

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 004.932

ФАЗОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВОДЯНЫЕ ЗНАКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВИДЕОСИГНАЛОВ

© В. В. Сергеев^{1,2}, В. А. Федосеев^{1,2}, Д. А. Шапиро¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва,
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

²ИСОИ РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151
E-mail: vicanfed@gmail.com

Представлен новый метод встраивания стойких цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в видеосигнал. Суть метода состоит в добавлении к каждому пикселю видеосигнала малозаметной синусоидальной последовательности, развивающейся во времени и имеющей индивидуальную фазу. Двумерное поле этих фаз соответствует изображению встраиваемого ЦВЗ. Описаны простые алгоритмы встраивания и извлечения ЦВЗ из видеосигналов. Приведены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие высокое качество извлечения ЦВЗ при их визуальной неразличимости, а также стойкость встроеной информации к искажениям видеоконтентера.

Ключевые слова: цифровой видеосигнал, цифровой водяной знак, фазовое встраивание, защита видеосигналов.

DOI: 10.15372/AUT20220501

Введение. Быстрое развитие сети Интернет и беспроводной связи значительно упрощает доступ к таким мультимедийным продуктам, как изображения, видеофильмы, звуковая информация. Однако такое развитие приводит также к росту рынка незаконного приобретения и распространения продуктов, в том числе и видеофайлов, защищённых авторским правом. В частности, очень распространено пиратство фильмов, что приводит к финансовым потерям компаний, производящих контент. Для защиты авторских прав на видеoinформацию можно использовать стойкие цифровые водяные знаки (ЦВЗ), т. е. встраивать в продукт некоторые дополнительные данные, незаметные для пользователя, но позволяющие идентифицировать законного владельца продукта.

За последние 25 лет исследователями предложено значительное число методов встраивания цифровых водяных знаков для защиты видеопоследовательностей [1–5]. Их принято разделять на несколько групп по используемому при встраивании водяного знака формату представления видеоданных. В основном на практике используются пространственно-временной формат, спектральное представление (дискретное косинусное преобразование, дискретное вейвлет-преобразование и др.), а также трансформанты видеопоследовательностей, формируемые на этапе компрессии (MPEG, H.264, H.265) [3, 6].

Известен достаточно широкий спектр атак на видеосигналы, и качественный стойкий ЦВЗ-алгоритм должен успешно противостоять хотя бы некоторому их подмножеству. Следует подчеркнуть, что требования к алгоритмам встраивания ЦВЗ, касающиеся стойкости к определённым видам атак, как правило, определяются на основе специфики конкретной практической задачи, для решения которой предполагается использовать алгоритм защиты видеоданных. К числу наиболее распространённых атак можно отнести методы

обработки сигналов (защумление, цифровая фильтрация, компрессия с потерями), геометрические атаки, атаки потери временной синхронизации (сдвиг начала видеопоследовательности, изменение битрейта, пропуск части кадров) [5]. Все эти атаки направлены на удаление встроенного ЦВЗ без попытки его оценить. При этом подобные атаки могут происходить как непредумышленно в процессе использования видеопоследовательности, так и являться результатом намеренного воздействия на используемый способ защиты.

Кроме того, известны атаки оценивания ЦВЗ [5, 7], которые основаны на выделении оценки ЦВЗ-сигнала или его артефактов на фоне исходного видеосигнала. Такой подход более эффективен, поскольку учитывает особенности существующей схемы защиты. Кроме удаления ЦВЗ, он может также позволить извлечь закрытую информацию, используемую в ЦВЗ-системе, и даже осуществить подмену встроенного ЦВЗ. К числу подобных методов относятся WER (watermark estimation re-modulation) [8], temporal frame averaging (TFA) [9], watermark only attack (WOA) [10] и др. Многие методы этого класса ориентированы на ЦВЗ-алгоритмы, которые встраивают один и тот же паттерн ЦВЗ в значительное число кадров видеосигнала (делается это, как правило, для повышения стойкости метода или для упрощения адаптации ЦВЗ-алгоритмов, зарекомендовавших себя при защите изображений). Несмотря на очевидную уязвимость подобного подхода, в значительной части актуальных на сегодня алгоритмов это обстоятельство игнорируется, и встраивание ЦВЗ происходит независимо в каждый кадр [2, 11–13]. Помимо рисков безопасности, этот подход ещё и ограничивает потенциальную информационную ёмкость ЦВЗ [9].

Учитывая сложившуюся картину, в данной работе предлагается новый метод встраивания двумерного фазового ЦВЗ в цифровой видеосигнал. Преимуществом метода является распределённый во времени характер ЦВЗ, обеспечивающий его незаметность и повышенную стойкость к различным искажениям видеосигналов, а также атакам потери синхронизации и атакам оценивания ЦВЗ. Суть метода состоит в добавлении к каждому пикселю видеосигнала малозаметной синусоидальной последовательности, развивающейся во времени и имеющей индивидуальную (меняющуюся от пикселя к пикселю) фазу. Двумерное поле этих фаз соответствует изображению встраиваемого ЦВЗ. Из отдельного кадра видеопоследовательности такой ЦВЗ выделить невозможно, однако из любой достаточно продолжительной серии кадров он извлекается с низкой вычислительной сложностью и с высоким качеством.

