

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГОЛОГРАММЫ В ЗАДАЧЕ ВСТРАИВАНИЯ СКРЫТЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

© 2011 г. А. П. Старченко

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург
E-mail: lexus_spb84@mail.ru

Показаны возможность применения и преимущества дискретного косинусного преобразования для встраивания и восстановления скрытых водяных знаков. Установлено, что метод построения голограммы на основе дискретного косинусного преобразования обеспечивает расширение динамического диапазона и сокращает избыточность при восстановлении изображения водяного знака по сравнению с изображением, восстанавливаемым по методике, основанной на преобразовании Фурье.

Ключевые слова: голограмма, дискретное косинусное преобразование, водяной знак.

Коды OCIS: 210.2860.

Поступила в редакцию 23.11.2010.

Введение

Преимущество дискретного косинусного преобразования (ДКП) широко известно и используется во многих практических задачах, в которых необходима высокая скорость обработки в сочетании с сохранением качественного представления данных. Примером могут служить цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) для обработки и кодирования сигналов изображения, а также применение ДКП в современных алгоритмах сжатия медиаданных. Целесообразность применения ДКП в задаче встраивания скрытых водяных знаков продиктована такими преимуществами перед дискретным преобразованием Фурье (ДПФ), как расширение динамического диапазона, сокращение избыточности при восстановлении изображения. Цель работы – показать возможность существенного повышения отношения сигнал/шум (С/Ш) в изображении “водяного знака”, восстановленном при использовании ДКП, по сравнению с изображением, восстановленным при использовании традиционной методики, основанной на преобразовании Фурье.

Принцип устранения избыточности в цифровой голограмме водяного знака

В работе [1] был рассмотрен метод голограммы Фурье с одной боковой полосой (ОБП) и показано, что для восстановления функции

изображения водяного знака $W(u, v)$ из голограммы достаточно выполнить преобразование Фурье только косинусной (или синусной) части комплексной голограммы. Вместе с тем, изначальная избыточность, свойственная представлению данных с помощью преобразования Фурье, является недостатком метода ОБП. В основе избыточности преобразования Фурье лежит известное свойство комплексного сопряжения, которое выражается в симметрии комплексных коэффициентов преобразования Фурье

$$S(e^{i\omega}) = S^*(e^{-i\omega}),$$

где звездочка обозначает комплексное сопряжение, $S(e^{i\omega})$ – преобразование Фурье сигнала $s(x)$. Следствием свойства комплексно-сопряженной симметрии преобразования Фурье является появление суммы двух изображений функции $W(u, v)$ в процессе восстановления функции цифровой голограммы Фурье $h(x, y)$. Эти изображения имеют осевую зеркальную симметрию

$$\begin{aligned} F\{h(x, y)\} = & W(u - M, v - N) + \\ & + W(-u - M, -v - N) + A(u, v) \end{aligned} \quad (1)$$

и полностью равны друг другу

$$W(w - M, v - N) = -W(-w - M, -v - N).$$

Здесь N и M – несущие частоты, F – оператор преобразования Фурье, $A(u, v)$ – функция автокорреляции.

Исходя из вышесказанного, эффективнее будет использовать косинусное преобразование

как при создании голограммы, так и при восстановлении водяного знака. Множество базисных функций косинусного преобразования имеет вид [2]

$$\left\{1/N_c^{1/2}, \cos[(2m+1)k\pi/2N_c]\right\}, \quad (2)$$

где $m = 0, 1, \dots, N_c - 1$; $k = 1, 2, \dots, N_c - 1$; N_c – размерность вектора входных данных.

В косинусном преобразовании присутствуют только действительные числа. Благодаря этому исчезает избыточность спектральных составляющих, присутствующих в преобразовании Фурье. Очевидно, что ДКП не обладает осевой симметрией, и поэтому результат восстановления функции водяного знака $W(u, v)$ после обратного ДКП будет иметь вид

$$K\{r(x, y)\} \sim W_1(u - M, v - N),$$

где K – оператор косинусного преобразования, $r(x, y)$ – функция голограммы на основе ДКП, $W_1(u, v)$ – функция изображения восстановленного водяного знака.

