

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1140-06

论文索引信息: 陈杰, 冯国瑞. 利用 DCT 系数映射关系快速实现视频水印嵌入 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1140-1145

利用 DCT 系数映射关系快速实现视频水印嵌入

陈杰, 冯国瑞

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要: 针对 MPEG-2 视频压缩标准, 提出一种具备快速实现能力的鲁棒性视频水印嵌入方案。利用视频帧分块 DCT 系数与整体 DCT 系数间的映射关系, 在水印嵌入和提取过程中避免对视频进行完全解码, 减小计算量, 提高水印算法实时嵌入、实时检测能力。实验结果表明, 该方法能抵抗缩小攻击、高斯白噪声攻击、MPEG-2 重编码压缩攻击, 而且能够快速实现。

关键词: 视频水印; MPEG-2; 缩小攻击; 块映射

Efficient video watermarking based on mapping relationship of DCT coefficients

Chen Jie, Feng Guorui

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072 China)

Abstract: A robust video watermarking algorithm based on MPEG-2 video compression standard is proposed, which can be implemented efficiently. By using the mapping relationship between video frames' block DCT coefficients and the full frame DCT coefficients, the proposed scheme does not need to completely decode the host video in watermark embedding and extraction, and thus reduces the operation cost. Experiments show that the method can effectively resist down-scaling attack and Gaussian white noise contamination and MPEG-2 compression.

Keywords: video watermark; MPEG-2; down-scaling; block mapping

0 引言

随着计算机网络的普及和不断发展, 数字视频在人们日常生活中出现的越来越频繁。如何加强视频产品的版权保护是人们迫切需要解决的问题。在数字视频版权保护领域人们使用最多的技术是加密技术, 但实践证明仅仅依靠加密技术无法对数字视频的版权实施全方位保护^[1]。数字水印技术能够将版权信息嵌入数字视频的内容当中, 将版权保护问题与内容紧密结合, 从而为已解密的视频提供保护, 弥补加密技术的不足。在视频水印研究的早期阶段, 有学者

根据视频的特点认为水印算法需要具备两个特点, 即能够快速实现^[1]和抵抗视频压缩处理(如 MPEG-2 等)。视频播放的速度需要达到一定的帧率才不会使观众感觉到闪烁, 所以视频水印算法要能快速实现, 从而保证版权保护操作不会影响视频的流畅播放。同时数字视频具有大量的数据, 几乎在所有场合都要对其进行压缩处理, 这要求水印在压缩过程中仍能保持有效信息。能否快速实现及抵抗压缩处理是决定一个水印算法性能的重要依据。

缩小攻击是一种通过减小视频帧的尺寸从而减小数据量的视频处理方式。当计算机上的视频下载到掌上设备时, 由于掌上设备的存储容量和播放器

收稿日期: 2010-05-05; 修回日期: 2010-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(60832010); 上海市自然科学基金项目(09ZR1412400)。

第一作者简介: 陈杰(1984—), 男, 上海大学通信与信息工程学院通信工程专业硕士研究生, 研究方向为多媒体信息安全、数字水印。E-mail: chenjie2008@shu.edu.cn。

分辨率都远小于计算机,为减少视频的数据量需要对视频进行缩小处理。如果水印算法能够抵抗缩小攻击,掌上设备就可以进行水印检测,实现版权保护。缩小攻击作为几何攻击的一种,是目前水印技术研究的重点之一^[2]。