Описание предлагаемого метода.

Встраивание ЦВЗ. Для краткости изложения далее будем рассматривать одноканальный (чёрно-белый) видеосигнал. Обобщение метода на случай многокомпонентного цветного видеосигнала представляется тривиальным.

Пусть $x_0(m)$ — m -й кадр исходной видеопоследовательности, а $x_0(m, n_1, n_2)$ — значение пикселя с координатами (n_1, n_2) в m -м кадре. Встраивание фазового ЦВЗ состоит в аддитивном добавлении к исходному видеосигналу синусоидальной компоненты, начальная фаза которого определяется изображением ЦВЗ:

$$x(m, n_1, n_2) = x_0(m, n_1, n_2) + w(m, n_1, n_2), \quad (1)$$

$$w(m, n_1, n_2) = A \sin(\theta m + \varphi(n_1, n_2)), \quad (2)$$

где A — амплитуда, θ — опорная частота, $\varphi = \varphi(n_1, n_2)$ — фазовое изображение ЦВЗ.

Извлечение ЦВЗ. Поскольку в формулах каждый пиксель будет рассматриваться индивидуально как функция времени (номера кадра), используем для него упрощённое обозначение $x(m)$. Для извлечения из пикселя встроенной фазовой информации можно применять любой узкополосный (настроенный на частоту θ) цифровой фильтр, например линей-

ную инвариантную к сдвигу систему (ЛИС-систему) [14] с комплекснозначной импульсной характеристикой (ИХ)

$$h(m) = \alpha^m e^{i\theta m} u(m), \quad (3)$$

где α — параметр затухания ИХ ($0 < \alpha < 1$), $u(m)$ — функция единичного скачка.

Данная ЛИС-система преобразует входной вещественный сигнал $x(m)$ в выходной комплекснозначный:

$$y(m) = h(m) * x(m) = y_c(m) + iy_s(m),$$

где $y_c(m)$, $y_s(m)$ — вещественная и мнимая части выходного сигнала соответственно, $*$ — символ линейной свёртки последовательностей.

Разобьём импульсную характеристику (3) на вещественную и мнимую части:

$$h_c(m) = \alpha^m \cos(\theta m) u(m), \quad h_s(m) = \alpha^m \sin(\theta m) u(m).$$

Тогда обработка сигнала будет выполняться путём пары преобразований:

$$y_c(m) = h_c(m) * x(m), \quad y_s(m) = h_s(m) * x(m).$$

Они реализуются с помощью следующих разностных уравнений:

$$y_c(m) = f(m) - \alpha \cos(\theta) f(m-1), \quad (4)$$

$$y_s(m) = \alpha \sin(\theta) f(m-1) \quad (5)$$

с использованием промежуточной последовательности $f(m)$, определяемой по формуле

$$f(m) = 2\alpha \cos(\theta) f(m-1) - \alpha^2 f(m-2) + x(m)$$

для $m \geq 0$. При этом значения $f(-1)$ и $f(-2)$ при расчётах принимаются равными 0.

Вещественную и мнимую компоненты выходного сигнала, полученные по выражениям (4) и (5), можно интерпретировать как оценки синусной и косинусной составляющих колебания с частотой θ и фазой φ , добавленных к сигналу в качестве ЦВЗ:

$$y_c(m) = h_c(m) * x(m) = B \cos(\theta m + \varphi), \quad (6)$$

$$y_s(m) = h_s(m) * x(m) = B \sin(\theta m + \varphi), \quad (7)$$

где B — некоторая амплитуда.

Далее решаем систему уравнений (6), (7) относительно фазовых сигналов:

$$C(k) = B \cos(\varphi) = \cos(\theta m) y_c(m) + \sin(\theta m) y_s(m),$$

$$S(k) = B \sin(\varphi) = \cos(\theta m) y_s(m) - \sin(\theta m) y_c(m).$$

И наконец, выделяем фазу, в которой будет содержаться искомый ЦВЗ:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg(S(m)/C(m)), & C(m) \geq 0, \quad S(m) \geq 0; \\ \arctg(S(m)/C(m)) + \pi, & C(m) < 0; \\ \arctg(S(m)/C(m)) + 2\pi, & C(m)S(m) \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Нормировка фазы извлечённого ЦВЗ. Процесс извлечения ЦВЗ можно осуществлять как из целого видеофильма, так и из его отдельных достаточно продолжительных фрагментов. Момент начала выделения ЦВЗ в общем случае приходится считать случайным. Поэтому фазы, извлечённые из пикселей, будут определены с точностью до циклического сдвига на их периоде 2π . Чтобы обеспечить возможность дальнейшей корректной обработки результатов извлечения ЦВЗ (например, сглаживания последовательности получаемых значений фаз), необходимо устранить проблему их «перескока» через границу периода. Для этого предлагается:

