

Watermarking d'images par paquets d'ondelettes

Anne MANOURY, Jacques LEVY VEHEL, Marie-Françoise LUCAS

IRCyN, UMR CNRS 6597

1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 03, France

Anne.Manoury@ircyn.prd.fr, Jacques.Levy-Vehel@ircyn.prd.fr, Marie-Françoise.Lucas@ircyn.prd.fr

Résumé – L'objectif de cet article est de présenter et d'analyser une nouvelle technique de "watermarking" fondée sur une perturbation de la décomposition en paquets d'ondelettes de l'image. Le principe de la méthode est d'implanter la marque de copyright de façon virtuelle dans une sous base de l'image hôte, cette sous base dépendant d'une clé privée. La détection du watermark par son propriétaire est immédiate et ne nécessite pas la présence de l'image originale.

Abstract – The aim of this work is to present and investigate a new method for the watermarking of images. It is based on a modification of the wavelet packet decomposition of the data. The principle is to alter the coefficients in such a way that a given secret subset of the best basis satisfies some constraints, which constitute the watermark. In this sense, the mark is a virtual one. Some preliminary results are presented.

1 Introduction

Avec l'émergence de nouveaux moyens de communications comme Internet, nous assistons à une très forte augmentation de la présence des données multimédia. Du fait de leur nature numérique, ces données peuvent être modifiées ou reproduites sans perte de qualité et font l'objet d'intenses échanges. Il est donc nécessaire de développer de nouvelles méthodes de protection des images. Parmi celles-ci, le watermarking est actuellement un domaine de recherche très actif. Les watermarks sont utilisés afin de protéger les droits de copyright du propriétaire des données. Ce sont des codes introduits dans la valeur des pixels de l'image hôte de façon perceptuellement invisible. Ils doivent caractériser le propriétaire de l'image, ne pas être facilement détectables et en outre être résistant aux manipulations des images, qu'elles soient usuelles, comme la compression, ou intentionnelles.

Plusieurs méthodes ont été développées dans lesquelles le marquage se fait sur l'image même [1], ou sur une transformée de cette image. En particulier, on peut utiliser les outils utilisés dans la compression comme les transformées DCT [2], DWT [3], fractales [4], pour des soucis d'invisibilité et de robustesse.

C'est dans cet esprit que nous avons choisi de travailler à partir de la décomposition en paquets d'ondelettes de l'image. Dans cet article, nous commencerons par décrire succinctement les principes de la décomposition d'une image sur une meilleure base de paquets d'ondelettes. Puis nous décrirons notre méthode de watermarking et nous présenterons un exemple d'application. Enfin, nous conclurons sur les résultats de la méthode et les améliorations à envisagées.

2 La décomposition en paquets d'ondelettes

La décomposition en paquets d'ondelettes d'un signal est une extension de la transformée en ondelettes discrète (D.W.T. pour discrete wavelet transform). La figure 1 représente l'arbre de décomposition d'une image 2D où les coefficients des paquets sont obtenus par filtrages et décimations successives selon les lignes et les colonnes. Cette décomposition peut être interprétée comme la décomposition en sous bandes de ce signal, à des résolutions fréquentielles croissantes (cf. Figure 1).

La représentation obtenue est redondante et il est loisible de sélectionner, à partir de cette décomposition, une base adaptée à l'image et à nos objectifs, celle-ci constituant alors une exploration particulière du plan temps fréquence (la DWT étant une base possible) (Figure 2).

De ce point de vue, ces représentations sont bien adaptées à différents problèmes de traitement de l'image. Les transformées en ondelettes discrètes et les décompositions en paquets d'ondelettes sont par exemple utilisées pour la compression [5] et le débruitage [6].

Dans le cadre de la compression, l'algorithme de sélection de la meilleure base généralement utilisé est celui proposé par Coifman et Wickerhauser, qui minimise l'entropie de la représentation [7]. C'est cet algorithme que nous avons utilisé dans un premier temps. Cependant, nous expliquerons dans cet article les inconvénients de ce choix et nous présenterons un critère "énergétique" de sélection de la meilleure base.