当前出现的视频水印算法总体上可分为两类。第 1 类算法在嵌水印时不考虑视频压缩的影响,将水印信息直接嵌入视频帧序列中,然后再对视频帧序列进行压缩。由于压缩前视频帧相当于静止图像,能够进行各种变换与图像处理操作,所以第 1 类算法具有更大的水印设计空间,能够充分利用视频帧自身的内容特征,但这类算法需要将视频完整解码为视频序列,解码过程计算量大不利于保证算法的实时性。文献[2]的算法属于第 1 类算法,在嵌水印时对视频帧进行 Contourlet 变换,然后将水印信息嵌入 Contourlet 域中对几何形变不敏感的区域实现抵抗几何形变攻击。第 1 类算法需要对视频进行完全解码计算量大,所以文献[2]的算法难以保证实时性。第 2 类算法结合视频压缩过程,将水印嵌入压缩过程中获得的 DCT 块(block DCT)系数或者运动向量等数据当中。与前者比较,第 2 类算法不能自由的对视频帧进行变换,算法设计空间小,但是第 2 类算法只需对视频进行部分解码,计算量少,能够保证算法的实时性。图 1 给出第 2 类水印算法嵌入过程的两个环节:变长码解码(VLD)与变长码编码(VLC)、逆量化(DQT)与量化(QT)。缩小攻击会改变视频帧的尺寸从而改变 Block DCT 的结构,导致无法从遭受攻击的视频中获得原先的 Block DCT 域系数,所以抵抗缩小攻击需要兼顾视频帧的整体结构,第 2 类算法将水印嵌入 Block DCT 域系数中,要做到抵抗缩小攻击存在困难。文献[3-4]的算法利用视频 Block DCT 域系数服从广义高斯分布的特性将水印嵌入其中,改变系数的分布规律,在接收端通过探测系数分布特性是否改变实现水印检测。文献[3-4]的算法对加噪、滤波等攻击具有鲁棒性,但是水印检测依赖于 Block DCT 域系数,所以无法抵抗缩小攻击。文献[5]的算法根据人类视觉系统(HVS)判断 Block DCT 域的高细节区域将水印嵌入到其中,也属于第 2 类算法。算法通过对遭受攻击后的视频进行规范化处理实现水印嵌入位置的定位抵抗几何攻击,但是规范化处理操作过程复杂,计算量大,并且需要原始视频的参与,无法做到盲检测。文献[6]指出视频帧的 Block DCT 域和 Full DCT 域之间存在映射关系,可以利用 Block DCT 域系数得

到 Full DCT 域系数,将水印嵌入低频分量中抵抗缩小攻击。文献[6]算法的流程如图 2 所示,与图 1 相比,增加了 Block DCT 域和 Full DCT 域之间的转换环节,但仍能够保证实时性。以文献[6]提出的 Block DCT 域和 Full DCT 域之间的映射关系为基础提出一种能够抵抗缩小攻击的第 2 类水印算法,算法避免图 2 中 Block DCT 域和 Full DCT 域之间的转换环节,快速实现图 1 所示的操作流程,进一步提高了实时性。

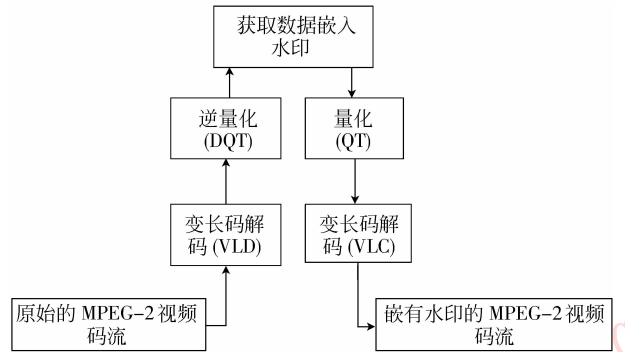


图 1 第 2 类水印算法的流程

Fig. 1 The flow diagram of a second kind watermark algorithm

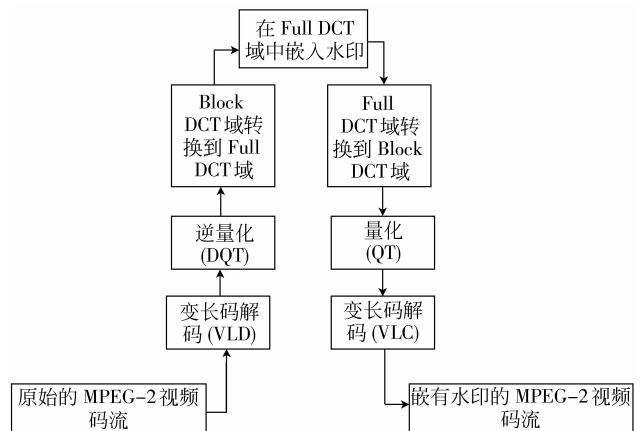


图 2 文献[6]水印算法的流程

Fig. 2 The flow diagram of the watermark algorithm in literature [6]

1 算法构架

缩小攻击会改变视频帧的尺寸从而改变 Block DCT 的结构,由于无法从遭受攻击后的视频中获得原先的 Block DCT 域系数,所以将水印信息嵌入 Block DCT 域和运动向量中的第 2 类水印算法要做

到抵抗缩小攻击存在困难。第 1 类水印算法能够兼顾视频帧的整体结构,容易做到抵抗缩小攻击,但是第 1 类水印算法需要将视频进行完全解码,计算量大,难以保证实时性。