1) задавать рабочий диапазон фаз, вносимых в видеосигнал в соответствии с формулами (1), (2), достаточно узким и полностью лежащим внутри периода:

$$0 < \varphi_{\min} < \varphi < \varphi_{\max} < 2\pi, \quad \varphi_{\max} - \varphi_{\min} \ll 2\pi, \quad (9)$$

где φ_{\min} , φ_{\max} — границы диапазона;

2) при извлечении ЦВЗ корректировать значения фаз, полученных по формуле (8) в каждом кадре видеопоследовательности, циклически сдвигая их так, чтобы вернуть в интервал (9). Для этого следует ориентироваться на положение узкой гистограммы распределения фаз всех пикселей в кадре, рассматриваемой на единичном круге комплексной плоскости.

Следует подчеркнуть, что на практике множество значений пикселей встраиваемого в видеопоследовательности фазового изображения $\varphi(n_1, n_2)$ не должно быть большим. В базовом варианте (который и применялся в экспериментальных исследованиях далее) оно содержит всего два допустимых значения, кодируя таким образом некоторую бинарную матрицу значений ЦВЗ $W(n_1, n_2)$. В этом случае $\varphi_{\min} = \varphi_0$, а $\varphi_{\max} = \varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\varphi$.

Таким образом, для реконструкции встроенного в видеосигнал ЦВЗ недостаточно получить непрерывную оценку фазы по формуле (8), нужно её дополнительно преобразовать в бинарную (в общем случае — дискретную) форму. Для этого после вышеописанного циклического сдвига узкой гистограммы значений $\varphi(n_1, n_2)$ отыскивается точка локального минимума гистограммы между двумя её главными модами φ_T . Тогда искомая двоичная матрица цифрового водяного знака $W(n_1, n_2)$ рассчитывается путём пороговой обработки значений $\varphi(n_1, n_2)$ с порогом φ_T .

Сглаживание последовательности фаз. Вычисленная по формуле (8) фаза синусоиды, встроенной в пиксель, в идеале не зависит от номера кадра m . Однако реальный видеосигнал $x_0(m)$ может претерпевать динамические изменения от кадра к кадру, значительно превышающие амплитуду встроенной синусоиды. Особенно это касается фрагментов, отражающих движение объектов, или моментов монтажных склеек. В такие моменты оценка фазы по формуле (8) характеризуется высокой погрешностью, что приводит, в свою очередь, к ошибкам при оценивании встроенного ЦВЗ. Для снижения влияния этих факторов принято решение использовать для извлечения ЦВЗ значение фазы $\varphi(n_1, n_2)$, полученное путём усреднения по множеству кадров непрерывного видеосигнала. Для этого фаза снова рассматривается как функция m , а усреднение во времени реализуется с помощью простой процедуры экспоненциального сглаживания [15], реализуемой ЛИС-системой первого порядка:

$$\bar{\varphi}(m) = \beta\bar{\varphi}(m-1) + (1-\beta)\varphi(m),$$

где $\bar{\varphi}$ — сглаженное значение фазы пикселя, β — параметр сглаживания ($0 < \beta < 1$).

Видеопоследовательности, использованные в ходе экспериментов

Название видеосигнала	Тип видеосигнала	Основные особенности
RealBarca	Телетрансляция футбольного матча	Длинные сцены, статичные камеры, однородный фон
Road1	Съёмка дорожной камерой	Статичная камера, редкие движущиеся машины
LutGaya	Комедийный фильм	Короткие динамичные сцены; в основном статичная камера
IndianCooking	Кулинарный видеоролик	Крупные планы ингредиентов, частые монтажные склейки
PrimitiveCooking	Документальный фильм	Длинные сцены без монтажа, присутствуют надписи
FootballTactics	Съёмка футбольного матча тактической камерой	Нет монтажа, мало изменяется сцена, но камера перемещается

Экспериментальные исследования метода.

Постановка вычислительных экспериментов. Для подбора параметров метода, проверки его работоспособности и оценки эффективности была проведена серия вычислительных экспериментов. В них использовались фрагменты тестовых видеосигналов, обладающих различными яркостными и динамическими характеристиками. Список использованных видеофайлов и их особенности указаны в таблице. Все они имели глубину цвета 8 бит (256 уровней яркости) в каждом из трёх каналов. Длина фрагментов составляла 3000 кадров (видеопоследовательность длиной 1 мин и 40 с при частоте 30 кадр./с). При встраивании ЦВЗ использовался канал Y видеофайла в цветовом пространстве YUV .

В качестве ЦВЗ применялась модель QR-кода, состоящего из 65×65 квадратных клеток, каждая размером 16×16 пикселей. QR-код такого размера позволяет встраивать до 2960 бит информации (уровень коррекции ошибок L 7 %) [16]. При необходимости для повышения надёжности может быть применён уровень M (15 % корректируемых ошибок, 2320 бит информации). При моделировании в ходе экспериментов клеткам QR-кода назначались случайные равновероятные значения 0 или 1. Эти два значения переносились во встраиваемые синусоиды с фазами $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_1 = \pi/2$.

