



УДК 681.3

© А. П. Бахрушин, 2008

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИДЕОКАДРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНЫХ ФУНКЦИЙ С ЦЕЛЬЮ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВНЕДРЕНИЯ И ПОИСКА ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

Бахрушин А. П. – канд. техн. наук, проф. кафедры “Информационные системы и прикладная информатика”, тел. (42622) 40146, e-mail: stripylife@yahoo.com (ДВГСГА)

В статье рассматриваются вопросы обработки видеоданных с целью защиты авторских прав. Описывается новый метод, обеспечивающий эффективную синхронизацию процесса внедрения цифрового водяного знака (ЦВЗ) с процессом его поиска на основе спектрального анализа каждого видеокadra. Для сокращения времени спектрального анализа предлагается использовать комплексную систему импульсных функций. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного метода синхронизации, направленного против таких атак, как монтаж видеоданных, удаление кадров и их перестановка.

This paper examines the problems with video processing for copyright protection and describes a new method for efficient synchronization of the watermark embedding process with the watermark searching process using a spectral analysis of every video frame. For time reduction of the spectral analysis it is proposed to employ a complex system of impulse functions. The experiments illustrated the effectiveness of the proposed method of synchronization against such attacks as scene editing, cutting and swapping.

Ключевые слова: цифровые водяные знаки, видеоданные, синхронизация, спектральный анализ, импульсная система базисных функций.

Введение

Одной из ключевых проблем, возникающих при создании, хранении и передаче информационной продукции в цифровой форме, является защита ее авторского права. Действительно, информационная продукция, представленная, например, в форме цифровых изображений, а также цифровых аудио- или видеоданных, исключительно уязвима в плане ее неправомерного ис-

пользования. Любой документ в цифровой форме может быть легко скопирован, обработан, размножен и распространен.

В настоящее время для защиты авторских прав на информационную продукцию в цифровой форме широко используются ЦВЗ, под которыми принято понимать специальные метки, встраиваемые в цифровые данные с целью их аутентификации и защиты от нелегального использования [1]. При внедрении в информационную продукцию ЦВЗ преследуются следующие цели: ЦВЗ должен четко определять держателя авторских или имущественных прав этой продукции и позволять отслеживать ее распространение (далее будут обсуждаться только вопросы относительно видеоданных в цифровой форме, так как нет принципиальных различий при внедрении ЦВЗ в изображения, аудиоданные или какие-либо другие данные).

Существуют две принципиально различные стратегии внедрения ЦВЗ в видеоданные:

- ЦВЗ внедряется в каждый кадр видеоданных;
- ЦВЗ внедряется только в некоторые кадры в соответствии с тем или иным критерием.

При этом для эффективной защиты видеоданных от их несанкционированного использования ЦВЗ должен обладать следующими основными качествами [1]:

- невидимость;
- помехоустойчивость (устойчивость к искажениям);
- защищенность (стойкость к фальсификации);
- извлекаемость законным владельцем с высокой надежностью;
- устойчивость к преднамеренным и непреднамеренным атакам.

Целью преднамеренной атаки может быть, например, изъятие ЦВЗ из видеоданных [2]. Этот тип атаки реализуется наиболее просто, если один и тот же ЦВЗ внедряется в каждый кадр видеоданных [2, 3]. Поэтому для противодействия этому типу атаки может быть использована менее уязвимая стратегия внедрения ЦВЗ, согласно которой ЦВЗ внедряется только в некоторые кадры, выбор которых производится на основе того или иного критерия [3, 4]. Однако в этом случае целью атаки может стать нарушение синхронизации между процессом внедрения ЦВЗ в видеоданные и процессом их извлечения из этих данных. В результате этой атаки ЦВЗ остается невредимым, но сам владелец видеоданных теряет возможность извлечь из них ЦВЗ, чтобы тем самым доказать свои авторские или имущественные права. Наиболее опасными атаками такого рода являются так называемые геометрические атаки в виде сдвига каждого видеокадра вдоль пространственных координатных осей на неопределенное число пикселей, либо в виде поворота каждого видеокадра на неопределенный угол, либо в виде изменения масштаба кадров на неопределенную величину [5].