视频帧的低频系数对缩小攻击具备鲁棒性。如图 3 所示,在 288 × 352 尺寸的视频帧 Full DCT 域低频系数中人为嵌入一个峰值,当视频帧被缩小到 144 × 176 尺寸后其 Full DCT 域的相同位置处同样存在峰值。说明利用 Full DCT 域低频系数能够设计出抵抗缩小攻击的视频水印,但在 Full DCT 域中

嵌入水印需要对视频进行完全解码。如何避免完全解码,通过 Block DCT 域将水印嵌入 Full DCT 域是提高水印算法实时性所需解决的问题。文献[6]指出视频帧的 Block DCT 域和 Full DCT 域之间存在如式(1)所示的映射关系,利用这一关系 Block DCT 域无须经过空域可以直接转换到 Full DCT 域,实现如图 2 所示的水印算法流程。进一步文献[6]还指出式(1)中矩阵 A_1 、 A_2 的系数对于任何内容的视频都是固定的,所以 Block DCT 域和 Full DCT 域之间的转换可以快速实现,保证算法实时性。

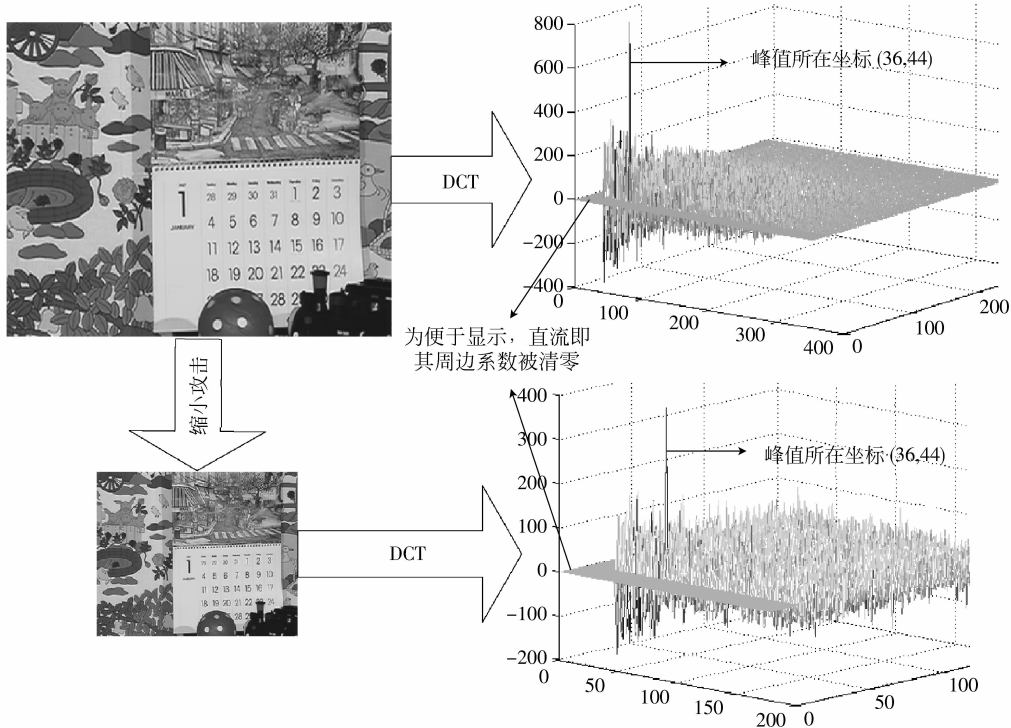


图 3 空域缩小攻击所产生的频域变化

Fig. 3 The change in frequency domain produced by down-scaling processing in spatial domain

$$DCT_{full} = \sqrt{\frac{1}{LM}} \cdot A_1 \begin{pmatrix} C_{0,0} & C_{0,1} & \cdots & C_{0,M-1} \\ C_{1,0} & C_{1,1} & \cdots & C_{1,M-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{L-1,0} & C_{L-1,1} & \cdots & C_{L-1,M-1} \end{pmatrix} \cdot A_2^T \quad (1)$$

$C_{k,h}$ 表示视频帧第 $k+1$ 行第 $h+1$ 列的 Block DCT; DCT_{full} 表示 Full DCT 域。

$$A_1 = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2}}A(u, i) & u = 0, (i \bmod N) \neq 0 \\ \sqrt{2}A(u, i) & u \neq 0, (i \bmod N) = 0 \\ A(u, i) & \text{其他} \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}A(v, j) & v = 0, (j \bmod N) \neq 0 \\ \sqrt{2}A(v, j) & v \neq 0, (j \bmod N) = 0 \\ A(v, j) & \text{其他} \end{cases}$$

$$A(u, i) = \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{2LN}\right) \quad u, i = 0, 1, 2, \dots, LN$$

$$A(v, j) = \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{2MN}\right) \quad v, j = 0, 1, 2, \dots, MN$$

