

结合视觉感知特性和湿纸编码的视频隐写算法*

张敏情^{1,2}, 王 珏², 钮 可²

(1. 西安电子科技大学 计算机网络与信息安全教育部重点实验室, 西安 710071; 2. 武警工程大学 电子技术系 网络与信息安全武警部队重点实验室, 西安 710086)

摘 要: 利用双树复小波变换提取出视频图像的运动特征图、对比敏感图、纹理特征图和场景变化情况, 综合确定视觉不敏感点, 从而构造出用于嵌入秘密信息的隐写位置图, 并结合湿纸编码实现了信息的隐写。算法不需要接收者知道具体的嵌入位置便能够实现信息的提取, 避免了重复获得隐写位置图的大量运算, 并且不必考虑增加冗余以修正隐写操作引起的隐写位置重新判断误差, 提高了提取效率和安全性。实验表明, 算法具有较高的嵌入容量和良好的隐写不可见性, 可以满足隐蔽通信的要求。

关键词: 视频隐写; 视觉感知特性; 双树复小波变换; 隐写位置图; 湿纸编码

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2228-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.060

Video steganography algorithm based on visual perception characteristics and wet paper codes

ZHANG Min-qing^{1,2}, WANG Jue², NIU Ke²

(1. Key Laboratory of Computer Network & Information Security of the Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Key Laboratory of Network & Information Security of APF, APF of Engineering University, Xi'an 710086, China)

Abstract: By using the dual-tree complex wavelet transform (DT-CWT), this paper extracted video images' motion feature maps, contrast sensitivity maps, texture maps and scene changing points, and used all above to get the least sensitive points to compose the embedding location maps, and then uses wet paper coding to hide messages. The recipient did not need to know the specific location of the embedded information to achieve secret message extraction, and that avoided a large number of operational costs. More than that, it avoided increasing the redundancy to correct the error when determining the embedding position again. Therefore, the algorithm obtained a high safety and extraction efficiency. Experiments show that the algorithm can meet the requirements of steganography embedding capacity and the invisibility of covert communication.

Key words: video steganography; visual perception characteristics; dual-tree complex wavelet transform (DT-CWT); embedding location map; wet paper codes

0 引言

在图像隐写过程中, 结合人眼视觉感知特性, 控制隐写信息嵌入的位置和强度, 在保证较大的隐写容量的同时, 可以获得更好的视觉不可见性。视频由一系列帧序列组成, 信号空间更大, 作为隐写载体具有容量大、隐蔽性好的特点。目前结合视频视觉感知特性的隐写研究也越来越受到重视。视频的人眼感知特性包括空间特性和时间特性。空间特性主要有视频图像的对比掩蔽、亮度掩蔽、纹理掩蔽等效应及边缘效应; 时间特性主要包括运动注意机制和场景变化注意机制。

在人眼视觉系统(HVS)的空间特性方面, 图像背景亮度越高, 纹理越多越复杂, HVS对其变化的敏感性就越低, 可以获得更大的隐写容量。对于对比掩蔽效应, 文献[1]用CSF(contrast sensitivity function)体现HVS对对比度的感知随空间频率发生变化这一特性, 结合视角方向和背景亮度来综合度量。对于边缘效应, 虽然物体边缘区域纹理复杂, 但HVS对边缘区域的敏感度却介于平滑和随机纹理区域之间。可以通过

对DCT直流系数图进行Sobel边缘检测, 构建边缘图从而加以应用处理, 并且通常可以将边缘区域作为特别的纹理区域进行考虑。对于纹理掩蔽效应, 文献[2]在空间域中通过构造噪声函数测量 2×2 图像块的噪声水平(noisy level, NL)来度量图像局部的空间复杂性, 并在NL大的块中进行隐写。文献[3]通过变换系数块的标准方差进行纹理复杂性估计, 可得到LL子带一点所对应的实际图像中 8×8 块的纹理特征。文献[1]用DCT系数中频和低频部分的绝对值之和定义块纹理能量, 并将DCT块划分为纹理块、边缘块和平滑块, 以此计算DCT块的纹理掩蔽因子。