При внедрении ЦВЗ только в выборочные кадры на этапе их извлечения неизбежно возникает проблема поиска именно тех кадров, в которые ЦВЗ были внедрены [4, 6]. Если, например, была выбрана простейшая стратегия,



согласно которой ЦВЗ внедрялся в каждый сотый кадр, то преднамеренная атака в виде изъятия из видеоданных даже одного кадра может привести к потере синхронизации между процессом внедрения и извлечения ЦВЗ. В этой связи следует заметить, что к подобному результату могут привести и непреднамеренные атаки, вызванные, например, необходимостью в производственном монтаже видеоданных (вырезка некоторых сцен, вставка рекламы и т. д.) Поэтому противостоять этим атакам можно только на основе более сложных стратегий внедрения ЦВЗ в видеопroduкцию.

В данной статье предлагается внедрять ЦВЗ только в те кадры, частотные описания которых соответствуют заданному критерию. Соответственно поиск кадров, в которые был внедрен ЦВЗ, предлагается производить на основе спектрального анализа каждого кадра. Поэтому преднамеренные или непреднамеренные атаки в виде изъятия некоторого числа кадров, вставки новых кадров или перестановки некоторых кадров в принципе не могут привести к потере синхронизации между процессом внедрения и извлечения ЦВЗ. Очевидно, что в данном случае выбор кадров, в которые должен быть внедрен ЦВЗ, носит непредсказуемый характер. Это означает, что процесс внедрения ЦВЗ производится случайным образом, и поэтому без частотного описания тех кадров, в которые был внедрен ЦВЗ, вероятность их обнаружения практически равна нулю. Из этого следует, что возможная атака в виде попытки изъятия тех кадров, в которые был внедрен ЦВЗ, заведомо обречена на провал. Геометрические атаки в виде поворота кадров и изменения их масштаба в данной работе не рассматривались.

Для практической реализации как предлагаемой стратегии внедрения ЦВЗ в кадры, частотное описание которых отвечает определенному критерию, так и стратегии поиска тех кадров, в которые ЦВЗ был внедрен, необходимо производить спектральный анализ каждого кадра видеоданных. Как известно, традиционно такой спектральный анализ выполняется с помощью быстрого двумерного прямого преобразования Фурье с использованием экспоненциальной системы базисных функций. Однако в данном случае при использовании экспоненциального базиса спектральный анализ каждого кадра при частоте их следования 25 кадров в секунду может потребовать существенных затрат времени. Потому проблема оперативной обработки такого большого объема видеоданных становится исключительно актуальной. Для ее решения спектральный анализ каждого кадра предлагается производить на основе экспоненциальной системы импульсных функций [7], которая позволяет значительно ускорить вычислительный процесс.

1. Синхронизация процесса внедрения ЦВЗ в видеоданные с процессом их поиска на основе спектрального анализа

1.1. Описание комплексной системы импульсных функций

Из всех известных спектральных форм представления сигнала в силу ряда причин наибольшее распространение получило его разложение по ортого-

нальной системе экспоненциальных базисных функций, которое лежит в основе классического спектрального анализа сигналов. Замечательным свойством данного разложения является свойство инвариантности амплитудно-частотного спектра сигнала по отношению к его сдвигу. Указанное свойство может быть использовано, например, при построении алгоритмов распознавания изображений, имеющих произвольные пространственно-угловую ориентацию и масштаб [5], при решении задач защиты мультимедийных данных с помощью ЦВЗ, а также задач стеганографии. Однако процедуры преобразования сигналов на основе экспоненциального базиса, например, двумерных сигналов в виде изображений могут потребовать значительных временных затрат даже при применении алгоритмов БПФ. Значительного ускорения процедуры формирования спектра можно достигнуть за счет использования кусочно-постоянных систем базисных функций, например, базиса Уолша. В то же время получаемый в этом случае спектр не является инвариантным по отношению к сдвигу анализируемого сигнала.

Для решения перечисленных проблем в работе [7] была предложена комплексная система импульсных функций, с помощью которой можно получить спектр, отвечающий как требованию инвариантности, так и требованию быстродействия. Предложенная ортогональная система функций определяется на дискретном множестве

$$M = \{l : l = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\}, \quad l \in Z$$

и имеет вид

$$\dot{B}ah_u(l) = c_u(l) - i w_u(l), \quad u = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1, \quad (1)$$

где 2^n – число подынтервалов, составляющих период некоторого подлежащего анализу дискретного сигнала $s(l)$.

