

(2) 对差图象的每个块计算DCT

$$E_i(u', v') = \text{DCT}\{e_i(x', y')\} \quad 0 \leq x', y' < 8$$

(3) 从DCT图象块提取可能的水印序列

$$w_i(u', v') = \{g_j, j = 4i + 2u' + v'\} = E_i(u', v')$$

(4) 计算可能的水印和原嵌入水印的相关性，并作出判断

$$C(W, w) = \frac{\sum_{j=0}^{4N-1} (w_j \cdot g_j)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{4N-1} w_j^2}}$$



11.2.2 有意义水印算法

- ◆ 对上述水印方案进行改进，可得到用于有意义水印的算法
 - (1) 构造符号集（有意义符号）
 - (2) 将每个符号对应一个二值序列
 - (3) 序列中“0”和“1”出现服从Bernoulli分布（保证随机性）
 - (4) 将序列扩展成（符号数的）整倍数
 - (5) 将扩展序列加到DCT块的系数中



11.2.2 有意义水印算法

◆ 对有意义水印检测的前三个具体步骤与对无意义水印的检测相同{P.257}

◆ 在第四个步骤中，设第 i 次提取时， w_i^* 是提取出的信号强度； w_i^k 是第 k 个匹配滤波器的输出，它们之间的相关为

$$C_k(w^*, w^k) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} (w_i^* \cdot w_i^k)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} (w_i^*)^2}}$$

其中 M 是匹配滤波器的维数

给定 j , $64 \geq j \geq 1$ $C_j(w^*, w^j) = \max [C_k(w^*, w^k)] \quad 1 \leq k \leq 64$

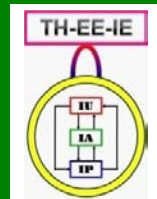


11.3 DWT域图象水印

{优点源自小波变换（9.4节）的特性}

11.3.1 人眼视觉特性

11.3.2 小波水印算法

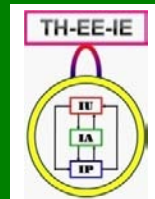


11.3.1 人眼视觉特性

人眼视觉特性 (P. 259)

- (1) 亮度掩蔽特性：越亮越不敏感
- (2) 纹理掩蔽特性：越强越不敏感
- (3) 频率特性：越高越不敏感
- (4) 相位特性：比模更不敏感
- (5) 方向特性：斜比水平/垂直不敏感

➤ 基于人眼视觉掩盖特性的视觉阈值 $T(u, v, l, d)$



11.3.1 人眼视觉特性

掩盖特性和视觉阈值

(1) 人眼对不同方向不同层次的高频子带图象的噪声不太敏感，另外对45°方向的子带（如HH子带）图象的噪声也不太敏感

掩盖因子： $D(l, s)$

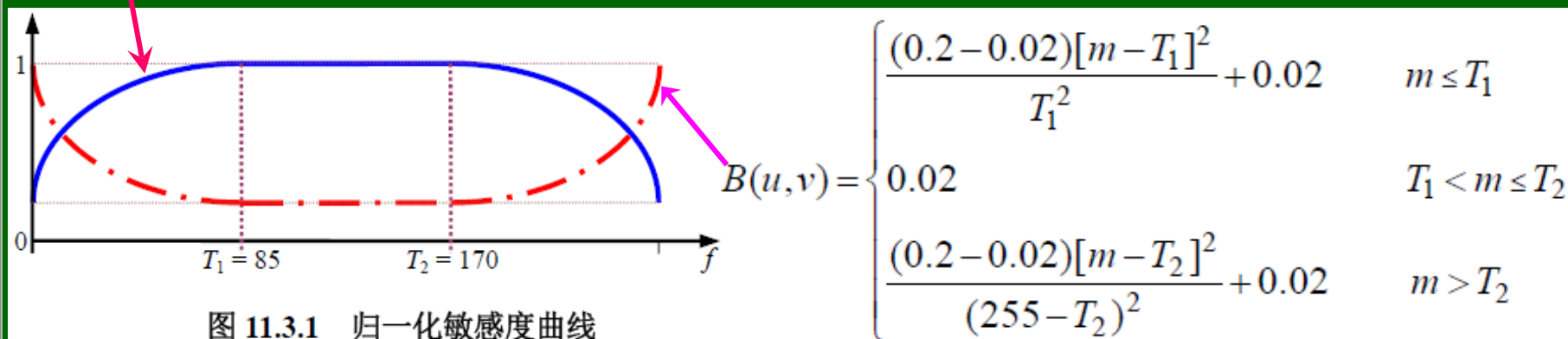
$$D(l, s) = D_l \times D_s \quad D_s = \begin{cases} \sqrt{2} & s \in \text{HH} \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad D_l = \begin{cases} 1 & l=0 \\ 0.32 & l=1 \\ 0.16 & l=2 \\ 0.1 & l=3 \end{cases}$$