В настоящей методике мы рассмотрим возможность применения ДКП для встраивания и восстановления скрытых водяных знаков. В отличие от комплексного ядра преобразования Фурье ядро косинусного преобразования представляет собой четную функцию косинуса, и вследствие этого ДКП не обладает осевой симметрией. Таким образом, можно заключить, что использование ДКП обеспечивает устранение избыточности при восстановлении изображения водяного знака.

Использование ДКП вместо метода голограммы Фурье

- позволяет исключить осевую симметрию, что обеспечивает двукратное сокращение избыточности;
- сокращение избыточности соответствует перераспределению энергии в восстановленном изображении водяного знака;
- перераспределение энергии обеспечивает расширение динамического диапазона восстановленного водяного знака (при прочих равных условиях);
- расширение динамического диапазона приводит к повышению отношения сигнал/шум.

Построение голограмм на основе дискретного косинусного преобразования для встраивания скрытых водяных знаков

Математически функция оригинального изображения-контейнера $g(x, y)$, функция изо-

брожения голограммы на основе ДКП водяного знака $r(x, y)$ и содержащая водяной знак функция изображения-носителя $s(x, y)$ связаны соотношением

$$s(x, y) = g(x, y) + f\{r(x, y)\}, \quad (3)$$

причем $s(x, y) > 0$ и $g(x, y) > 0$ для всех x и y . Оператор f служит для коррекции функции голограммы $r(x, y)$ и в общем случае может быть нелинейным. Косинусное преобразование изображения водяного знака для получения функции голограммы на основе ДКП $r(x, y)$ запишем в виде соотношения

$$r(x, y) = K^{-1}\{W(u - M, v - N)\},$$

где K^{-1} – оператор обратного косинусного преобразования, M и N – смещение функции водяного знака в плоскости частот (u, v) . После выполнения косинусного преобразования функции $W(u, v)$ по базису (2) распределение интенсивности в голограмме будет иметь вид

$$r(x, y) = w(x, y) \cos(xM + yN) + A_0,$$

где A_0 – постоянная составляющая. Результат вычисления функции голограммы на основе ДКП является вещественным преобразованием, так как в косинусном преобразовании присутствуют только действительные числа (2). Для восстановления функции голограммы на основе ДКП и выделения изображения водяного знака необходимо выполнить прямое косинусное преобразование

$$K\{r(x, y)\} = W_1(u - M, v - N) + A(u, v), \quad (4)$$

где $A(u, v)$ – функция автокорреляции.

Оценка отношения сигнал/шум при восстановлении скрытых водяных знаков

Качество восстановленного изображения водяного знака зависит от искажений, вносимых функцией изображения-контейнера $g(x, y)$ при встраивании по формуле (3). В общем случае функция $g(x, y)$ является случайной. Спектральная плотность случайного изображения определяет доли мощности, вносимые каждой из пространственных частот. Значения функции изображения восстановленного водяного знака наиболее выражены на тех частотах, на которых мощность функции изображения-контейнера мала, и подавляются на тех частотах, на которых мощность функции изображения-контейнера значительна. В качестве оценки отношения С/Ш будем ис-

пользовать оценку взаимной центрированной корреляции (ковариации) функции исходного изображения водяного знака W и функции изображения водяного знака W_1 после восстановления

$$C(u_1, v_1) = \langle [W(u, v) - a][W_1(u - u_1, v - v_1) - a_1] \rangle,$$

где $\langle \rangle$ – оператор усреднения по двумерному пространству v, u ; a и a_1 – средние значения сигналов W и W_1 соответственно. Такой подход широко используется при обнаружении объектов с помощью согласованной фильтрации, когда критерием оптимальности служит максимум отношения С/Ш, который достигается в момент полного совпадения сигналов. Выходной эффект согласованной фильтрации характеризует степень корреляции входного изображения с эталонным сигналом. Учитывая, что отношение С/Ш определяется по пиковому значению, нас будет интересовать значение ковариации $C(0, 0)$ при полном совмещении сигналов. При этом формула для вычисления отношения С/Ш упростится и примет вид