Функции $c_u(l)$ и $w_u(l)$ определяются следующим образом.:

$$c_0(l) = 1, \quad w_0(l) = 0 \quad \text{при } l \in M.$$

При $u \neq 0$

$$c_u(l) = \sum_{d=0}^{2^{n-1}} (\cos(2^{u-n} \pi d)) e(l-d),$$
$$w_u(l) = \sum_{d=0}^{2^{n-1}} (\sin(2^{u-n} \pi d)) e(l-d),$$

где l изменяется от 0 до $2^n - 1$ с шагом 2^{n-u-1} , а функция $e(l-d)$ определяется как



$$e(l-d) = \begin{cases} 1, & \text{если } l = d, \\ 0, & \text{если } l \neq d. \end{cases}$$

Если l принимает другие значения, то

$$c_u(l) = w_u(l) = 0.$$

С помощью формулы Эйлера система импульсных функций (1) может быть представлена в показательной форме:

$$\begin{aligned} \dot{B}ah_u(l) &= \sum_{d=0}^{2^n-1} (\cos(2^{u-n}\pi d) - i \sin(2^{u-n}\pi d)) e(l-d) = \\ &= \sum_{d=0}^{2^n-1} (\exp(-i(2^{u-n}\pi d))) e(l-d) = \\ &= \exp(-i(2^{u-n}\pi l)), \end{aligned}$$

где l изменяется от 0 до $2^n - 1$ с шагом 2^{n-u-1} .

Для решения проблемы получения спектра, инвариантного к сдвигам сигнала $s(l)$, в работе [8] было предложено производить циклические сдвиги некоторых импульсных функций, определяемых выражением (1) относительно сигнала $s(l)$.

С учетом циклических сдвигов систему функций (1) можно представить в следующем модифицированном виде:

$$\dot{B}ah_u^\xi(l) = \hat{c}_u^\xi(l) - i \hat{w}_u^\xi(l),$$

где ξ – целочисленная переменная, значение которой изменяется от

0 до $2^{n-u-1} - 1$ с шагом 1,

$\hat{c}_u^\xi(l)$ и $\hat{w}_u^\xi(l)$ – функции $c_u(l)$ и $w_u(l)$, сдвинутые на ξ подынтервалов, $u = 0, 1, 2, \dots, n - 1$.

Для примера на рис. 1 представлены функции $\hat{c}_u^\xi(l)$ и $\hat{w}_u^\xi(l)$ при различных значениях параметров ξ и u .

В этом случае амплитудно-частотный спектр может быть представлен в виде

$$G_u = \sum_{\xi=0}^{2^{n-u-1}-1} G_u^\xi, \quad (2)$$

где $u = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$,

$$G_u^\xi = \sqrt{(a_u^\xi)^2 + (b_u^\xi)^2},$$

причем

$$a_u^\xi = \sum_{\lambda=0}^{2^{u+1}-1} S(l_\lambda) \hat{c}_u^\xi(l_\lambda), \quad b_u^\xi = \sum_{\lambda=0}^{2^{u+1}-1} S(l_\lambda) \hat{w}_u^\xi(l_\lambda),$$

где $s(l_\lambda)$ – значение анализируемого сигнала в точке

$$l_\lambda = 2^{n-u-1} \cdot \lambda,$$

λ – целочисленная переменная.