Block DCT 域和 Full DCT 域之间存在映射关系,如果对 Full DCT 域系数修改可通过 Block DCT 域实现而无须进行转换,那么可以避免图 2 中 Block DCT 域和 Full DCT 域间相互转换的环节,实现如

图 1 所示的算法流程。虽然 Block DCT 域和 Full DCT 域间的映射关系十分复杂,但是经过研究发现 Full DCT 域 (Lu, Mv) 坐标处的 DCT 系数与 Block DCT 域 (u, v) 坐标处的 DCT 系数之间存在着如式(2)所示的简单线性映射关系(具体推导见附录 A),可以应用于水印算法设计。

$$DCT_{full}(Lu, Mv) = \frac{1}{\sqrt{LM}} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{h=0}^{M-1} (-1)^{ku+hv} C_{k,h}(u, v) \quad (2)$$

式中: $u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $C_{k,h}$ 表示视频帧第 $k+1$ 行第 $h+1$ 列的 Block DCT; DCT_{full} 表示 Full DCT 域。

式(2)中 Full DCT 域中坐标为 (Lu, Mv) 的系数是 Block DCT 域中各个坐标为 (u, v) 系数的线性组合。由式(2)可以得出两个结论: 1) 当获得每个 Block DCT 域中坐标为 (u, v) 的系数值后可通过计算得到 Full DCT 域中坐标为 (Lu, Mv) 的系数值; 2) 通过修改 Block DCT 域中 (u, v) 坐标处的系数能够实现 Full DCT 域中 (Lu, Mv) 坐标处系数的修改。这两个结论是本文水印算法的基础。图 4 是一个通过 Block DCT 域系数修改 Full DCT 域系数的实例说明, 在每个 $N \times N$ Block DCT 域中坐标为 (u, v) 的系数上加 1 或减 1, 根据式(2)可知其结果等效于在 Full DCT 域中 (Lu, Mv) 坐标处的系数上加 \sqrt{LM} 。

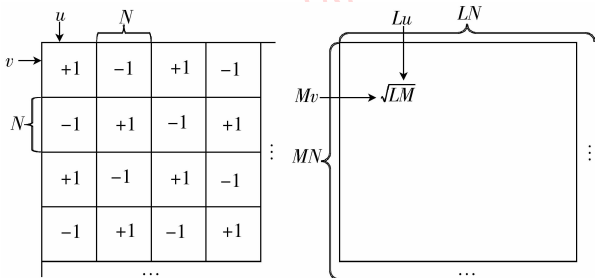


图 4 Block DCT 系数与 Full DCT 系数的关系

Fig. 4 The mapping relationship between Block DCT coefficients and Full DCT coefficients

2 水印嵌入与水印检测

使用的视频帧尺寸为 288×352 , 视频的压缩格式为 MPEG-2, 每帧视频可分为 36×44 个 8×8 的 Block DCT。水印嵌入流程如图 1 所示, 具体步骤如下:

1) 从视频某个场景中按时间顺序抽取第 1 个 I 帧的亮度分量 (I_1) , 经过 VLD 与 DQT 获得每个

8×8 Block DCT 域中坐标为 $(0, 1)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(1, 0)$ 的系数, 根据式(2)计算得到 I_1 的 Full DCT 域中坐标为 $(0, 44)$ 、 $(36, 44)$ 、 $(36, 0)$ 的交流系数 $I_1(0, 44)$ 、 $I_1(36, 44)$ 、 $I_1(36, 0)$ 。

2) 计算第 2 个 I 帧亮度分量 (I_2) 的 Full DCT 域系数 $I_2(0, 44)$ 、 $I_2(36, 44)$ 、 $I_2(36, 0)$, 并从这 3 个数中选取 $I_2(36, 44)$ 按照以下规则嵌入水印。修改 Block DCT 域系数使 $|I_2(36, 44)| > |I_1(36, 44)| \times 115\%$, 则嵌入“1”; 使 $|I_2(36, 44)| \leq |I_1(36, 44)| \times 85\%$, 则嵌入“0”。

