

Белозеров Е.В., к.т.н.

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ В МЕДИА-СИГНАЛЕ ОСОБЫХ ТОЧЕК ПРИСУЩИХ УСТРОЙСТВУ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Национальный авиационный университет

Предложен подход к анализу аутентичности цифрового сигнала, основанный на выделении паттернов устройства формирования медиа-сигнала.

Вступление

Исследование и разработка инструментальных средств для управления мультимедийными данными, аутентификация целостности, как самих данных, так и идентификация устройства формирования медиа-сигнала стали особенно актуальны в связи с использованием их в качестве доказательной базы в судебных инстанциях и т.д. Необходимо отметить, что в настоящее время мультимедийные данные, как доказательства, играют второстепенную роль ввиду отсутствия необходимых средств для анализа их аутентичности, целостности и соответствия устройству формирования сигнала.

Обзор исследований и постановка задачи

Одной из важных и трудноразрешимых задач в аспекте оценки аутентичности медиа-данных является идентификация источника формирования медиа-сигнала. Для решения данной проблемы существует несколько подходов. В работах [1, 2] проблема идентификации источников изучена для группы изображений, полученных с нескольких камер в контролируемых условиях. В работе [3], авторы предложили метод для идентификации отдельных датчиков изображения на основании аддитивного шума (*PRNU*). Ранее *K. Kurosawa* предложил уникальный метод идентификации видеокамеры с помощью дефектных пикселей в *CCD* сенсорах [4]. В работе [5] идентификация источника камеры исследовалась для двух разных камер с использованием дополнительных связей при переходах заряда для *CMOS* сенсоров. Авторы показали, что их метод выявляет камеру-источник с высокой точностью даже для изображений, снятых в широком диапазоне освещения. Известны работы по разделению на классы источников формирования изображений. Однако необходимо отметить, что ни один из описанных методов не

обладает достаточно высокой точностью обнаружения для использования его в качестве доказательной базы.

Таким образом, целью работы является исследование и разработка метода аутентификации устройства формирования медиа-сигнала на основе анализа особенностей аппаратурного шума.

Основная часть

Цифровые данные записи медиа-сигнала представим в виде последовательности отсчетов амплитуды медиа-сигнала, которые являются результатом взаимодействия двух составляющих – записываемой сцены и второй составляющей – аппаратурных помех. Если бы статистические характеристики этих двух составляющих были примерно одинаковы, постановка большинства задач разделения сигнала и помех была бы бессмысленна. Однако, известно, что в большинстве важных случаев, частотные характеристики сигнала и помехи разнесены. Мощность аппаратурных помех локализуется в основном в высокочастотной области по сравнению с сигналом. С точки зрения современных концепций, медиа-сигнал на любом произвольном отрезке представляет собой совокупность различных самоподобных образований, как на уровне исходной сцены, так и на уровне помех. Можно предположить, что самоподобные структуры характеризующие сцену будут изменчивы на протяжении достаточно представительной выборки изображений, полученных с одного устройства формирования медиа-сигнала [7]. В то же время, из физических соображений, очевидно, что образования ответственные за характеристики аппаратуры формирования медиа-сигнала должны обладать более устойчивыми характеристиками на протяжении достаточно большой выборки изображений, полученных с одного устройства формирования медиа-сигнала.

Исследования графических файлов показывают наличие существенного количества высокочастотных битовых структур “специального вида”, количество которых в различных фрагментах одного и того же файла существенно отличается от случайного [8]. При этом наблюдаются устойчивые закономерности в распределении таких структур по одному и тому же медиа-файлу. Этот факт является свидетельством наличия самоподобных мультифрактальных образований в элементах графических файлов. Эти образования возможно соотнести со статистическими характеристиками, которые являются следствием скрытых закономерностей в устройстве формирования медиа-сигнала [7].

Выделение подобных структур является фактически задачей фильтрации сигнала, искаженного аддитивным шумом.

Представим модель сигнала $f(t)$, искаженного аддитивным шумом как

$$X(t) = f(t) + \eta(t) \quad (1)$$

Тогда разложение такого сигнала набором сопряженных зеркальных фильтров по некоторому дискретному ортогональному базису $\{\psi_s\}$ дает:

$$\begin{aligned} W_s X[m] &= \langle X, \psi_s \rangle, \\ W_s f[m] &= \langle f, \psi_s \rangle, \\ W_s \eta[m] &= \langle \eta, \psi_s \rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Скалярное произведение (1) с ψ_s дает

$$W_s X[m] = W_s f[m] + W_s \eta[m] \quad (3)$$

Из (3) следует, что модель шума не зависит от базиса разложения и остается в нем такой же, как в исходном сигнале.