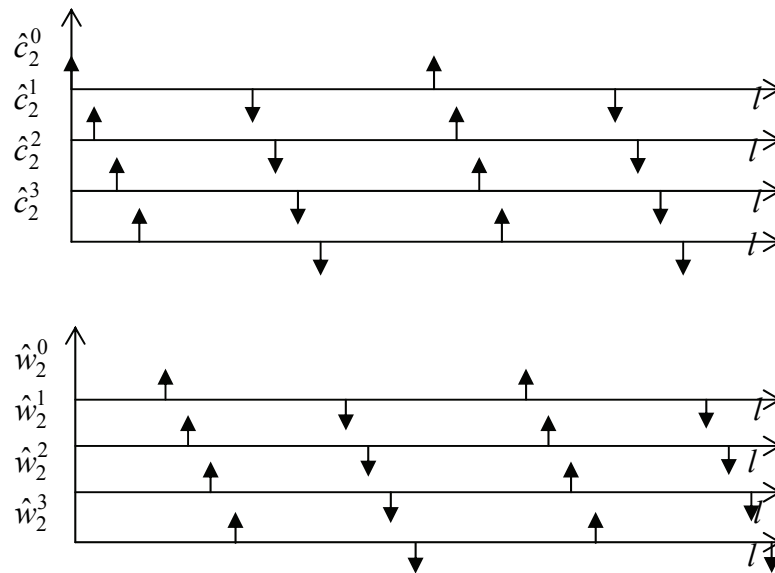


Рис. 1. Функции $\hat{c}_u^\xi(l)$ и $\hat{w}_u^\xi(l)$ при $u = 2$ и $n = 5$

Рассмотрим снова ситуацию, когда продолжительность анализируемого сигнала меньше, чем продолжительность шага, соответствующего некоторой функции с номером \hat{u} . Если, например, в этом случае сигнал не коррелирует с функцией $\dot{B}ah_{\hat{u}}^\xi(l)$, то возникает вероятность того, что он будет коррелировать с функцией $\dot{B}ah_{\hat{u}}^{\xi+1}(l)$ или с функцией $\dot{B}ah_{\hat{u}}^{\xi+2}(l)$ и т.д. А это означает, что вероятность корреляции сигнала $s(l)$, по меньшей мере, с одной из функций

$$\dot{B}ah_{\hat{u}}^\xi(l), \quad \xi = 0, 1, \dots, 2^{n-u-1} - 1$$



равна 1. Действительно, пусть, например, $\hat{u} = 1$. Тогда значения модуля спектра сигнала $s(l)$ при различных значениях k будут изменяться следующим образом:

$$G_1^0 = 0, \quad G_1^1 = 0, \quad G_1^2 \neq 0, \quad G_1^3 \neq 0,$$

т.е. будут отличны от нуля только после третьего и четвертого сдвигов функций $\dot{B}ah_1^\xi(l)$.

Другими словами, корреляция между сигналом $s(l)$ и функциями $\dot{B}ah_u^\xi(l)$ в этом случае будет иметь место независимо от положения сигнала $s(l)$. На завершающем этапе в результате операции суммирования, выполняемой в соответствии с выражением (2), окончательно формируется спектр, инвариантный к сдвигам анализируемого сигнала. Для того чтобы сделать обобщение одномерной системы на двумерный случай, рассмотрим систему комплексных функций

$$\dot{B}ah_{uv}(l, k) = c_{uv}(l, k) - i w_{uv}(l, k), \quad (3)$$

определенную на дискретном множестве

$$M = \{(l, k) : l = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1, \quad k = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\},$$

где $u = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1, \quad v = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1,$

2^n – число вертикальных и горизонтальных подынтервалов, составляющих период дискретного сигнала $s(l, k)$.

Другими словами, 2^n представляет собой минимальное целое положительное число, для которого справедливы следующие утверждения:

$$s(l, k + 2^n) = s(l, k),$$

$$s(l + 2^n, k) = s(l, k),$$

т.е. период двумерного сигнала $s(k, l)$ определяется из условий:

$$\{(l, k) : 0 \leq l \leq 2^n - 1, \quad 0 \leq k \leq 2^n - 1\}.$$

Функции $c_{uv}(l, k)$ и $w_{uv}(l, k)$ формируются следующим образом:

$$c_{00}(l, k) = 1, \quad w_{00}(l, k) = 0, \quad \text{для } (l, k) \in M;$$

при $u \neq 0$ и $v \neq 0$

$$c_{uv}(l, k) = \sum_{d=0}^{2^n-1} \sum_{b=0}^{2^n-1} (\cos(2^{u-n} \pi l + 2^{v-n} \pi k)) e(l-d, k-b),$$

$$w_{uv}(l, k) = \sum_{d=0}^{2^n-1} \sum_{b=0}^{2^n-1} (\sin(2^{u-n}\pi l + 2^{v-n}\pi k))e(l-d, k-b),$$