3) 用与步骤 2) 相同的方式在下一个 I 帧中嵌入水印, 但是在选择用哪个系数嵌入水印的时候需要按照如下规律。当前一帧选择系数的坐标为 $(36, 44)$ 时, 后一帧选择 $(0, 44)$; 当前一帧选择系数的坐标为 $(0, 44)$ 时, 后一帧选择 $(36, 0)$; 当前一帧选择系数的坐标为 $(36, 0)$ 时, 后一帧选择 $(36, 44)$ 。

4) 重复步骤 3) 直至场景中已无空余的 I 帧, 然后从视频中选取另一个场景重新开始步骤 1)。

接收端水印提取的流程如图 5 所示, 具体步骤如下:

1) 获取视频某个场景中第 1 个 I 帧亮度分量 (I_1) 的 8×8 Block DCT 域坐标为 $(0, 1)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(1, 0)$ 的系数, 再由式(2)计算 Full DCT 域系数记为 $I_1(0, 44)$ 、 $I_1(36, 44)$ 、 $I_1(36, 0)$ 。

2) 以相同的方式得到第 2 个 I 帧亮度分量 (I_2) 的 Full DCT 域系数 $I_2(0, 44)$ 、 $I_2(36, 44)$ 、 $I_2(36, 0)$, 然后从这 3 个数中选择 $I_2(36, 44)$ 进行如下判断。当 $|I_2(36, 44)| > |I_1(36, 44)|$ 时, 水印比特为“1”; 当 $|I_2(36, 44)| \leq |I_1(36, 44)|$ 时, 水印比特为“0”。

3) 不断重复步骤 2) 的做法提取后面 I 帧中的水印, 但是在选择从哪个系数中提水印时要按照如下规则。当前一帧选择系数的坐标为 $(36, 44)$ 时, 后一帧选择 $(0, 44)$; 当前一帧选择系数的坐标为 $(0, 44)$ 时, 后一帧选择 $(36, 0)$; 当前一帧选择系数的坐标为 $(36, 0)$ 时, 后一帧选择 $(36, 44)$ 。

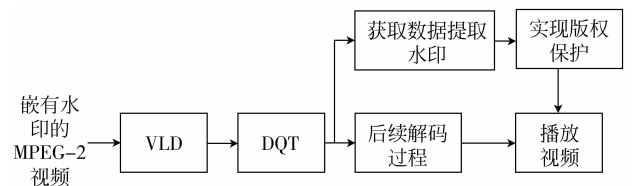


图 5 水印提取的流程

Fig. 5 The flow diagram of watermark extraction

3 实验结果

利用有限反馈移位寄存器生成一组由“0”、“1”组成的伪随机序列作为水印信号嵌入帧尺寸为 288×352 的实验视频中,经过不同比例的缩小攻击后提取水印的误码率如表 1 所示。由表 1 可见,随着缩小比例的减小,提取水印的误码率在不断增加,但当缩小比例减小到 0.3 时,误码率仍没有超过 7.0%,说明算法在抵抗缩小攻击方面具有良好性能。

表 1 缩小攻击实验结果

Tab. 1 The result of down-scaling experiment

实验视频	缩小比例	误码率/%
Mobile	1	1.5
	0.9	2.0
	0.7	2.5
	0.5	3.8
	0.3	6.6
Paris	1	0
	0.9	1.5
	0.7	2.0
	0.5	3.5
	0.3	5.0

除了缩小攻击实验外,还对视频进行了叠加 0 均值高斯白噪声的实验以及不同比特率条件下的 MPEG-2 重压缩实验。由表 2 和表 3 中的实验结果可见,随着噪声方差的增加以及编码比特率的减小,水印的误码率也在不断地增加,但是最终没有超过 6.0%。图 6 为嵌有水印的视频帧与噪声方差为 0.01 的视频帧的视觉比较情况。其中水印给视频帧带来的影响无法用肉眼察觉,但是方差只有 0.01 的噪声却已经给视频帧造成明显影响,说明水印具有良好的不可见性。

表 2 加噪攻击实验结果

Tab. 2 The result of adding noise experiment

实验视频	高斯噪声方差	误码率/%
Mobile	0.01	2.8
	0.02	3.6
	0.03	4.8

表 3 MPEG-2 重压缩实验结果

Tab. 3 The result of MPEG-2 compression experiment

实验视频	编码比特率/(bit/s)	误码率/%
Mobile	5 000 000	1.5
	3 000 000	2.8
	1 500 000	5.5



(a) 水印视频帧

(b) 噪声方差为 0.01 的视频帧

图 6 水印视频帧与噪声视频帧的视觉比较

Fig. 6 The comparison between watermarked video frame and noised video frame

4 结论

利用视频帧 Block DCT 域和 Full DCT 域的映射关系,提出一种能够抵抗缩小攻击的视频水印算法。算法在水印嵌入与提取时只需对 MPEG-2 格式的视