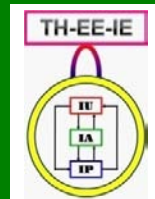
11.3.1 人眼视觉特性

掩盖特性和视觉阈值

(2) 人眼对不同亮度区域噪声的视觉敏感性不同，通常对中等灰度最为敏感，而趋向低灰度和高灰度两个方向敏感度都非线性下降

掩盖因子： $B(u, v)$ ，图象块均值为 m





11.3.1 人眼视觉特性

掩盖特性和视觉阈值

(3) 人眼对图象平滑区噪声较敏感而对纹理区噪声较为不敏感。可根据图象分块区域的熵值来计算纹理掩盖效应

掩盖因子： $H(u, v)$ ，块的熵值为 H

$$H(u, v) = k \frac{H - \min(H)}{\max(H) - \min(H)}$$

综合

$$T(u, v, l, s) = D(l, s)B(u, v)H(u, v)$$

11.3.2 小波水印算法

1. 水印嵌入

- ◆ 选用具有高斯分布 $N(0, 1)$ ，长度为 M 的实数随机序列作为水印 W ，即 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_M\}$
- ◆ 基本嵌入流程与DCT域类似

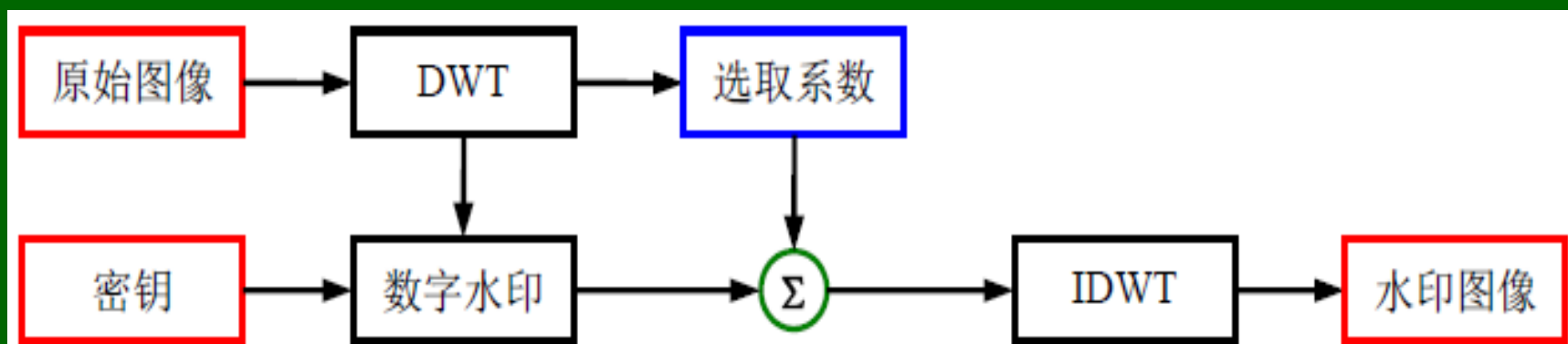
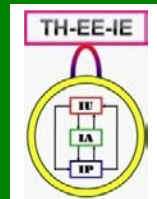


图 11.3.2 小波域水印嵌入流程



11.3.2 小波水印算法

1. 水印嵌入

- (1) 小波变换，分别得到一个逼近子图（最低频子带）和 $3L$ 个细节子图（含高频子带）
- (2) 计算高频子图象内的人眼视觉掩盖特性的视觉阈值 $T(u, v, l, s)$ ，并选择小波系数插入水印
- (3) 嵌入水印（即用水印序列来调制前 N 个小波系数）
$$F'(u, v) = F(u, v) + qw_i$$
- (4) 将嵌入水印的高频子图象结合低频子图象一起进行小波反变换，得到嵌水印图象 $f'(x, y)$