где $e(l-d, k-b)$ – представляет собой единичный импульс, задержанный на d и b сдвигов:

$$e(l-d, k-b) = \begin{cases} 1, & \text{если } (l, k) = (d, b), \\ 0, & \text{если } (l, k) \neq (d, b). \end{cases}$$

В соответствии с формулой Эйлера система комплексных функций (3) может быть выражена через экспоненциальные функции:

$$\begin{aligned} \dot{B}ah_{uv}(l, k) &= \sum_{d=0}^{2^n-1} \sum_{b=0}^{2^n-1} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2^n}(2^u l + 2^v k)\right) - \right. \\ &\quad \left. - i \sin\left(\frac{\pi}{2^n}(2^u l + 2^v k)\right) \right] e(l-d, k-b) = \\ &= \sum_{d=0}^{2^n-1} \sum_{b=0}^{2^n-1} \left[\exp\left(-i \frac{\pi}{2^n}(2^u l + 2^v k)\right) e(l-d, k-b) \right] = \\ &= \exp\left(-i \frac{\pi}{2^n}(2^u l + 2^v k)\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где k изменяется от 0 до $2^n - 1$ с шагом 2^{n-u-1} ,

l изменяется от 0 до $2^n - 1$ с шагом 2^{n-v-1} .

Как и в одномерном случае, для получения спектра, инвариантного к сдвигам сигнала $s(l, k)$, необходимо производить циклические сдвиги функций (4) относительно этого сигнала. С учетом сдвигов система функций (3) может быть записана в виде:

$$\dot{B}ah_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k) = \hat{c}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k) - i \hat{w}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k),$$

где $u = 0, 1, 2, \dots, n-1$, $v = 0, 1, 2, \dots, n-1$.

Функции $\hat{c}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ и $\hat{w}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ формируются в результате сдвигов на ξ_u и ξ_v подынтервалов функций $c_{uv}(l, k)$ и $w_{uv}(l, k)$ вдоль горизонтальной и (или) вертикальной осей.

На рис. 2 отображены функции $\hat{c}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ и $\hat{w}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ при конкретных значениях параметров u , v и n .



0		1		0		-1	
1		0		-1		0	
0		-1		0		1	
-1		0		1		0	

$$\hat{w}_{11}^{00}(l, k)$$

	0		1		0		-1
	1		0		-1		0
	0		-1		0		1
	-1		0		1		0

$$\hat{w}_{11}^{01}(l, k)$$

0		1		0		-1	
1		0		-1		0	
0		-1		0		1	
-1		0		1		0	

$$\hat{w}_{11}^{10}(l, k)$$

	0		1		0		-1
	1		0		-1		0
	0		-1		0		1
	-1		0		1		0

$$\hat{w}_{11}^{11}(l, k)$$

Рис. 2. Формирование двумерной функции $\hat{w}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ при различных значениях u и v

Рассмотрим условия, при которых осуществляются сдвиги функций $\hat{c}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ и $\hat{w}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$, и величину этих сдвигов.

Если $u = v = 0$, то $\xi_u = \xi_v = 0$;

если $u = 0$ и $v \neq 0$, то $\xi_u = 0$ и ξ_v изменяется от 0 до $2^{n-v-1} - 1$ с шагом 1;

если $u \neq 0$ и $v = 0$, то $\xi_v = 0$ и ξ_u изменяется от 0 до $2^{n-u-1} - 1$ с шагом 1;

если $u \neq 0$ и $v \neq 0$, то ξ_u изменяется от 0 до $2^{n-u-1} - 1$ с шагом 1, и соответственно ξ_v изменяется от 0 до $2^{n-v-1} - 1$ с шагом 1.

В отличие от одномерных функций, при вычислении спектра данные функции сдвигаются не только в горизонтальном направлении, но и в вертикальном и диагональном направлениях.