在时间感知特性方面, 帧中物体运动或变化得越快, HVS对其改变的敏感性就越低, 同时HVS对于处于场景变化时的帧敏感性也较低, 在保证视觉不可见性的前提下, 可以在这些帧或者图像块中嵌入更多信息。文献[4]通过寻找相邻帧DCT直流系数图的变化峰值来定位场景变化帧。文献[3]在小波变换域中, 通过计算相邻帧小波域低频子带中系数的差来进行运动检测。

收稿日期: 2011-10-15; **修回日期:** 2011-11-29 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60842006); 武警工程大学基础基金项目(wjy201127)

作者简介: 张敏情(1967-), 女, 教授, 研导, 主要研究方向为密码学、信息安全; 王珏(1987-), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 主要研究方向为信息安全(wangjue_wj@163.com); 钮可(1981-), 男, 浙江湖州人, 助教, 主要研究方向为视频隐写、数字水印。

综合考虑人眼视觉系统的所有感知特性往往比较复杂,文献[1]提出利用拉普拉斯分布的累积分布函数对所有感知掩蔽因子进行调制,得到所有位置的失真掩蔽测度,由此确定各处的隐写强度。另一种方式是综合各种感知因素,确定视觉不敏感点,作为嵌入位置实现信息隐写。

无论是利用视觉特性确定隐写强度还是隐写位置,都需要接收者重复隐写端的视觉特性提取操作,隐写的安全性不仅取决于密钥的安全性,还取决于算法的保密性,这为攻击者提供了攻击途径。另一方面,接收者用于提取信息的载秘像素集会受到嵌入操作自身的影响,通常还需要增加冗余来保证特征提取的一致性,降低了隐写容量,增加了算法复杂性。

为方便隐写方自由选择隐写位置,研究者提出了一种湿纸编码,接收者可以在不知道嵌入位置的情况下实现秘密信息的提取。所谓“湿纸”,是指被水部分打湿的纸张,其中“湿”的部分不能用于写字,只能利用“干”的部分传输信息。在隐写操作中,“湿纸”代表隐写载体,其中只有部分“干”的位置采用湿纸编码加以修改嵌入秘密信息。接收者得到该“湿纸”后,读取“纸”上所有信息,在不知道哪些位置原本是“干”的情况下,利用密钥就能提取出通过湿纸编码隐藏的信息^[5]。

本文结合双树复小波变换提取视频的人眼时间和空间感知特征,从而确定隐写位置,并利用湿纸编码不需要共享隐写位置选择算法的特点,实现了秘密信息的隐写和提取。

1 双树复小波变换提取视觉特征

传统的小波变换分析图像特征具有良好的时间频率局部特性和多分辨率分析特性,但是缺乏方向选择性和平移不变性,限制了其特征描述能力。利用离散小波变换(DWT)进行纹理分类,虽然具有平移不变性,但也存在数据冗余度高、计算量大等问题。双树复小波变换(DT-CWT)不但继承了传统小波变换的优点,还具有近似平移不变性、良好的方向选择性、有限的冗余和高效的计算等特性^[6]。复小波变换(CWT)滤波器的 Gabor-like 特征和人眼视觉系统近似,可使隐写信息的能量更接近信息载体,CWT 系数相位的空间变化近似线性,可用于记录图像的几何形变^[7],这些性质使得 DT-CWT 能够更好地胜任视频隐写中对视觉特性的提取。

DT-CWT 采用两个分别使用不同滤波器组的 DWT,各个滤波器组满足完全重构条件。对图像的行和列分别进行 DT-CWT 变换,将 DT-CWT 变换从一维扩展到二维,在每个尺度下,生成两个代表图像平均亮度的低频子带图和六个代表图像纹理信息的复系数高频子带图。一幅大小为 $m \times n$ 的图像经过 DT-CWT 分解后,得到 $S=1, \dots, L$ 级子图,每一级大小为 $m/2s \times n/2s$ 。抽取其中一级分解后的某个像素点 C ,可用复数系数表示为 $C = \{\rho_1 e^{i\theta_1}, \dots, \rho_6 e^{i\theta_6}\}$,对应六个子带方向,分别为 $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, -75^\circ, -45^\circ, -15^\circ$ ^[6]。