При извлечении ЦВЗ значения фаз, полученные для выбранного кадра, усреднялись по пикселям каждой клетки, сглаживались во времени, трансформировались обратно в бинарную форму и сравнивались со значениями клеток исходного QR-кода.

В качестве показателя эффективности метода рассматривалась точность извлечения ЦВЗ P , рассчитываемая как доля правильно восстановленных клеток модели QR-кода. Большое число клеток ($65 \times 65 = 4225$) позволяет оценивать эту величину с достаточно высокой точностью — 0,024 %.

Подбор параметров метода. На первом этапе исследований определялись наилучшие значения параметров метода (амплитуда A , опорная частота θ , параметры затухания α и сглаживания β), обеспечивающие высокую точность извлечения ЦВЗ. Для этого проводилась серия экспериментов с поочерёдной фиксацией значений одних параметров и вариацией других на различных видеосигналах. В результате экспериментов был принят следующий набор значений: $\theta \approx 3$, $\alpha \approx 0,999$, $\beta \approx 0,93$. Значение амплитуды A должно выбираться в зависимости от особенностей конкретной видеопоследовательности

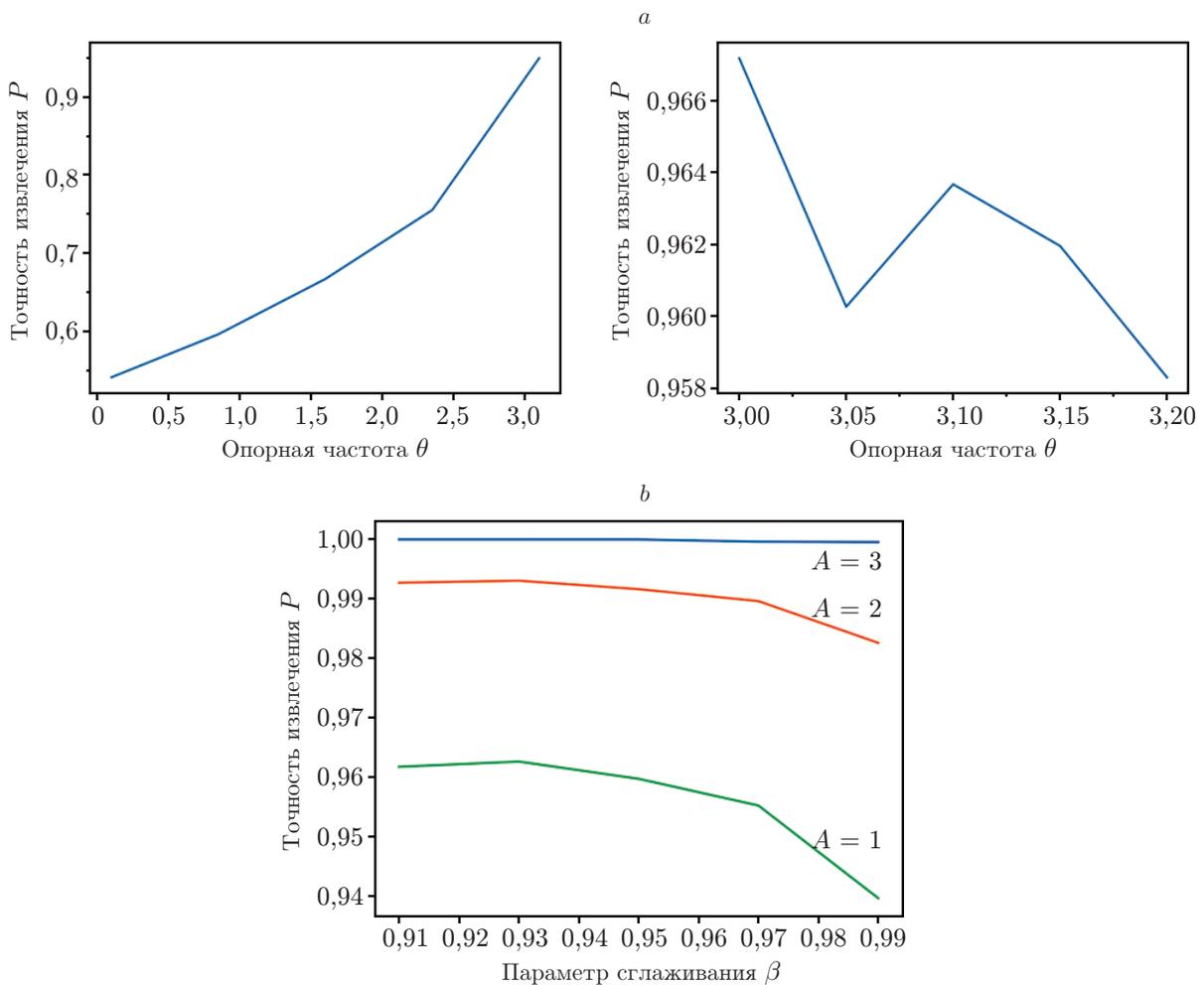


Рис. 1. Подбор параметров метода в рамках экспериментальных исследований: опорная частота θ (a), параметр сглаживания β (видеофайл RealBarca) (b)