В результате этих сдвигов вычисляются частные скалярные произведения между каждой базисной функцией $\hat{c}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ и $\hat{w}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l, k)$ и всеми возможными значениями сигнала. На заключительном этапе двумерный амплитудно-частотный спектр анализируемого сигнала может быть получен согласно следующему выражению:

$$G(u, v) = \sum_{\xi_u=0}^{2^{n-u-1}-1} \sum_{\xi_v=0}^{2^{n-v-1}-1} \sqrt{\left(a_{uv}^{\xi_u \xi_v}\right)^2 + \left(b_{uv}^{\xi_u \xi_v}\right)^2}, \quad (5)$$

где

$$a_{uv}^{\xi_u \xi_v} = \sum_{\lambda=0}^{2^{u+1}-1} \sum_{\mu=0}^{2^{v+1}-1} S(l_\lambda, k_\mu) \hat{c}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l_\lambda, k_\mu),$$
$$b_{uv}^{\xi_u \xi_v} = \sum_{\lambda=0}^{2^{u+1}-1} \sum_{\mu=0}^{2^{v+1}-1} S(l_\lambda, k_\mu) \hat{w}_{uv}^{\xi_u \xi_v}(l_\lambda, k_\mu).$$

В данных выражениях $S(l_\lambda, k_\mu)$ представляет собой значение анализируемого сигнала в точках с координатами (l_λ, k_μ) , где $l_\lambda = 2^{n-u-1} \cdot \lambda$ и $k_\mu = 2^{n-v-1} \cdot \mu$, а λ и μ – целочисленные переменные, изменяющиеся в диапазонах от 0 до $2^{u+1} - 1$ и от 0 до $2^{v+1} - 1$ соответственно.

В заключение следует отметить, что при формировании двумерного спектра согласно преобразованию (5) фактически удалось исключить дорогостоящую операцию умножения, так как импульсные функции принимают только три значения -1 , 0 и $+1$. Поэтому на основе разработанной системы импульсных функций можно значительно быстрее сформировать спектр анализируемого сигнала, чем, например, при использовании экспоненциальной системы комплексных функций. Кроме того, замечательным свойством данного спектра, является свойство его инвариантности по отношению к смещениям анализируемого сигнала.

1.2. Описание предлагаемого метода внедрения и поиска ЦВЗ и экспериментальные результаты

Обозначим последовательность видеокадров через $S_k(m, n)$, где k – номер кадра в этой последовательности, m и n – номера строк и столбцов,



соответственно. Тогда любой видеокادر можно представить в виде двумерного дискретного сигнала, являющегося множеством действительных или комплексных чисел, в общем случае определенных для упорядоченных пар целых чисел m и n при $-\infty < m, n < \infty$. Двумерный дискретный сигнал может представлять собой отсчеты аналогового двумерного сигнала $S_k(x, y)$, где $(x, y) \in R^2$.

Предположим, что над некоторым k -м видеокадром было выполнено преобразование согласно выражению (5) и получен амплитудно-частотный спектр $G_k(u, v)$. В соответствии с предлагаемым методом поиска видеокладров для внедрения ЦВЗ разобьем весь диапазон частотных значений спектра $G_k(u, v)$ на три поддиапазона: высокочастотный, среднечастотный и низкочастотный, как показано на рис. 3.

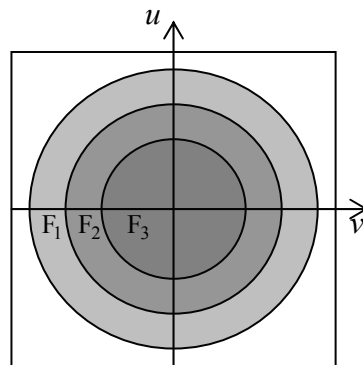


Рис. 3. Спектр $G_k(u, v)$, разбитый на три частотных поддиапазона: высокочастотный F_1 , среднечастотный F_2 и низкочастотный F_3

Тогда ЦВЗ предлагается внедрять только в те видеоклады, для которых выполняется определенное условие. Например, ЦВЗ внедряется в k -й видеоклад только в том случае, если для этого кадра энергия в поддиапазоне низких частот превышает энергию в поддиапазонах средних и высоких частот. Однако как известно, для большинства изображений их энергия в основном сосредоточена в низкочастотном поддиапазоне, затем в среднечастотном и, наконец, в высокочастотном. Это означает, что согласно этому условию ЦВЗ будет внедряться практически в каждый видеоклад. Поэтому в данной работе для реализации идеи случайного, непредсказуемого выбора кадров для внедрения ЦВЗ был предложен следующий метод.