$$\text{С/Ш} = C(0, 0) / \langle P_{gg}(u, v) \rangle,$$

где $C(0, 0)$ – пиковая ковариация, соответствующая полному совпадению сигналов W и W_1 , когда

$$C(0, 0) = \sum \sum [W(u, v) - a][W_1(u, v) - a_1] dudv.$$

В соответствии с равенством Парсеваля окончательно запишем формулу для расчета отношения С/Ш как

$$\text{С/Ш} = \sum \sum [W(u, v) - a][W_1(u, v) - a_1] \times \frac{dudv}{\sum \sum s^2(x, y) dx dy}. \quad (5)$$

На рис. 1 представлено случайное полуточновое изображение-контейнер функции $g(x, y)$ с нормальным распределением сигнала и дисперсией, равной 6. Размерность изображения 256×256 элементов, число уровней квантования – 2^8 .

Встраивание водяного знака будем осуществлять в частотной области в соответствии с формулами

$$s(x, y) = F^{-1} \{F[g(x, y)] + bW(u, v)\} \quad (6)$$

и

$$s(x, y) = K^{-1} \{K[g(x, y)] + bW(u, v)\}, \quad (6a)$$

где F и K – операторы ДПФ и ДКП соответственно, b – коэффициент усиления. При этом будут рассмотрены два варианта преобразова-

ний. Первый вариант будет выполняться непосредственно в соответствии с формулами (6) и (6a). Во втором варианте будут использовать голограммы с рассеивателем для снижения возмущений в функции выходного сигнала $s(x, y)$, вносимых функцией изображения водяного знака. Добавление рассеивателя достигается умножением сигнала водяного знака на множитель со случайной фазой. В качестве водяных знаков будем использовать бинарное и полуточновое изображения размерностью $L \times L$. На рис. 2 представлено полуточновое изображение водяного знака.

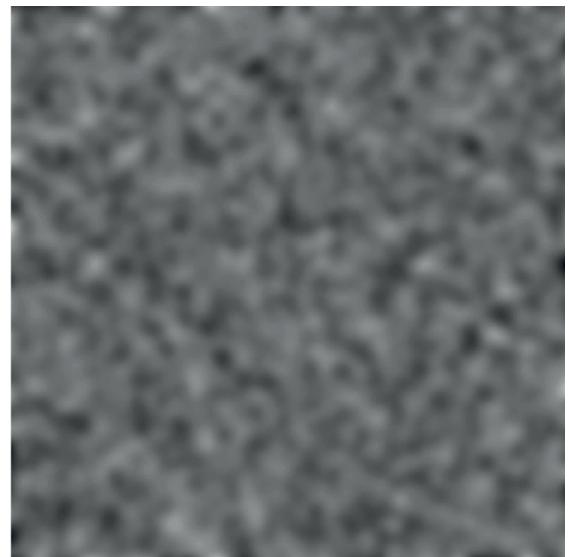


Рис. 1. Изображение-контейнер функции $g(x, y)$ с нормальным распределением сигнала.

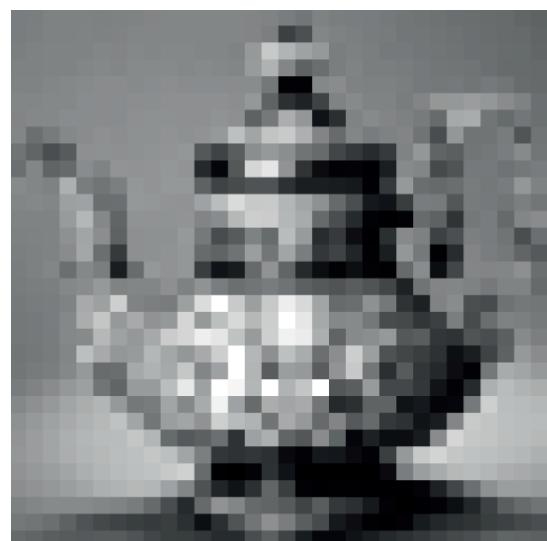


Рис. 2. Полуточновое изображение водяного знака.