1.1 时间感知特性

1.1.1 提取场景变化帧

视频序列可以分成若干慢速单场子序列,可以通过计算相邻帧低频子带系数变化峰值来进行场景侦测,从而定位场景变化帧。对视频帧进行 DT-CWT 变换,提取出每帧 1 级分解后的低频子带系数。利用式(1)计算相邻帧低频子带系数变化情况:

$$\Delta L(F_i, F_{i+1}) = \sum_{k=1}^N \frac{(L_i(k) - L_{i+1}(k))^2}{(L_i(k) + L_{i+1}(k))^2} \quad (1)$$

其中: F_i, F_{i+1} 代表第 i 帧和第 $i+1$ 帧; $L_i(k)$ 为第 i 帧第 k 个像

素点的低频子带幅值; N 为 1 级子图总像素数。

利用相同方法求出后续帧对应的 $\Delta L(F_i, F_{i+1})$,并对其求极大值点,对应的 F_i, F_{i+1} 就是不同场景的两个相邻帧。

1.1.2 提取运动特征

提取运动特征是通过检测当前帧 DT-CWT 变换后低频子带相对于前一帧低频子带的变化,将当前帧的低频子图像分割成静止区域和运动区域。具体步骤如下:

a) 计算当前帧 F_i 和下一帧 F_{i+1} 低频子带对应像素 P_k 的系数差:

$$\Delta L_i(k) = [L_i(k) - L_{i+1}(k)]^2 \quad k=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

b) 将 $\Delta L_i(k)$ 同设定的阈值 TL_1, TL_2 进行比较,标记出运动点和静止点。其中, TL_1, TL_2 ($TL_1 < TL_2$) 由用户根据载体视频特征和隐写容量需求预先设定,而标记规则如下:(a) 如果 $\Delta L_i(k) < TL_1$, 像素 P_k 标记为静止点;(b) 如果 $\Delta L_i(k) > TL_2$, 像素 P_k 标记为运动点;(c) 如果 $TL_1 \leq \Delta L_i(k) \leq TL_2$, 则计算以 P_k 为中心 3×3 块中静止点的个数,若多于四个,则将 P_k 标记为静止点;反之标记为运动点。

如果两个相继帧中有较大的平坦区在运动,则平坦区在前两帧中可能有部分重叠。这样通过阈值对所有像素点进行标记后,会将重叠部分误判为静止区域,影响运动物体的整体性^[3]。事实上,HVS 对于较大平坦运动区域的中心部分同样较为敏感,用上述标记法能够较好地分出视频帧的不同视觉敏感区。

1.2 空间感知特性

1.2.1 对比掩蔽效应

与 DWT 相似,DT-CWT 域中的低频子图是主图的两个近似,并且有相似的直方特性。低频子带的系数主要受亮度影响。HVS 对中度灰度区域最敏感,敏感度随着灰度值移向两端而降低。所以第 i 帧第 k 个像素点的亮度掩蔽可描述为

$$B_i(k) = 1 - [(L_i(k) - L_{im})/L_{imax}]^2 \quad (3)$$

其中: L_{im} 为第 i 帧低频子带的平均系数, L_{imax} 为其中的最大系数。此式可以很好地用于估计背景亮度的影响,找出高频子带像素的尺度因子^[7]。

将 $B_i(k)$ 与设定的阈值区间 $[TB_1, TB_2]$ 进行比较,若落在区间外,则将像素标记为对比不敏感点;反之,标记为对比敏感点。

1.2.2 纹理掩蔽效应

DT-CWT 域中的高频子带为高能量区域,对应图像剧烈变化部分,如边缘区域和纹理区域;而低频子带为低能量区域,对应平滑区域。利用高频子带系数计算每个像素点的能量值大小,得到整体的能量图,对应于整体的纹理特征图。通过阈值便能将视频帧划分为平滑区和纹理区。