Обозначим через $G_k^n(u)$ величину амплитуды u -й частотной составляющей спектра, соответствующей n -му частотному поддиапазону k -го видеоклада. Тогда среднее значение амплитуд n -го частотного поддиапазона k -го видеоклада можно определить согласно выражению:

$$\eta_{kn} = \frac{1}{P_n} \sum_{u=1}^{P_n} G_k^n(u), \quad k = \overline{1, K}, \quad n = \overline{1, 3},$$

где P_n – общее количество частотных составляющих спектра, соответствующих n -му частотному поддиапазону;

K – общее число кадров в видеоданных.

Определим среднее значение амплитуд n -го частотного поддиапазона для общего числа кадров K :

$$\mu_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \eta_{kn}.$$

В этом случае степень отклонения среднего значения амплитуд n -го частотного поддиапазона k -го видеокadra от среднего значения амплитуд n -го частотного поддиапазона для общего числа кадров K определяется следующим образом:

$$d_n(k) = \eta_{kn} - \mu_n.$$

Вычисленные для k -го видеокadra значения отклонений $d_n(k)$ предлагается проверять на соответствие определенному условию и в случае его выполнения внедрять ЦВЗ в анализируемый видеокادر.

Как показали проведенные статистические исследования, значения этих отклонений носят случайный характер, но для разных частотных поддиапазонов в основном изменяются в одинаковых пределах. Поэтому выбор кадров для внедрения ЦВЗ на основании описанного метода носит случайный, непредсказуемый характер.

С целью поиска кадров, в которые был внедрен ЦВЗ, для каждого видеокadra также предлагается вычислять значения отклонений в поддиапазонах высоких, средних и низких частот и проверять эти значения на соответствие тому же условию, согласно которому ЦВЗ внедрялся в видеоданные. Очевидно, что в случае выполнения поставленного условия должно приниматься решение о наличии в анализируемом k -м видеокadre ЦВЗ.

Для оценки эффективности предложенного метода синхронизации процесса внедрения ЦВЗ с процессом их поиска была проведена серия экспериментальных исследований с использованием десяти типовых видеоклипов. Каждый клип состоял из 300 кадров размером 288×352 пикселей, яркость которых лежала в диапазоне от 0 до 255 уровней квантования. ЦВЗ внедрялись в последовательность кадров, следующих со скоростью 25 кадров в секунду. При такой же скорости следования кадров производился поиск видеокadres, в которые были внедрены ЦВЗ.

На рис. 4, а представлен ЦВЗ, который внедрялся в видеокadры тестового клипа “Bus”. На рис. 4, б отображен один из видеокadres клипа “Bus”, в



который был внедрен данный ЦВЗ. На рис. 5 показаны графики функций $d_n(k)$ для 50 видеокадров.

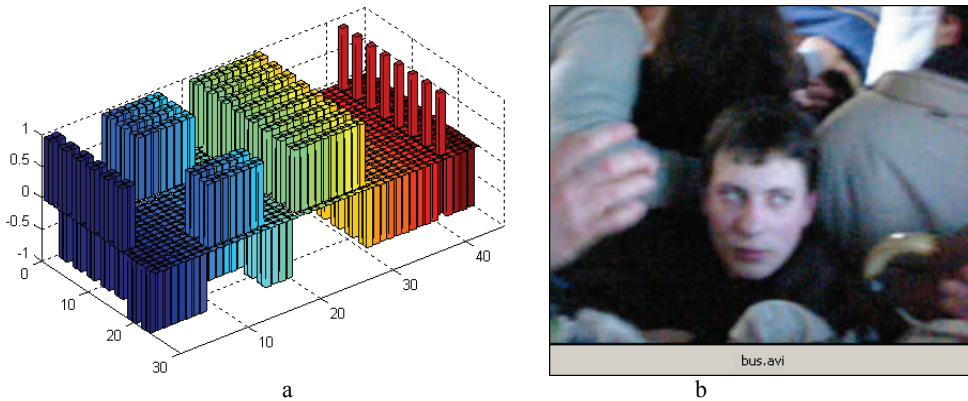


Рис. 4. Слева представлен ЦВЗ, который внедрялся в видеокадры клипа “Bus” и, в частности, в кадр, отображенный справа