На рис. 3а и 3б приведены полутоноевые изображения водяного знака, восстановленные методами ДПФ и ДКП соответственно, а на рис. 4а и 4б соответствующие им гистограммы.

Сравнение гистограмм на рис. 4а и 4б показывает расширение динамического диапазона примерно в 2 раза при использовании метода голограммы на основе ДКП.

Все результаты расчетов сведены в табл. 1, где σ_s^2 – дисперсия функции выходного изображения $s(x, y)$. Результаты расчета дисперсии σ_s^2 и динамического диапазона ΔB представлены в уровнях квантования. Размерность изображений водяных знаков $L = 32$ элемента, значение коэффициента усиления во всех экспериментах $b = 17$, пространственные несущие

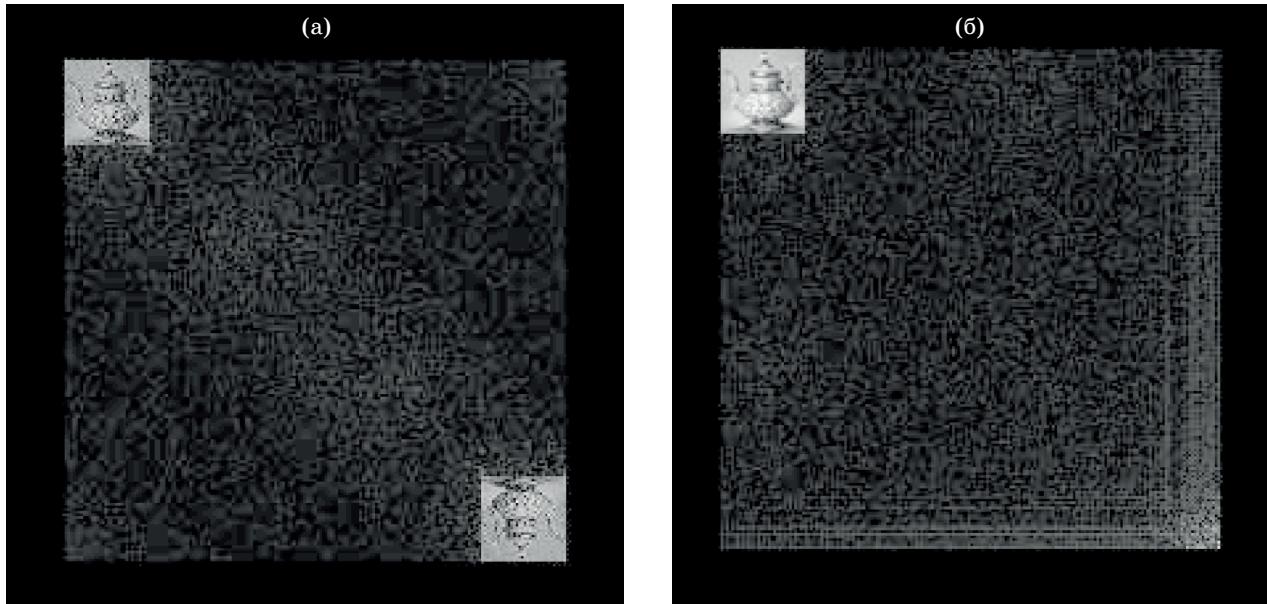


Рис. 3. Полутоноевые изображения водяного знака, восстановленные методами ДПФ (а) и ДКП (б).