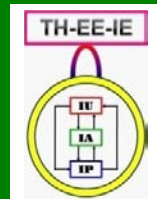


11.3.2 小波水印算法

2. 水印检测

- ◆ 对原始图象 I 和待测图象 I'' （有可能与原嵌入水印图象 I' 不同）都进行 L 级小波分解，得到各自的1个最低频子带和 $3L$ 个高频子带
- ◆ 依次比较两图系数的值，提取重要系数集 S''
- ◆ 提取出待测水印序列 $W'' = \{w_1', w_2', \dots, w_M'\}$
- ◆ 计算

$$C_N(W, W'') = \frac{\sum_{i=1}^L (w_i - W_m)(w''_i - W''_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (w_i - W_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^L (w''_i - W''_m)^2}}$$



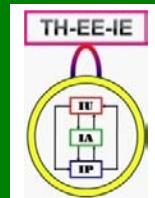
11.4 水印性能评判

{对水印性能的检测和评价与所关心的水印特性和指标密切相关}

11.4.1 失真测度

11.4.2 基准测量和攻击

11.4.3 水印性能测试示例



11.4.1 失真测度

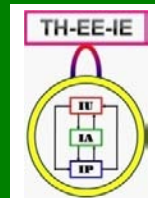
差失真测度

(1) L^p 范数

$$D_{L^p} = \left\{ \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} |g(x, y) - f(x, y)|^p \right\}^{1/p}$$

(2) 拉普拉斯均方误差

$$D_{\text{lmse}} = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\nabla^2 g(x, y) - \nabla^2 f(x, y)]^2}{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [\nabla^2 f(x, y)]^2}$$



11.4.1 失真测度

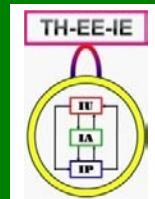
相关失真测度

(1) 归一化互相关

$$C_{\text{ncc}} = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) f(x, y)}{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f^2(x, y)}$$

(2) 相关品质

$$C_{\text{cq}} = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) f(x, y)}{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)}$$

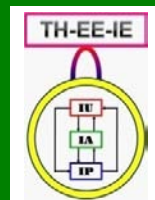


11.4.2 基准测量和攻击

1. 基准测量方法

基准测量 (benchmarking)

- 先确定一定的图象/视频数据
- 嵌入尽可能多但还不至于导致非常影响视觉质量 (根据某种测度) 的水印
- 对嵌入水印的数据进行处理或攻击
- 通过测量所产生误差的比例来估计水印方法的性能



11.4.2 基准测量和攻击

1. 基准测量方法

(1) 稳健性基准测量

表 11.4.1 用于检测稳健性的处理方法和相关参数

序号	处理操作	参数
1	JPEG 压缩	质量因子
2	模糊	模板尺寸
3	噪声	噪声幅度
4	伽马校正	伽马指数
5	像素对换	模板尺寸
6	马赛克（滤波）	模板尺寸
7	中值滤波	模板尺寸
8	直方图均衡化	



11.4.2 基准测量和攻击

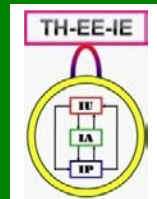
1. 基准测量方法

(2) 感知性基准测量

视觉质量测度采用了失真测度

该失真测度考虑人类视觉系统的对比敏感度和掩模特性，对超过视觉阈值（JND）的点进行计数

JND可用来确定在图象各个部分所能容忍的水印信号的最大强度，从而避免水印的嵌入破坏图象的视觉质量。换句话说，就是利用人类视觉模型来确定与图象相关的调制掩模



11.4.2 基准测量和攻击

2. 攻击分析示例

对水印的攻击是未经授权的操作

- (1) 检测：例如一个水印产品的使用者检测了本应由所有者才检测的水印，这也称**被动攻击**
- (2) 嵌入：例如一个水印产品的使用者对产品嵌入了一个本应由所有者才能嵌入的水印，这也称**伪造攻击**
- (3) 删除：例如一个水印产品的使用者删除了本应由所有者才有权删除的水印