исходя из компромисса между точностью извлечения ЦВЗ и качеством результирующего видеосигнала. Эксперименты показали, что при $A = 5$ во всех видеопоследовательностях достигается почти безошибочная точность, поэтому можно определить диапазон предпочтительных значений от 1 до 5. Примеры графиков, отражающих этапы выбора значений θ и β в ходе проведённых экспериментов, показаны на рис. 1.

Проверка работоспособности метода на кратковременных фрагментах видеосигналов. Важной особенностью предложенного в данной работе метода является теоретическая возможность извлечения ЦВЗ из фрагмента исходного видеосигнала. Поэтому в следующей серии экспериментов исследовалось влияние числа используемых кадров видеоданных на достигаемую точность извлечения. Результаты, представленные на рис. 2, позволяют сделать следующие выводы:

1. Приемлемая с точки зрения уровня L коррекции ошибок QR-кода точность 0,93 достигается для всех трёх видеофайлов при амплитудах $A \geq 3$ уже на 600 кадрах (20 с).

2. Для уровня коррекции M может использоваться $A = 2$, в этом случае приемлемая точность достигается за 800 кадров.

3. Нединамичные видеосигналы наиболее удобны для встраивания ЦВЗ: приемлемая точность выше 0,93 может достигаться уже на 200 кадрах даже при $A = 1$.