设像素点 P_k 对应的六个高频子带系数分别为 $H_1(k), H_2(k), \dots, H_6(k)$, 则 P_k 的能量可以表示为

$$E(k) = \sum_{j=1}^6 H_j(k) \quad (4)$$

对视频帧求出所有点的能量 $E(k)$, 与设定的阈值 TE 进行比较,标记出高能量点和低能量点,便得到该帧图像的纹理特征图。实验中,分别将 I, P 和 B 帧的阈值设置为能量图中最大值的 5%、10% 和 20% 就能够较好地提取出各帧的纹理特征^[6]。

1.3 综合视觉感知特性确定隐写位置图

通过前面分析载体的时空特征,将载体视频进行了分类:

a) 视频帧分类:非场景变化帧 A , 场景变化帧 B ;

b) 帧区域分类:

(a)按运动注意机制:静止点 a,运动点 b;

(b)按纹理掩蔽机制:平滑区 1,纹理区 2,边缘区 3。

根据这些分类,结合人眼视觉感知特性,确定实施隐写操作的位置,即确定隐写位置图。具体规则如下:

a)对于场景变化帧 B 不区分静止点 a 和运动点 b,在其纹理区 2 和边缘区 3 进行嵌入,即将 ba2、ba3、bb2、bb3 型的像素标记为嵌入位置,用“1”表示。

b)对于非场景变化帧 A ,只要像素点满足运动点、纹理区、边缘区其中一项,就将其标记为嵌入位置,即将 ab1、ab2、ab3、aa2、aa3 型的像素位置标记为“1”。

c)将其他类型的像素标记为“0”。

这样,便对每一帧图像得到了一张由 $[0,1]$ 矩阵标记的隐写位置图。

2 隐写编码

2.1 秘密信息预处理

为进一步提高视频传输的安全性以及秘密信息提取的准确性,在秘密信息嵌入前,对待嵌入的比特流进行预处理,使用 M 序列对秘密信息的位置进行伪随机排序^[8],并在嵌入时使用 BCH 纠错码对秘密信息进行纠错,以提高秘密信息抵抗攻击的能力,保证能够正确提取秘密信息。纠错编码的实质是利用信息码元和监督码元的约束关系来判定通信中错误的位置并加以纠正,从而保证通信的可靠性^[9]。

假设秘密信息长度为 N ,用 M 序列 $g = \{q_i\} (0 \leq i \leq N-1)$ 作为位置序列对秘密信息进行伪随机排序,由于 M 序列的周期恰好为 $N=2^l$ (指数 l 为移位寄存器个数),则伪随机排序结果可简单描述为

$$s_i = m_{q_i} \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (5)$$

其中: s_i 为经过位置伪随机排序的秘密信息。

2.2 利用湿纸编码进行隐写嵌入

将前面得到的隐写位置图作为湿纸编码的索引图,标记为“1”的像素即为“干”的部分,用于嵌入信息,标记为“0”的像素即为“湿”的部分,不作修改。具体操作步骤如下:

a)逐次读取第 i 帧的 N 个载体像素的亮度分量最低有效位 LSBs,组成载体向量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$,并从索引图中读出对应的索引集 $C, C \subset \{0, 1, \dots, N-1\}, |C| = M$,即 X 中有 M 位“干”的可用做隐写。

b)由第 i 帧的种子 Key_i 和 M'_i 生成一个 $N \times M'$ 的伪随机二元矩阵 A 。

c)根据索引集 C 修改 X 中“干”的部分,将需要隐写的 M' 比特信息 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_{M'}]$ 表示为 $Y = X' \cdot A$ 。

d)将修改后的 X' 保存回原像素的 LSB,并存储每一帧的 Key_i 和 M'_i 。

3 算法设计

3.1 隐写算法

本文通过对视频帧进行 DT-CWT 变换,利用变换系数提取视频的纹理特征图,对比敏感图、运动特征图和场景变化点等视觉感知特征,确定出隐写位置图,而后结合湿纸编码按隐写位置图实现秘密信息的嵌入。隐写流程如图 1 所示。