频做 VLD 与 DQT 处理,避免了视频解码过程中进行 DCT 正逆变换和运动估计、运动补偿所需的巨大计算量,具备良好的实时性。实验结果表明,算法不仅能够抵抗缩小攻击,在抵抗加噪攻击和 MPEG-2 重压缩方面也具有良好性能。

参考文献 (References)

- [1] Lin E T, Eskicioglu A M, Lagendijk R L, et al. Advances in digital video content protection [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(1): 171-183.
- [2] Wu Yiquan, Pang Lei. Video watermarking algorithm resistant to geometry transformation attacks based on contourlet transform [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(7): 1969-1973. [吴一全, 庞磊. 基于 Contourlet 变换的抵抗几何攻击的视频水印算法 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(7): 1969-1973.]
- [3] Noorkami M, Mersereau R M. Digital video watermarking in P-frames with controlled video bit-rate increase [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008, 3(3): 441-455.
- [4] Noorkami M, Mersereau R M. A framework for robust watermarking of H. 264-encoded video with controllable detection performance [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(1): 14-23.
- [5] Chen Guangxi, Cheng Yan. Video watermark scheme resistant to geometry transformation attacks based on HVS [J]. Computer Engineering, 2008, 34(24): 152-154. [陈光喜, 成彦. 基于 HVS 的抗几何攻击视频水印方案 [J]. 计算机工程, 2008, 34(24): 152-154.]
- [6] Wang Y, Pearmain A. Blind MPEG-2 video watermarking robust against geometric attacks; a set of approaches in DCT domain [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1536-1543.

附录 A

先证明 1 维序列情况下的映射关系,然后推广到 2 维图像的情况。假设一个长度为 LN 的 1 维序列 $x(i), i=0, 1, 2, \dots, LN-1$, 被等间隔划分为 L 个子序列段,那么各子序列段和整个序列的 DCT 变换表达式分别如式(A1)和式(A2)。

$$C_k(u) = \sum_{i=0}^{N-1} aux(i+kN) \cos\left[\frac{(2i+1)u\pi}{2N}\right] \quad (A1)$$

式中: $u=0, 1, 2, \dots, N-1; k=0, 1, 2, \dots, L-1$;

$$a_u = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & u=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & u \neq 0 \end{cases} \circ$$

$$\text{DCT}_{\text{full}}(u) = \sum_{i=0}^{LN-1} b_u x(i) \cos\left[\frac{(2i+1)u\pi}{2LN}\right] = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{N-1} b_u x(i+kN) \cos\left[\frac{(2i+1)u\pi}{2LN} + \frac{ku\pi}{L}\right] \quad (A2)$$

$$\text{式中: } u=0, 1, 2, \dots, LN-1; b_u = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{LN}} & u=0 \\ \sqrt{\frac{2}{LN}} & u \neq 0 \end{cases} \circ$$

将 $u=Lw, w=0, 1, 2, \dots, N-1$, 代入式(A2)可得

$$\begin{aligned} \text{DCT}_{\text{full}}(Lw) &= \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{N-1} b_{Lw} x(i+kN) \cos\left[\frac{(2i+1)w\pi}{2N} + kw\pi\right] = \\ & \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^{kw} b_{Lw} x(i+kN) \cos\left[\frac{(2i+1)w\pi}{2N}\right] \quad (A3) \end{aligned}$$

将式(A1)代入式(A3)得

$$\text{DCT}_{\text{full}}(Lu) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{k=0}^{L-1} (-1)^{ku} C_k(u) \quad (A4)$$

同理,当 2 维图像尺寸为 $LN \times MN$, 分块大小为 $N \times N$ 时,Block DCT 域系数与 Full DCT 域系数间存在如下关系:

$$\text{DCT}_{\text{full}}(Lu, Mv) = \frac{1}{\sqrt{LM}} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{h=0}^{M-1} (-1)^{ku+hv} C_{k,h}(u, v) \quad (A5)$$

式中: $u, v=0, 1, 2, \dots, N-1; C_{k,h}$ 表示图像第 $k+1$ 行第 $h+1$ 列的 Block DCT; DCT_{full} 表示 Full DCT 域。