Dans la représentation quaternaire en paquets d'ondelettes, chaque paquet $C_{p,i,j}$ correspondant à un noeud de l'arbre contient l'information relative à toute l'image dans la bande de fréquence indiquée par i, j et dont la taille est déterminée par le niveau de résolution p . Les coefficients

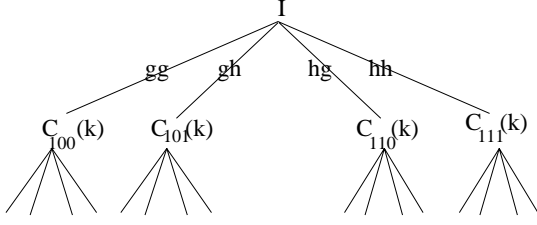


FIG. 1: arbre quaternaire de décomposition en paquets d'ondelettes. Les coefficients des paquets sont obtenus par filtrages et décimations successives selon les lignes et les colonnes. h et g sont les filtres passe haut et passe bas de la DWT.

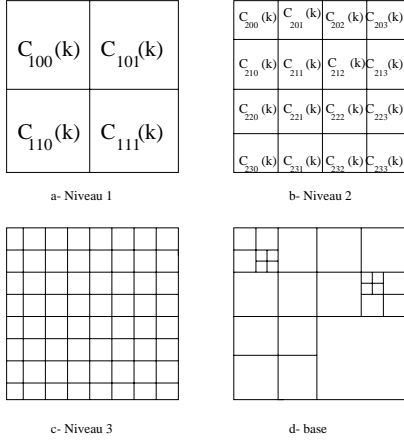


FIG. 2: a,b,c: découpage espace-fréquence correspondant aux trois premiers niveaux de la décomposition en paquets d'ondelettes. d: exemple de meilleure base

du paquet sont notés $C_{p,i,j}(k)$ où k est l'indice de translation spatiale.

3 Notre approche

La méthode que nous proposons consiste à insérer une marque "virtuelle" dans l'image en modifiant sa meilleure base. L'idée consiste à imposer une certaine parité sur le nombre des vecteurs de chacun des niveaux d'un certain nombre de sous bases secrètes. Ces sous bases sont déterminées à l'aide d'une clé secrète connue du seul propriétaire de l'image. Le codage est réalisé en modifiant les coefficients de la décomposition pour que chacune des nouvelles sous bases relatives à la nouvelle meilleure base respecte la parité désirée. La vérification de la présence de la marque dans l'image se fait simplement en recherchant la meilleure base et en vérifiant si les sous bases (déterminées à l'aide de la clé) respectent la parité souhaitée. Nous précisons maintenant ces différents points.

3.1 Le processus de codage

Il est représenté sur la figure 3 et comporte 4 étapes :

- L'étape 1 est simplement la décomposition en paquets d'ondelettes de l'image.
- L'étape 2 est la sélection de la meilleure base.

Le marquage s'effectuant sur la structure de la base, celle-ci doit répondre à deux contraintes. Tout d'abord, par souci de robustesse, on ne doit sélectionner que des vecteurs représentant une parcelle significative du contenu de l'image. Ensuite, afin de rendre possible l'implémentation de la marque, la base doit contenir un nombre suffisant de vecteurs pour des profondeurs variées.

Or, l'algorithme de sélection de la meilleure base par critère entropique ne répond pas à la première contrainte. En effet, cet algorithme optimise la concentration du signal sur les vecteurs de la base. Certains vecteurs sélectionnés peuvent alors ne contenir que très peu d'énergie et "fragiliser" la structure. En d'autres termes, les meilleures bases, au sens entropique, d'une image et de sa version compressée peuvent différer grandement. Ce manque de stabilité empêche l'inscription d'une marque sur la *structure* de la base.

Nous proposons ci-dessous un critère énergétique de sélection de la meilleure base qui ne présente pas cet inconvénient.