如果第 i 帧为最后一帧,则不进行场景变化检测 and 提取运动特征,只提取纹理特征图,将其作为非场景变化帧,并借用上一帧的运动特征图。

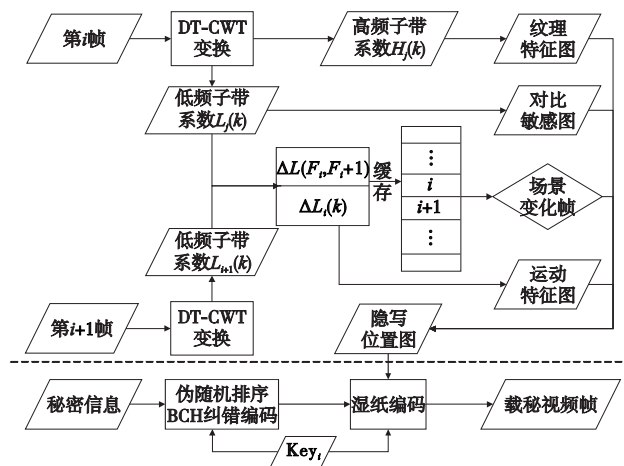


图1 隐写流程

具体的隐写过程如下:

- 读取第 i 帧和第 $i+1$ 帧,对其进行 1 级 DT-CWT 变换。
- 取出第 i 帧第 k 个像素 P_k 的六个高频子带系数 $H_j(k)$,由式(4)计算出 P_k 的能量 $E(k)$ 。
- 取出第 i 帧和第 $i+1$ 帧对应像素 P_k 的低频子带系数 $L_i(k)$ 和 $L_{i+1}(k)$,通过式(2)计算出系数差 $\Delta L_i(k)$,与阈值 TL_1, TL_2 进行比较,标记为静止点或运动点。
- 利用 $L_i(k)$ 通过式(3)计算 P_k 的亮度掩蔽 $B_i(k)$,并与阈值区间进行比较 $[TB_1, TB_2]$,标记为对比敏感点或不敏感点。
- 按 Zig-Zag 顺序对第 i 帧所有像素点重复步骤 b) ~ e),得到第 i 帧的运动特征图和对比敏感图,并找出能量 $E(k)$ 中的最大值,确定阈值 TE ,与 $E(k)$ 进行比较,大于 TE 标记为纹理点;反之标记为平滑点,得到第 i 帧的纹理特征图。
- 利用 $L_i(k)$ 和 $L_{i+1}(k)$ 通过式(1)计算出第 i 帧和第 $i+1$ 帧的整体变化 $\Delta L(F_i, F_{i+1})$,存入缓存,判定是否为极大值点,若是极大值点,则将第 i 帧和第 $i+1$ 帧标记为场景变化帧。
- 按 1.3 节提出的规则由第 i 帧的运动特征图、对比敏感图、纹理特征图和场景变化情况得到每帧图像的隐写位置图。
- 结合隐写位置图,将经过预编码处理的秘密信息用 2.2 节提出的湿纸编码步骤嵌入到原视频帧中,将每一帧的 Key_i 和 M'_i 通过安全信道发送给提取者。

3.2 提取算法

由于采用了湿纸编码嵌入秘密信息,不需要接收者知道具体的嵌入位置便能够实现信息的提取,避免了重复获得隐写位置图的大量运算,提取算法相对简单。接收者只需读取每帧图像所有像素亮度分量的最低有效位 LSBs,组成载体向量 $X' = [x'_1, x'_2, \dots, x'_N]$,利用密钥 Key_i 和 M'_i 重新生成伪随机二元矩阵 A ,通过公式 $Y = X' \cdot A$ 便可计算出隐写信息 Y 。

4 实验结果及分析

实验中选取标准的 YUV 格式视频序列作为原始视频序列,分别用原有算法和本文提出的算法进行秘密信息的嵌入与提取,使用 JM17.2 对算法性能进行测试,具体参数设定如表 1 所示。