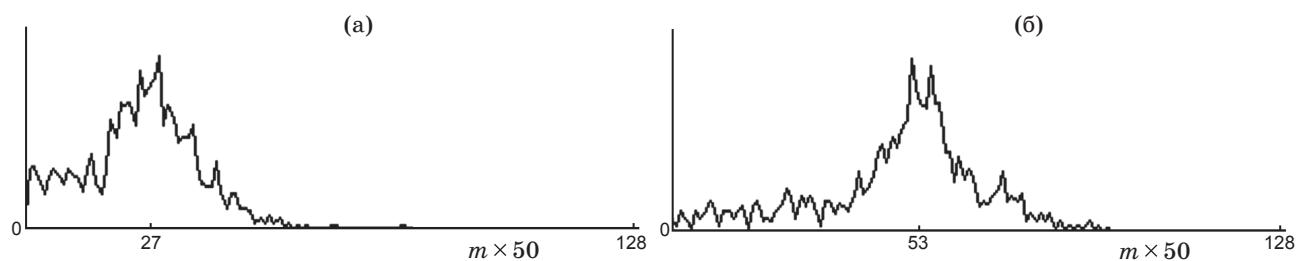


Рис. 4. Гистограммы полутоноевых изображений водяного знака, восстановленных методами ДПФ (а) и ДКП (б).

Таблица 1. Сводные данные экспериментов

Метод	Дин. диапазон, $\times 50$	С/Ш	Дисперсия, σ_s^2
Голограмма Фурье; бинарный ВЗ	43	2705,74	44,87
Косинусная голограмма; бинарный ВЗ	86	5048,88	50,53
Голограмма Фурье; бинарный ВЗ с рассеивателем	43	2750,43	44,81
Косинусная голограмма; бинарный ВЗ с рассеивателем	86	5052,64	50,57
Голограмма Фурье; полутонаовой ВЗ	27	545,74	44,84
Косинусная голограмма; полутонаовой ВЗ	53	875,24	50,12
Голограмма Фурье; полутонаовой ВЗ с рассеивателем	26	482,10	44,72
Косинусная голограмма; полутонаовой ВЗ с рассеивателем	52	867,74	50,16

ВЗ – водяной знак.

Таблица 2. Сравнение методов по критерию С/Ш и дисперсии $s(x, y)$

$\Delta B_{\cos}/\Delta B_F$	$C/\text{III}_{\cos}/C/\text{III}_F$	$\sigma_{\cos}^2/\sigma_F^2$
2,0	1,86	1,12
2,0	1,83	1,12
1,96	1,60	1,11
2,0	1,79	1,12

Примечание. Индексы cos и F означают использование соответственно методов ДКП и ДПФ.

голограммы N и M (трансформанты ДПФ и ДКП) во всех экспериментах были равны и имели значение 33. Выбор равных значений трансформант N и M обеспечивает диагональное расположение восстановленных водяных знаков (см. рис. 3).

Сравнение методов по критерию отношения С/Ш и по величине дисперсии функции $s(x, y)$ выходного сигнала представлено в табл. 2. Из сравнения видно, что метод построения голограммы на основе ДКП по критерию отношения С/Ш эффективнее метода голограммы Фурье не менее, чем в 1,6 раза. Вместе с тем, по критерию величины возмущений σ_s^2 выходного сигнала видно, что метод построения голограммы на основе ДКП уступает методу голограммы

Фурье, причем рост возмущений составил не более, чем 1,12 раза.

Заключение

Исследования показали принципиальную возможность и преимущества применения голограммы на основе ДКП для встраивания скрытых водяных знаков. Метод голограммы на основе ДКП эффективнее метода голограммы Фурье по критерию отношения С/Ш не менее, чем в 1,6 раза, и обеспечивает расширение в 2 раза динамического диапазона восстановленного изображения водяного знака.

Установлено, что расширение динамического диапазона и сокращение избыточности в голограмме на основе ДКП водяного знака обусловлены исключением зеркально-осевой симметрии при построении цифровой голограммы с помощью ДКП.

ЛИТЕРАТУРА

- Смирнов М.В. Голографический подход к встраиванию голографических водяных знаков в фотоизображение // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 6. С. 51–56.
- Britanak V., Yip P.C., Rao K.P. Discrete cosine and sine transforms // Academic Press. 2006. 368 p.