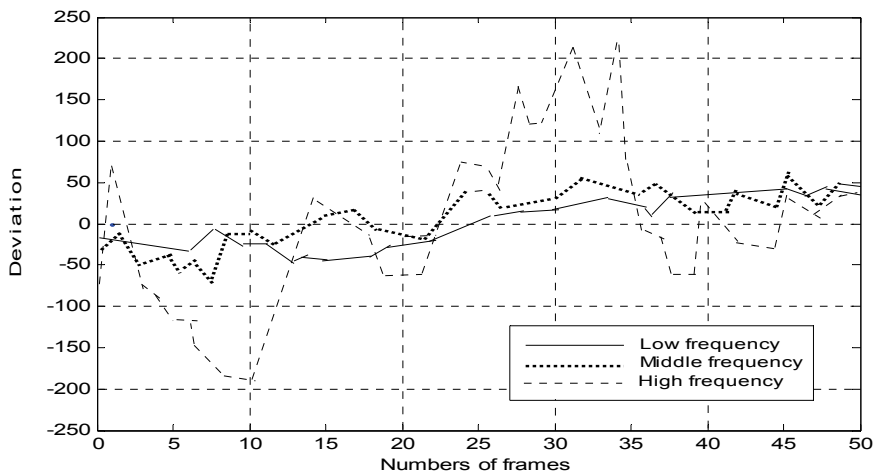


Рис. 5. Графики функций $d_n(k)$ для трех поддиапазонов: высокочастотного ($n = 1$), среднечастотного ($n = 2$) и низкочастотного ($n = 3$)

ЦВЗ внедрялся в k -й видеокадр при условии

$$d_1(k) = \min_{n=1,3} \{d_n(k)\}.$$

Поскольку для клипа “Bus” данное условие выполнялось 61 раз, то соответственно именно это число раз ЦВЗ был внедрен в видеоклип. Как следует из рис. 5, ЦВЗ был внедрен, например, в 10-й кадр и в ряд, примыкающих к нему кадров. Решение о наличии ЦВЗ в анализируемом кадре принималось в результате проверки этого же условия. Необходимо особо подчеркнуть, что благодаря спектральному анализу на основе импульсной системы базисных

функций [7], процесс внедрения ЦВЗ, как и процесс их поиска, осуществлялись в реальном масштабе времени.

Очевидно, что при использовании предложенного метода внедрения и поиска ЦВЗ преднамеренные и непреднамеренные атаки в виде вставки в видеоданные дополнительных кадров или перестановки некоторых кадров в принципе не могут привести к принятию неправильных решений. Поэтому во время экспериментальных исследований тестовые видеоклипы подвергались только атаке в виде удаления некоторых видеок кадров. Действительно, эта атака может привести к удалению в том числе кадров, содержащих ЦВЗ. Однако поскольку ЦВЗ внедрялись в видеоданные с большой избыточностью, то потеря нескольких кадров с внедренными в них ЦВЗ никакого практического значения иметь не может.

Библиографические ссылки

1. *A guide tour of video watermarking* / G. Doerr, J.L. Dugelay // *Signal processing: Image Commun.* 2003. V. 18. № 4.
2. *Countermeasures for unintentional and intentional video watermarking attacks* / Fredric Deguillaume, Gabriela Csurka, Thierry Pun // *Proc. SPIE* 2000. V. 3971.
3. *A Novel approach to collusion-resistant video watermarking* / K. Su, D. Kundur, D. Hatzinakos // *Proc. SPIE* 2002. V. 4675.
4. *New Video Watermarking Scheme Resistant to Collusion and Synchronization Attacks* / A. Bahrushin, K. Kim, K. Lopatin, G. Bahrushina and R. Tsoy // *In Proceedings of the 2007 International Conference on Security and Management. SAM'07 2007.*
5. *RST invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation* / Dong Zheng, Jiying Zhao, Abdulmo, Taleb El Saddik // *IEEE Trans. On Circuits and Systems for Video Technology*, 2003. V. 13.
6. *Temporal synchronization in video Watermarking* / E. T. Lin, E. J. Delp // *IEEE Trans. on Signal Proc.* 2004. V. 52.
7. *Бахрушин А. П.* Спектральный анализ одномерных и двумерных сигналов на основе различных систем базисных функций. Владивосток, 2004.