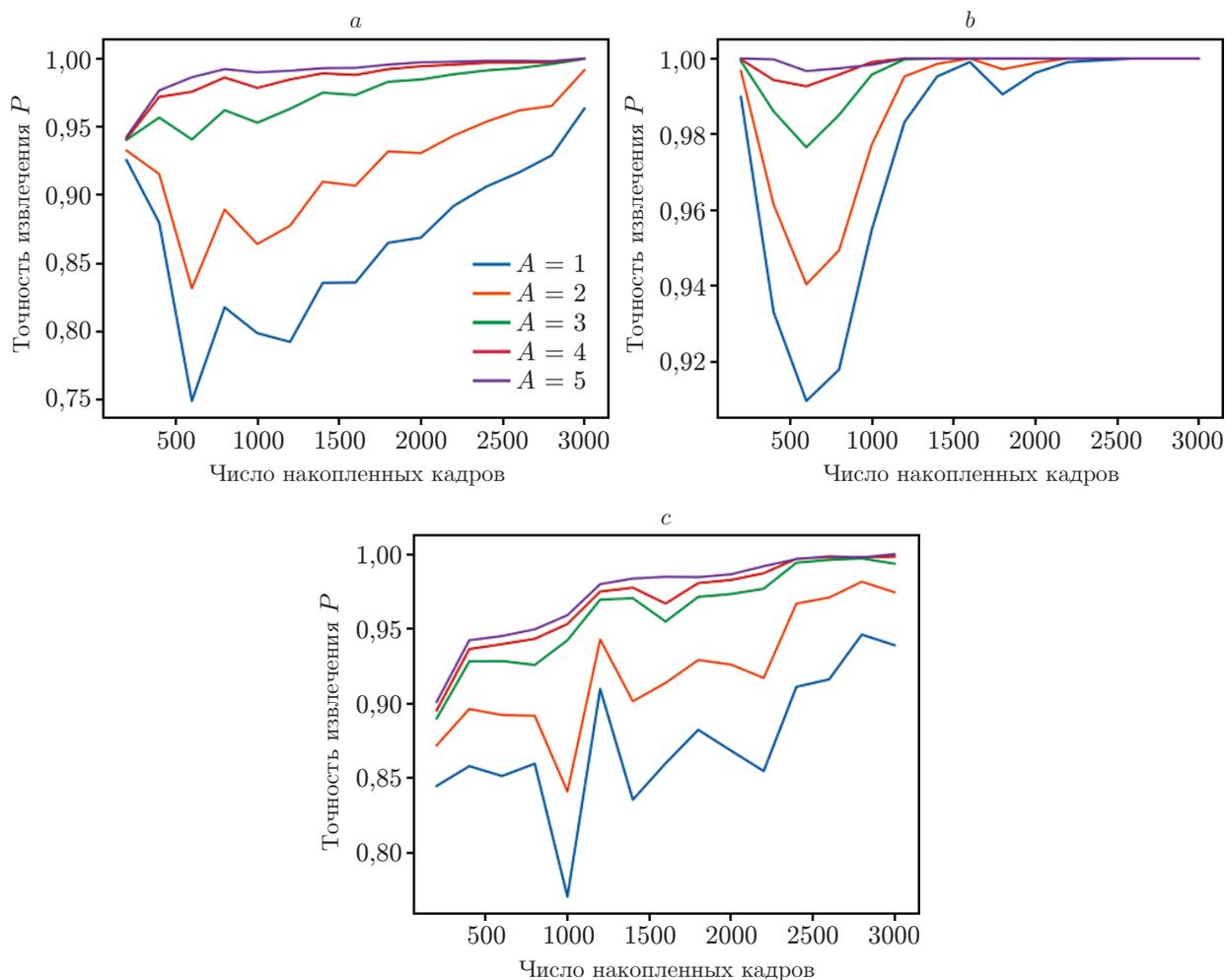


Рис. 2. Графики изменения точности извлечения по мере увеличения числа накопленных видеок кадров: RealBarca (a), Road1 (b), LutGaya (c)

4. На всех графиках заметен эффект локального ухудшения качества извлечения или снижения динамики роста показателя P . Это обусловлено монтажными склейками или существенными внутрикадровыми изменениями. Так, в видеопоследовательности Road1 снижение точности при 600 кадрах обусловлено крупным объектом — проезжающим грузовиком.

Исследование стойкости ЦВЗ при различных атаках. Одним из наиболее полезных на практике свойств ЦВЗ-систем для защиты видеопоследовательностей является возможность извлечения встроенного ЦВЗ в условиях потери временной синхронизации, т. е. потери начала защищённого видеопотока на этапе извлечения. В ряде систем [1, 5] синхронизация видеопотоков является необходимым условием корректного извлечения, что негативным образом отражается на их практической применимости. Разработанная система фазовых ЦВЗ теоретически должна сохранять устойчивость к десинхронизации. Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по извлечению ЦВЗ из различных видеопоследовательностей с запаздыванием на 1–5 секунд. Результаты эксперимента для двух тестовых видеофайлов отражены на рис. 3. Как видно из графиков, атака десинхронизации может как увеличить, так и уменьшить число кадров, достаточное для извлечения ЦВЗ с приемлемой точностью. На это влияет расположение временных

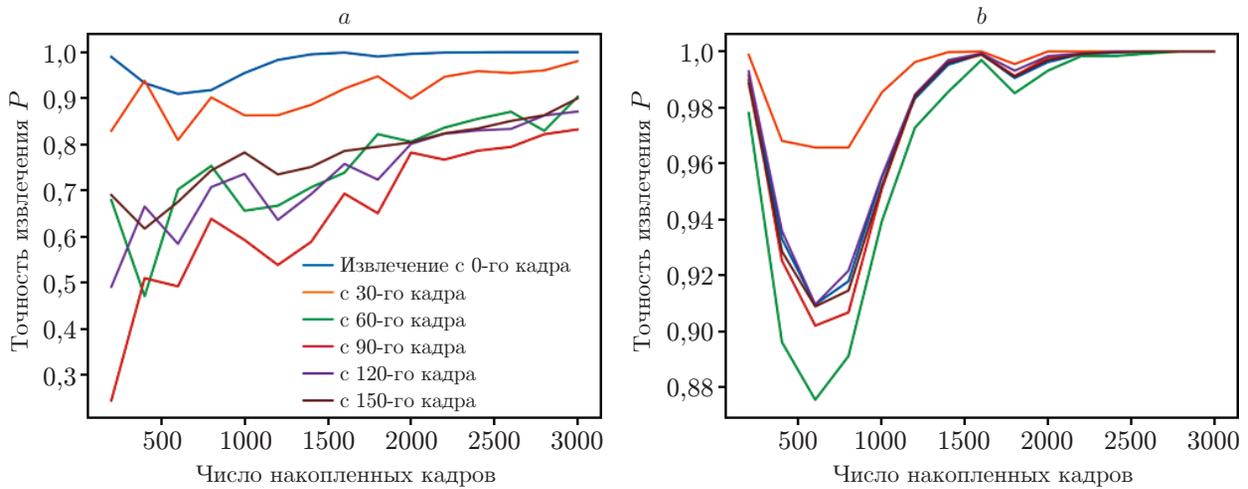


Рис. 3. Графики изменения точности извлечения в зависимости от числа накопленных кадров видеосигнала при различных смещениях относительно его начала: RealBarca (a), Road1 (b)