秘密信息被嵌入在各帧像素点亮度分量的最低有效位 LSBs 中,由于隐写位置的确定综合了人眼视觉系统各种时空感知特性,嵌入点能够提供较大的隐写位深,而不会引起人眼的觉察。实验中,分别向像素点最低 1、2、3、4 等位 LSBs 中嵌入信息,随着嵌入容量的提高,并没有引起明显可觉察的质量改变。表 2 显示了测试视频序列的平均每帧嵌入容量,当隐写位深增加时,隐写容量远大于文献[1]中算法(取 $\mu = 25$)。图 2 显示了 mother-daughter、qcif 及 mobile、qcif 视频序列中部分视频帧在不同隐写强度下经过解码后与原始视频帧的对比。

表 1 实验参数设定

名称	参数值	名称	参数值
档次	主要档次	参考帧数量	5
Y:U:V	4:2:0	搜索算法	快速全局搜索
序列类型	IBPBP		

表 2 部分实验数据

视频序列	视频帧大小	平均每帧嵌入容量/ $\times 10^4 \text{bit}$				献[1]
		1 位 LSBs	2 位 LSBs	3 位 LSBs	4 位 LSBs	
mother-daughter1	76 × 144	1.09	2.13	3.25	4.40	1.22
mobile	176 × 144	1.98	3.92	5.96	8.14	1.87
container	176 × 144	1.30	2.57	3.98	5.33	1.38
carphone	176 × 144	2.14	4.24	6.50	8.62	2.26



图2 部分视频帧对比图

通过实验可以看出,隐写容量正比于隐写位深,并且当嵌入位深小于 4 位时,不会引起载体视频质量可察觉的改变,单独对比观察一帧图像,其质量的下降也不明显。特别是当视频纹理复杂,运动剧烈时,算法在获得高容量同时,也保证了良好的视觉不可见性。

5 结束语

本文基于人眼视觉系统的时空感知特性,利用双树复小波变换提取视频图像的运动特征图、对比敏感图、纹理特征图和场

景变化情况,加以综合运用,获得用于嵌入秘密信息的隐写位置图,并结合湿纸编码实现了信息的隐写。同时不需要接收者知道具体的嵌入位置便能够实现信息的提取,避免了重复获得隐写位置图的大量运算,大大提高了提取效率。在安全性方面,同时对接收者和攻击者隐藏了隐写位置的选取方法,并且不必考虑增加冗余以修正隐写操作引起的隐写位置判断误差,提高了安全性。实验表明,算法在保证良好的视频质量前提下,嵌入容量和隐写不可见性可以满足隐蔽通信的要求。

参考文献:

[1] 梁惠,郭立,陈运必. 基于视觉感知模型的大容量视频隐写算法[J]. 中国科学院研究生院学报,2010,27(1):55-62.

[2] LU Yi-feng, LI Xiao-long, BIN Yang. A secure steganography: noisy region embedding[C]//Proc of the 5th International Conference on IHH-MSP. 2009:1046-1051.

[3] 刘红梅,黄继武,肖自美. 一种小波变换域的自适应视频水印算法[J]. 中国科学院研究生院学报,2001,12(12):1656-1660.

[4] LIU Bin, LIU Fen-lin, YANG Chun-fang, et al. Secure steganography in compressed video bitstreams[C]//Proc of the 3rd International Conference on ARES. Washington DC:IEEE Computer Society,2008:1382-1387.

[5] 张新鹏,刘焕,张颖春,等. 融合方向编码和湿纸编码的高效信息隐藏[J]. 上海大学学报:自然科学版,2010,2(1):1-4.

[6] 陈丽萍,唐向宏. 基于 DTCWT 纹理分析的视频水印算法[J]. 杭州电子科技大学学报,2008,8(4):36-40.

[7] LIN Zhuang, JIANG Ming-yan. Multipurpose digital watermarking algorithm based on Dual-Tree CWT[C]//Proc of the 6th International Conference on Intelligent Systems Design and Application. Washington DC:IEEE Computer Society,2006:316-320.

[8] CHU SHU-chuan, RODDICK J F, LU Zhe-ming, et al. A digital image watermarking method based on labeled bisecting clustering algorithm[J]. IEICE Trans on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences,2004,87(1):282-285.

[9] 闫雪虎. 基于纠错码的信息隐藏容量模型[J]. 计算机工程,2010,36(3):172-173.