11.4.3 水印性能测试示例

1. DCT域无意义水印性能的测试

(1) 稳健性

均值滤波

$$P_{SNR}=22\text{dB}$$

亚采样

$$P_{SNR}=21\text{dB}$$

压缩图象

$$P_{SNR}=19\text{dB}$$

加噪声

$$P_{SNR}=12\text{dB}$$



(a)



(b)



(c)



(d)

图 11.4.1 水印对图像处理操作稳健性的检验示例

11.4.3 水印性能测试示例

1. DCT域无意义水印性能的测试

(2) 唯一性

由 $N(0, 1)$ 的高斯分布产生10000个随机序列，选其中一个序列作为嵌入水印而将其它序列作为对比水印进行测试

真水印很易与假水印区别开

表 11.4.2 对水印唯一性的测试结果

图像处理操作	原始图	均值滤波	亚抽样	压缩
与嵌入水印的相关	114.5	13.8	23.6	12.4
与其他序列的相关（最大值）	3.82	4.59	3.58	3.98

11.4.3 水印性能测试示例

2. DCT域有意义水印性能的测试

另两幅测试图象

(1) 对均值滤波
的稳健性



表 11.4.3 对均值滤波稳健性的测试结果

图像	3 × 3		5 × 5		7 × 7	
	峰值信噪比/dB	正确符号数	峰值信噪比/dB	正确符号数	峰值信噪比/dB	正确符号数
Lena	25.6	8	21.5	8	19.4	3
Flower	31.4	8	25.6	8	22.5	3
Person	19.3	8	12.4	4	9.4	1

11.4.3 水印性能测试示例

2. DCT域有意义水印性能的测试

(2) 对亚采样的 稳健性



表 11.4.4 对亚采样稳健性的测试结果

图像	1 : 2		1 : 4		1 : 8	
	峰值信噪比/dB	正确符号数	峰值信噪比/dB	正确符号数	峰值信噪比/dB	正确符号数
Lena	20.8	8	15.5	4	12.0	1
Flower	24.2	8	17.2	5	13.5	1
Person	12.8	8	6.6	0	4.6	0

11.4.3 水印性能测试示例

2. DCT域有意义水印性能的测试

(3) 对JPEG压缩的稳健性

对每幅实验图象嵌入的符号序列尺寸是变化的，从1到128。表中给出的数值是能将整个符号序列完全正确检测出来时的图象峰值信噪比（PSNR）的最低值

表 11.4.5 对 JPEG 压缩稳健性的测试结果（单位：dB）

图像 \ 序列长度	1	2	4	8	16	32	64	128
Lena	23.4	25.4	26.5	27.2	28.3	30.5	34.5	36.5
Flower	15.4	20.4	20.6	20.6	21.6	22.2	35.3	38.3
Person	23.3	24.3	25.8	26.7	26.8	26.8	26.9	38.4

11.4.3 水印性能测试示例

3. 小波域水印性能的测试

表 11.4.6 水印对一些图像处理和攻击的抵抗能力

处理/攻击方式	图像的 PSNR/dB	归一化相关系数 C_N
均值滤波	19.35	0.908
高斯噪声	16.78	0.537
JPEG 压缩 (压缩比为 37:1)	27.15	0.299
中值滤波	32.00	0.689
锐化	34.19	0.969
2×2 马赛克效果	29.62	0.531