Dans un notre méthode, un noeud $N_{p,i,j}$ appartient à la base si et seulement si :

$$N_{p,i,j} \in \mathcal{F}_s \text{ et } N_{p+1,2i,2j} \notin \mathcal{F}_s$$

où :

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_s &= \{N_{d,x,y} \mid \forall (\delta_1, \delta_2) \in \{0, 1\}^2, \\ &\sum_k |C_{d,x+\delta_1 r_1, y+\delta_2 r_2}(k)|^2 \geq s, \\ r_1 &= 1 - 2 * (x \text{ modulo } 2), \\ r_2 &= 1 - 2 * (y \text{ modulo } 2), \\ N_{d-1, E(x/2), E(y/2)} &\in \mathcal{F}_s \} \end{aligned}$$

C'est à dire qu'un noeud appartient à la base s'il est dans la famille \mathcal{F}_s et si ses fils ne le sont pas. Un critère de ce type à déjà été utilisé pour déterminer un banc adapté de filtres à partir d'une décomposition en paquets d'ondelettes [8]. \mathcal{F}_s représente l'ensemble des noeuds qui ont une énergie supérieure au seuil s et dont tous les frères, pères et oncles ont une énergie supérieure à s . On obtient donc une base de décomposition de l'image dans laquelle chaque paquet contient une énergie non nulle (au moins supérieure au seuil) et qui est de profondeur maximale. Le choix du seuil s est dicté par les deux contraintes imposées sur la structure de la base.

- L'étape 3 est l'extraction des sous bases

Soit \mathcal{B} l'ensemble des bases admissibles correspondant à l'image considérée et \mathcal{K} l'ensemble des clés secrètes. Nous définissons un opérateur E :

$$\begin{aligned} (\mathcal{B}, \mathcal{K}) &\longmapsto \mathcal{P}(\mathcal{B}) \\ (B, K) &\longmapsto SB = B_1, B_2, \dots, B_m \end{aligned}$$

où B_1, B_2, \dots, B_m sont des sous ensembles disjoints de \mathcal{B} . Les propriétés que doit vérifier E sont essentiellement :

- non inversibilité : on ne peut pas remonter de (B, SB) à K
- compromis robustesse/invisibilité : E ne doit pas sélectionner de fréquences extrêmes; d'une part, les hautes fréquences sont peu robustes en particulier à la compression, d'autre part, une modification de très basses fréquences entraîne en général une dégradation visible de l'image.
- dimension de SB : D'une part, m , qui contrôle le taux de fausses alarmes (la marque est implantée de façon redondante), doit être assez grand. D'autre part, chaque B_i doit contenir assez d'éléments pour permettre l'implémentation d'une marque possédant un grand nombre de bits et pour procéder à des modifications invisibles et robustes. Dans le cas de sous bases disjointes, ces deux contraintes sont antagonistes. Dans la pratique, il apparaît que chaque B_i ne peut contenir plus de trois ou quatre niveaux. On est donc contraint à partager la marque en plusieurs segments et à les coder chacun sur une sous base différente.

Bien que le choix de E soit crucial, nous nous contenterons dans cette étude préliminaire de le définir aléatoirement en respectant des règles simples. E permet donc, à partir de la meilleure base fournie par l'étape 2, d'extraire m sous bases. A chaque sous base B_i , on associe ensuite le vecteur $e^i = (e_1^i, \dots, e_q^i)$ où q est le nombre d'échelles représentées dans chaque B_i et $e_j^i \in \{0, 1\}$ est nul si le nombre d'éléments de B_i à l'échelle j est pair et vaut 1 sinon (voir figure 4).

- L'étape 4 est l'encodage de la marque sur les sous bases. Le marquage s'effectue en deux temps. Le premier consiste à modifier SB en tenant compte du filigrane qui identifie le propriétaire de l'image. Il s'agit donc d'un opérateur O :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(\mathcal{B}) \times \mathcal{W} &\longmapsto \mathcal{P}(\mathcal{B}) \\ (SB, W) &\longmapsto SB^* = B_1^*, B_2^*, \dots, B_m^* \end{aligned}$$

où \mathcal{W} , l'ensemble des watermarks, est tout simplement $\{0, 1\}^{qm}$, c'est à dire l'ensemble des p-uplets $W = (v_1, \dots, v_m)$ avec $v_i = (v_1^i, \dots, v_q^i)$. SB^* est déterminée de la façon suivante :