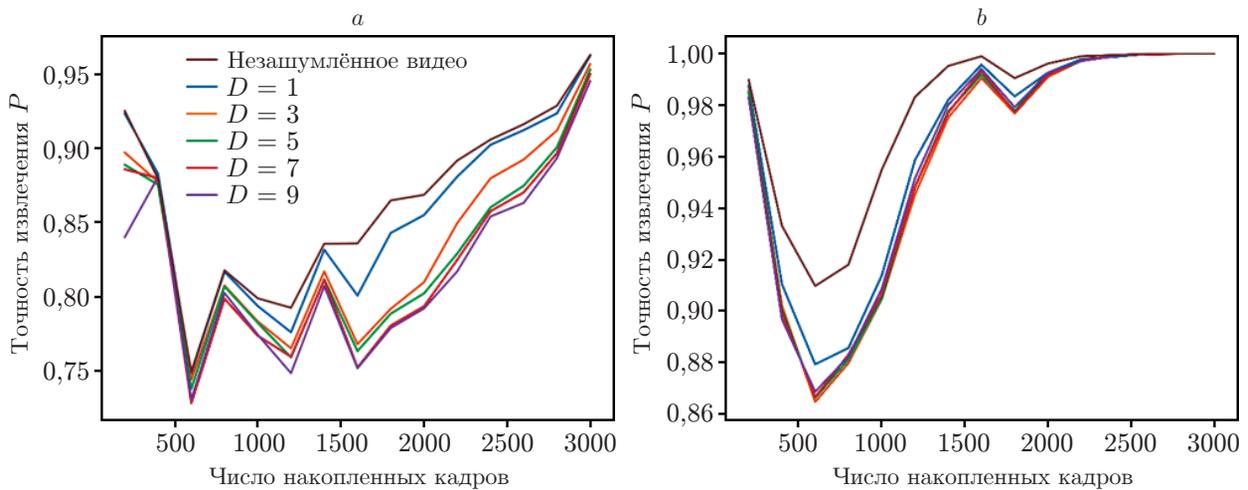


Рис. 4. Графики изменения точности извлечения ЦВЗ из зашумлённых видеосигналов по мере увеличения числа накопленных кадров: RealBarca (a), Road1 (b)

сдвигов и монтажных склеек видеопоследовательности. При этом общая форма графиков и темпы их роста практически не меняются.

Рассмотрим также другой тип атаки на защищённый видеофайл: аддитивное наложение белого гауссовского шума небольшой дисперсии, меняющегося от кадра к кадру, который практически не ухудшает качество видеосигнала, но может помешать корректному извлечению ЦВЗ. Графики на рис. 4 демонстрируют незначительное снижение качества графиков извлечения ЦВЗ при росте дисперсии шума. Однако, как показывают графики, необходимая точность ЦВЗ всё равно достижима, хотя для этого требуется несколько больше накопленных кадров. Таким образом, можно констатировать стойкость предложенного метода к этой атаке.

Оценка искажений, вызванных встраиванием ЦВЗ. Защитный ЦВЗ, встраиваемый в видеопоследовательность, помимо стойкости, должен быть также незаметным для пользователя и не слишком снижать качество видеопоследовательности. Простейшим способом

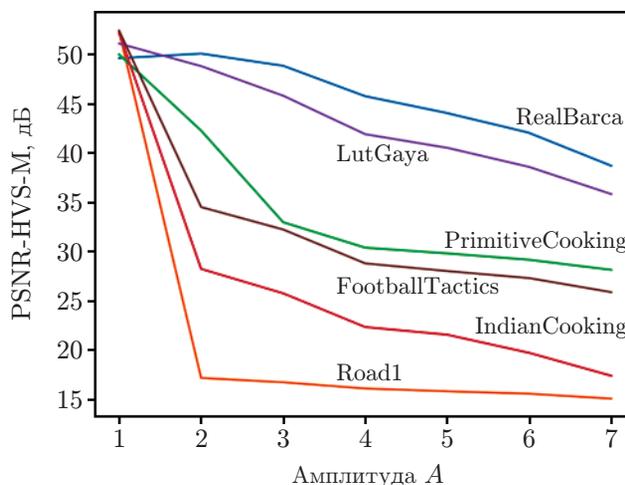


Рис. 5. Влияние амплитуды встраиваемого ЦВЗ на среднее качество кадра по мере PSNR-HVS-M для разных видеопоследовательностей

оценивания искажений, вызванных встраиванием ЦВЗ, является расчёт среднего значения PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) по множеству кадров. Формулы встраивания фазового ЦВЗ (1), (2) позволяют получить приближённую оценку PSNR аналитически. Поскольку среднее значение $\sin^2 x$ на периоде равно $1/2$, то

$$\text{PSNR}_{\text{cp}} \approx 20 \cdot \lg \frac{255\sqrt{2}}{A}, \quad (10)$$

где A — амплитуда встраиваемого ЦВЗ. Согласно этой формуле даже при $A = 5$ данная оценка существенно превышает 30 дБ, а потому можно сделать предположение о высоком качестве защищённого видеосигнала по данному показателю.

Однако следует отметить следующие факторы, способные снизить реальное значение PSNR:

1) поскольку последовательность видеок кадров дискретна, а в исследовании использовалось высокое значение опорной частоты θ , то среднее значение $\sin^2 x$ на практике стремится к 1, что уменьшает оценку PSNR примерно на 3 дБ;

2) помимо процедуры встраивания ЦВЗ (1), (2), влияние на результирующий сигнал оказывают операция приведения данных к 256 градациям яркости, а также компрессия, возникающая при сохранении видеосигналов.