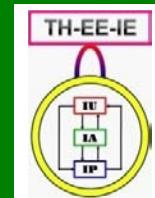


11.5 信息隐藏

{一个比较广泛的概念，一般指将某些特定的信息有意地和隐蔽地嵌入某种载体，以达到某种保密的目的}

11.5.1 水印与信息隐藏

11.5.2 基于迭代混合的图象隐藏



11.5.1 水印与信息隐藏

根据是否对特定信息本身存在性的保密或不保密，信息隐藏可以是隐秘的或非隐秘的

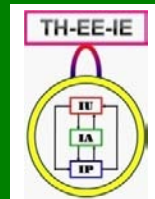
根据这些特定信息与载体相关或不相关，信息隐藏又可分为水印类型的或非水印类型的

表 11.5.1 信息隐藏技术分类

	与载体相关	与载体不相关
隐藏信息存在性	(1) 隐秘水印	(3) 秘密通信
已知信息存在性	(2) 非隐秘水印	(4) 秘密嵌入通信

水印

非水印



11.5.1 水印与信息隐藏

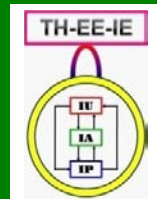
(1) 隐秘水印

隐秘术将（需保密的）信息隐藏在另一（可公开的）信息/数据中。水印常还多一个要求，即抗击可能攻击的稳健性/鲁棒性

水印系统所隐藏的信息总是与被保护的产品结合在一起的，而隐秘术系统仅考虑隐藏信息而不关心载体

(2) 非隐秘水印

水印并不总需要隐藏



11.5.1 水印与信息隐藏

(3) 秘密通信

秘密通信时常采用隐蔽信道，而且嵌入的信息是与载体无关的，这里嵌入的信息是接收方需要的而载体并不是接收方需要的，载体只是用来帮助传输嵌入的信息

(4) 秘密嵌入通信

嵌入通信指通过公开通道传输秘密信息，该信息被嵌入到公开的信号中但与该信号无关，所以不是水印

11.5.2 基于迭代混合的图象隐藏

1. 图象混合

$$b(x, y) = \alpha f(x, y) + (1 - \alpha)s(x, y)$$

α 为0或1时称为平凡混合

载体图象 f

隐藏图象 s

混合图象 b



图 11.5.1 图像混合示例

11.5.2 基于迭代混合的图象隐藏

1. 图象混合

当混合参数 α 接近1时, 混合图象 $b(x, y)$ 就接近于图象 $f(x, y)$; 当混合参数 α 接近0时, 混合图象 $b(x, y)$ 就接近于图象 $s(x, y)$