- si $v_1^i = e_1^i$, alors les éléments de SB^* à l'échelle 1 sont les mêmes que ceux de SB
- sinon, on choisit un élément de SB à l'échelle 1 (celui dont l'énergie est la plus grande) que l'on supprime tout en rajoutant à l'échelle 2 ses quatre fils pour compléter B . SB est complétée par les fils sélectionnés par E .
- on itère la procédure à l'échelle 2, et ainsi de suite jusqu'à l'échelle $p - 1$.

Une fois que l'on a obtenu SB^* , il faut modifier l'image de façon à ce que la meilleure base B^* pour l'image marquée vérifie : $E(B^*, K) = SB^*$. Pour cela, on augmente les coefficients des fils des éléments des niveaux supprimés de SB pour que leurs énergies deviennent supérieures au seuil s . On itère l'opération. Notons que les modifications se font de haut en bas c'est à dire à résolution fréquentielle croissante (voir figure 4).

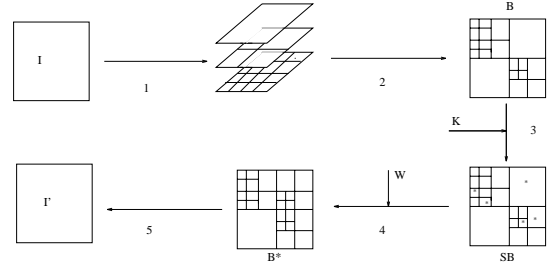


FIG. 3: Processus de watermarking d'une image

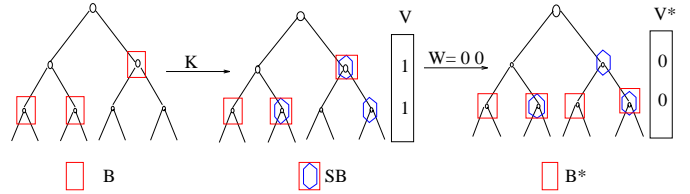


FIG. 4: Codage de la marque sur la meilleure base.

3.2 Le processus de décodage

Il se déroule en 4 étapes (voir figure 5) :

- Les étapes 1, 2 et 3 sont les mêmes que pour le processus d'encodage.
- L'étape 4 correspond au calcul de la parité du nombre de vecteurs pour chacun des niveaux des sous bases secrètes.

Ce processus ne nécessite pas la présence de l'image originale mais la valeur du seuil de sélection de la meilleure base est utilisée en plus de la clé secrète.

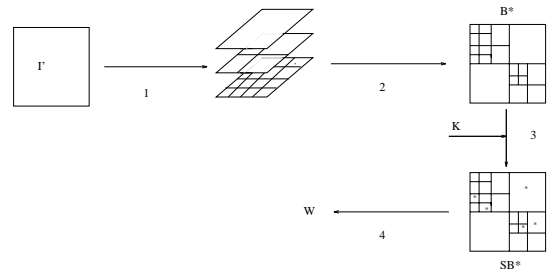


FIG. 5: Processus de détection de la marque

4 Expérimentations numériques

Nous avons appliqué notre méthode à l'image Lenna (256×256 , 8 bits par pixel) (figure 7 a.). Pour illustrer la

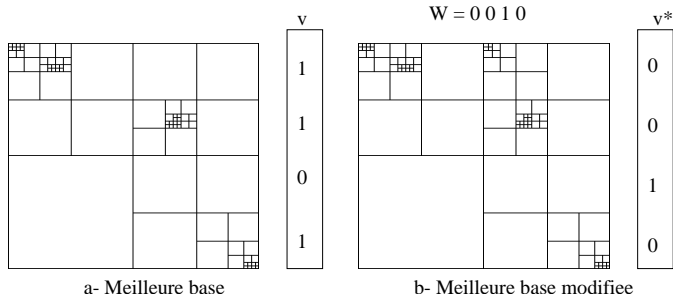


FIG. 6: a : meilleure base et parité v de la sous base SB . b: watermark, meilleure base modifiée et parité de la sous base SB^* (égale à la watermark).