Дополнительно к этому следует отметить, что PSNR, в принципе, не слишком хорошо соотносится с особенностями восприятия человеком визуальной информации. По этой причине в рамках представленных исследований посчитаны эмпирические значения среднего качества кадров защищённых видеосигналов для разных значений амплитуды и для всех выбранных видеофайлов по метрике PSNR-HVS-M (HVS — Human Visual System) [17], основанной на модели зрения человека. Результаты, представленные на рис. 5, показывают, что общий вид графиков в целом согласуется с грубой аналитической оценкой (10) для показателя PSNR: показатель по мере роста амплитуды убывает, но не слишком быстро. Кроме того, графики позволяют сделать вывод о том, что наименее заметен водяной знак на наиболее динамичных видеопоследовательностях LutGaya и RealBarca. В то же время для малодинамичных видеофайлов — Road1 и IndianCooking — нежелательно использование значений амплитуды, превышающих единицу.

Заключение. В данной работе предложен новый метод встраивания фазовых цифровых водяных знаков для защиты видеосигналов. Такие знаки представляют собой двумерное бинарное изображение, в качестве которого для повышения стойкости предпочтительно использовать QR-код. Метод спроектирован таким образом, чтобы исключить возможность извлечения ЦВЗ из отдельно взятого кадра, однако позволяет оценивать ЦВЗ из непрерывного фрагмента видеопоследовательности небольшой длины (до 2 мин), в том числе в условиях потери синхронизации, т. е. пропуска начала видеосигнала. Проведённые экспериментальные исследования определили область допустимых значений параметров метода, позволили оценить эффективность метода в различных условиях для различных по динамике видеопоследовательностей, а также подтвердили устойчивость метода к ряду атак на видеосигнал.

Проведённые исследования также дают почву для дальнейшего анализа, а также модернизации предложенного метода.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-09045).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hartung F., Girod B.** Watermarking of uncompressed and compressed video // *Signal Process.* 1998. **66**, N 3. P. 283–301.
2. **Zheng J., Teng Sh., Li P. et al.** A novel video copyright protection scheme based on blockchain and double watermarking // *Security and Commun. Networks.* 2021. **2021**. P. 1–16.
3. **Yu X., Wang C., Zhou X.** A survey on robust video watermarking algorithms for copyright protection // *Appl. Sci.* 2018. **8**, N 10. P. 1891.
4. **Dutta T., Gupta H. P.** An efficient framework for compressed domain watermarking in P frames of high-efficiency video coding (HEVC) – encoded video // *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.* 2017. **13**, N 1. P. 1–24.
5. **Asikuzzaman Md., Pickering M. R.** An overview of digital video watermarking // *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 2018. **28**, N 9. P. 2131–2153.
6. **Egorova A., Fedoseev V.** QIM-based semi-fragile watermarking for H.264 video authentication // *Proc. of the 8th Int. Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS 2020).* 1–2 Jun., 2020. Online. P. 1–6.
7. **Mitekin V., Fedoseev V. A.** A new method for high-capacity information hiding in video robust against temporal desynchronization // *Proc. of SPIE.* 2015. **9445**. 94451A.
8. **Holliman M. J., Macy W. W., Yeung M. M.** Robust frame-dependent video watermarking // *Proc. of SPIE.* 2000. **3971**. P. 186–197.
9. **Doerr G., Dugelay J.-L.** Security pitfalls of frame-by-frame approaches to video watermarking // *IEEE Trans. Signal Process.* 2004. **52**, N 10. P. 2955–2964.
10. **Cayre F., Fontaine C., Furon T.** Watermarking security: Theory and practice // *IEEE Trans. Signal Process.* 2005. **53**, N 10. P. 3976–3987.
11. **Swaraja K., Kollati M., Kora P.** Robust optimized discrete wavelet transform-singular value decomposition based video watermarking // *Traitement du Signal.* 2019. **36**. P. 565–573.
12. **Meenakshi K., Swaraja K., Kora P.** A robust DCT-SVD based video watermarking using Zigzag Scanning // *Adv. Intell. Syst. and Comput.* 2019. **900**. P. 477–485. DOI: 10.1007/978-981-13-3600-3_45.
13. **Shukla D., Sharma M.** Robust scene-based digital video watermarking scheme using Level-3 DWT: Approach, evaluation, and experimentation // *Radioelectron. Commun. Syst.* 2018. **61**, N 1. P. 1–12.

-
14. **Оппенгейм А. В., Шафер Р. В.** Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. М.: Связь, 1979. 420 с.
 15. **Gardner Jr. E. S.** Exponential smoothing: The state of the art // Journ. Forecasting. 1985. **4**, N 1. P. 1–28.
 16. **ISO/IEC 18004:** ISO Standard on QR Code 2005 Bar Code Symbology Specification.
 17. **Ponomarenko N., Silvestri F., Egiazarian K. et al.** On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions // Proc. of the 3rd Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics (VPQM 2007). Scottsdale, USA, 25–26 Jan., 2007. P. 1–4.

Поступила в редакцию 13.07.2022

После доработки 28.07.2022

Принята к публикации 29.08.2022