$$s(x, y) = \frac{b(x, y) - \alpha f(x, y)}{1 - \alpha}$$

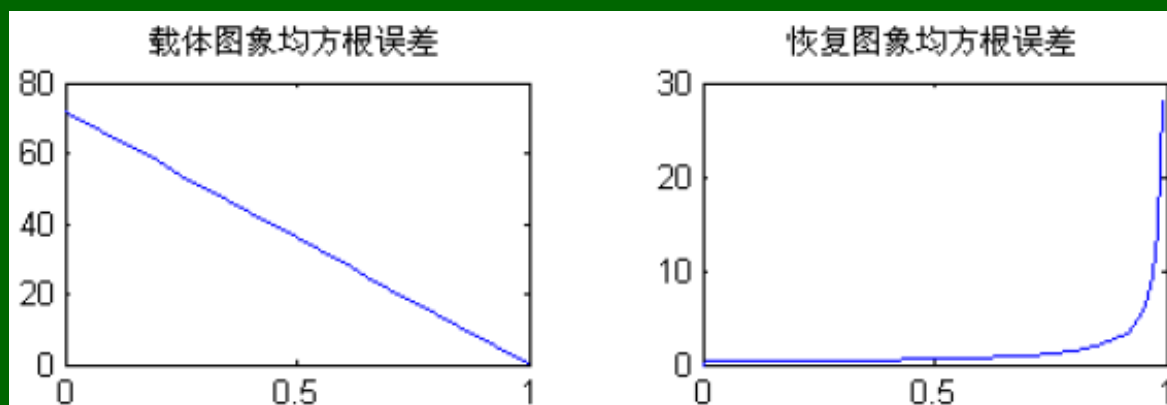


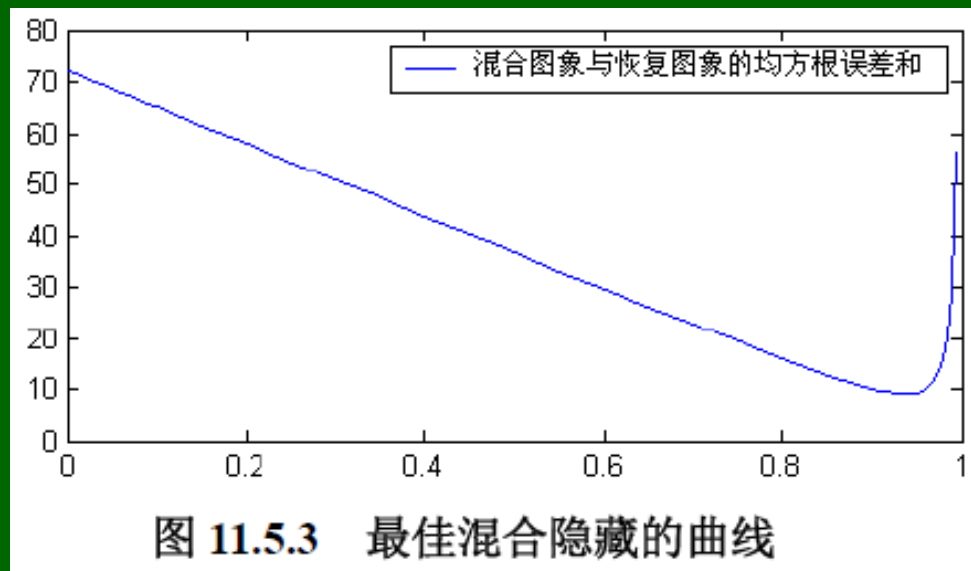
图 11.5.2 混合及恢复图像的质量与混合参数的关系

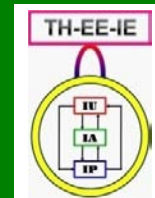
11.5.2 基于迭代混合的图象隐藏

1. 图象混合

混合参数越接近1，图象隐藏的效果就越好，而恢复图象的质量就越差。反之，如果要求恢复的图象效果好，则混合参数就不能太接近1，但这样图象隐藏的效果可能不太好

存在最佳的混合隐藏，即能使混合图象与恢复图象误差和最小的图象混合





11.5.2 基于迭代混合的图象隐藏

2. 图象的单幅迭代混合

设 $\{\alpha_i \mid 0 \leq \alpha_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, N\}$ 为 N 个实数

- 对图象 $f(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 进行 α_1 混合得

$$b_1(x, y) = \alpha_1 f(x, y) + (1 - \alpha_1)s(x, y)$$

- 对图象 $f(x, y)$ 和 $b_1(x, y)$ 进行 α_2 混合得

$$b_2(x, y) = \alpha_2 f(x, y) + (1 - \alpha_2)b_1(x, y)$$

- 依次进行混合可得

$$b_N(x, y) = \alpha_N f(x, y) + (1 - \alpha_N)b_{N-1}(x, y)$$



11.5.2 基于迭代混合的图象隐藏

3. 图象的多幅迭代混合

单幅迭代混合算法将一幅秘密图象隐藏在一幅载体图象中

如果攻击者截获了载体图象和混合图象并产生了怀疑，则攻击者借助原始载体图象就有可能通过相减恢复出秘密图象

设 $f_i(x, y) (i=1, 2, \dots, N)$ 为一组载体图象， $s(x, y)$ 为一幅隐藏图象， $\{\alpha_i | 0 \leq \alpha_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, N\}$ 为给定的 N 个实数



11.5.2 基于迭代混合的图象隐藏

3. 图象的多幅迭代混合

对图象 $f_1(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 进行 α_1 混合得

$$b_1(x, y) = \alpha_1 f_1(x, y) + (1 - \alpha_1) s(x, y)$$

对图象 $f_2(x, y)$ 和 $b_1(x, y)$ 进行 α_2 混合得

$$b_2(x, y) = \alpha_2 f_2(x, y) + (1 - \alpha_2) b_1(x, y)$$

依次进行混合可得

$$b_N(x, y) = \alpha_N f_N(x, y) + (1 - \alpha_N) b_{N-1}(x, y)$$

图象 $b_N(x, y)$ 称为图象 $f(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 关于 α_i 和 $f_i(x, y)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 的 N 重迭代混合图象



联系信息



- ☞ 通信地址：北京清华大学电子工程系
- ☞ 邮政编码：100084
- ☞ 办公地址：清华大学，罗姆楼，6层305室
- ☞ 办公电话：(010) 62798540
- ☞ 传真号码：(010) 62770317
- ☞ 电子邮件：zhang-yj@tsinghua.edu.cn
- ☞ 个人主页：oa.ee.tsinghua.edu.cn/~zhangyujin/