FIG. 7: Image originale et image marquée.

méthode, nous montrons sur la figure 6 la meilleure base et les modifications qu'elle a subies pour respecter la parité voulue. Par souci de simplicité, nous avons pris comme sous base SB l'arbre débutant après le noeud $C_{1,0,1}$ et nous nous sommes limités à un watermark de 4 bits : $W = 0010$.

Nous présentons aussi figure 7b, une image marquée d'un watermark de 32 bits. Cette image ne présente pas d'altérations visibles par rapport à l'original. La figure 8 représente l'image de la valeur absolue de la différence entre l'image marquée et l'image originale, amplifiée d'un facteur de 10^5 . Notons que les modifications apparaissent sur toute l'image. En ce qui concerne la robustesse à la compression, les essais réalisés en utilisant JPEG avec un taux de qualité de 75% semblent indiquer un bon comportement.

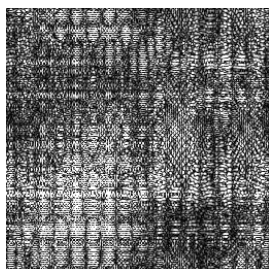


FIG. 8: Image de la valeur absolue de la différence entre l'image marquée et l'image originale, amplifiée d'un facteur de 10^5 .

5 Discussion

Nous avons proposé dans cet article une nouvelle technique de watermarking qui introduit un filigrane virtuel sur la structure de la décomposition en paquets d'ondelettes via un algorithme de sélection énergétique de la meilleure base. Des études futures porteront sur les choix des différents paramètres de la méthode et leurs conséquences sur la robustesse et l'invisibilité du marquage. En particulier, nous avons choisi ici de présenter des résultats obtenus avec l'ondelette de Coifmann 2. L'utilisation d'autres ondelettes est en cours. De plus, nous pouvons intervenir sur l'étape de modification de la base. Le choix du vecteur et la façon de le modifier ont une grande incidence sur la robustesse et aussi sur la visibilité. En outre, nous nous proposons d'optimiser l'algorithme de sélection des sous bases pour permettre une détection plus sûre de la watermark.

Notons que la profondeur $q + 1$ de l'arbre de décomposition en paquets d'ondelettes et le nombre m de sous bases doivent être suffisamment grands pour pouvoir coder la marque et minimiser le nombre de fausses alarmes, qui est grossièrement de l'ordre de 2^{-mq} . On ne peut donc pas a priori marquer des images de trop petite taille. Il semble cependant que ces difficultés puissent être contournées en travaillant sur une version agrandie de l'image originale. Nous étudierons aussi le cas d'images très peu texturées comme les dessins et les images synthétiques.

Références

- [1] G. Voyatzis and I. Pitas. Digital image watermarking using mixing systems. *Computer & Graphics (submitted)*, 22(3), 1998.
- [2] F. T. Leighton I. J. Cox, J. Kilian and T. Shamon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(12):1673–1687, 1997.
- [3] G. R. Arce and L. Xie. A blind digital image signature in wavelet compression. In *IEEE Trans. Signal Processing*, volume II, Chicago, Oct. 1998.
- [4] J. Puate and F. Jordan. Using fractal compression scheme to embed a digital signature into an image. In *SPIE 96 Proceedings*.
- [5] M.V. Wickerhauser. High-resolution still picture compression. *Digital Signal Processing: a Review Journal*, 2(4):204–226, October 1992.
- [6] R.R. Coifman and D.L. Donoho. Translation-invariant de-noising. Technicalreport 475, Stanford University, May 1995.
- [7] R. Coifman and V. Wickerhauser. Entropy-based algorithms for best basis selection. *IEEE trans. Info. Theorie*, 38:713–718, 1992.
- [8] E. Hitti and M.F. Lucas. Wavelet basis selection for abrupt changes detection in multicomponent signal. *EUSIPCO 98*, pages 1841–1844, 1998.