В [9] вводится линейный оператор D , оценивающий $W_s f[m]$ по $W_s X[m]$ при помощи функции $d_m x$. Результирующая оценка есть

$$\tilde{f} = DX = \sum_{m=0}^{n-1} d_m (W_s X[m]) \psi_s \quad (4)$$

В том случае, когда $D_m(x)$ - пороговая функция, риск данной оценки может быть сведен к минимуму.

Оценка жестким порогом T выполняется с помощью:

$$d_m(x) = \rho_\tau(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| > T \\ 0, & \text{если } |x| \leq T \end{cases} \quad (5)$$

Процедура удаляет все коэффициенты, амплитуда которых ниже установленного порогового значения.

Оценка мягким порогом T выполняется с помощью:

$$d_m(x) = \rho_\tau(x) = \begin{cases} x - T, & \text{если } x \geq T \\ x + T, & \text{если } x \leq -T \\ 0, & \text{если } |x| \leq T \end{cases} \quad (6)$$

Она ослабляет на величину порога амплитуды всех коэффициентов шума.

В вейвлет-базисах, коэффициенты большой амплитуды соответствуют разрывам сигнала и его резким изменениям. Это означает, что оценка сохраняет в разложении только нерегулярные компоненты, происходящие от исходного сигнала, без добавления паразитных всплесков, порожденных шумом.

Как было сказано ранее, порог должен выбираться адаптивно и быть по величине несколько больше, чем максимальный уровень шума. То есть значения $|W_s \eta[m]|$ должны быть с большой вероятностью меньше T . Так достигается минимальный уровень риска в пороговой обработке.

Пусть $r_i(X, T)$ риск пороговой оценки, вычисленной с порогом T . Тогда $\tilde{r}_i(X, T)$ - оценка риска $r_i(X, T)$, определяемая по данным X , искаженным шумом. Значение порога T в таком случае оптимизируется минимизацией $\tilde{r}_i(X, T)$.

Чтобы найти значение \tilde{T} , которое минимизирует оценку $\tilde{r}_i(X, T)$, N коэффициентов данных $W_s X[m]$ сортируют по убыванию амплитуды. Тогда ранжированные таким образом коэффициенты вейвлет-разложения образуют упорядоченное множество $\{W_s X^r[k]\}_{k \leq N}$ где любой $W_s X^r[k] = W_s X[m_k]$ соответствующий коэффициент ранга k : $W_s X^r[k] \geq |W_s X^r[k+1]|$.

Пусть l - некоторый индекс, такой что: $|W_s X^r[l]| \leq T < |W_s X^r[l-1]|$.

Тогда:

$$\begin{aligned} \tilde{r}_i(X, T) &= \sum_{k=l}^N |W_s X^r[k]|^2 - \\ &- (N-l)\sigma^2 + l(\sigma^2 + T^2), \end{aligned} \quad (7)$$

где σ^2 – дисперсия шумовой компоненты.

В этом случае, для минимизации $\tilde{r}_i(X, T)$ необходимо выбрать $T = |W_s X^r[l]|$. Для определения дисперсии σ^2 шума $\eta[m]$ по данным (1) необходимо подавить влияние $f[m]$. Когда сигнал кусочно-гладкий, такую грубую оценку можно провести по средним значениям вейвлет-коэффициентов наименьшего масштаба.

Это утверждение обусловлено тем, что на каждом уровне вейвлет-разложения исходного сигнала X длины N , множество коэффициентов $\{(X, \psi_s)\}_{0 \leq m \leq \frac{n}{2}}$ конечно и имеет всего несколько коэффициентов большой амплитуды. Поэтому для большинства участков $\langle X, \psi_s \rangle \approx \langle \eta, \psi_s \rangle$.

Тогда если M_x – медиана множества $\{|\langle X[m], \psi_s \rangle|\}_{0 \leq m \leq \frac{n}{2}}$ грубая оценка дисперсии σ^2 шума η оценивается по M_x , пренебрегая влиянием f [10]:

$$\sigma^2 = \frac{M_x}{0.6745}. \quad (8)$$

Таким образом, синтезируем адаптивную процедуру шумоподавления по коэффициентам вейвлет-разложения [11]:

1. Вычисление оценки $\tilde{\sigma}^2$ дисперсии шума σ^2 по формуле медианы (4) при наименьшем масштабе разложения;

2. Вычисление порога T_j для каждого уровня декомпозиции j минимизацией риска (7);

3. Пороговая обработка коэффициентов разложения полученным порогом каждого уровня масштаба a^j .

Для вышеуказанной процедуры предлагается:

1. Использовать локальную схему пороговой обработки;

2. Контролировать пределы изменения пороговых величин внутри выделенных сегментов при помощи оценки потерь, допущенных на этапе шумоподавления;

3. В целях принятия решения использовать критерий [11], как наиболее соответствующий предлагаемой схеме.

В качестве оценки допущенных потерь предлагается использовать:

1. Нормированные и пиковые среднеквадратичные оценки (MSE) определяющие средний квадрат ошибки двух сигналов

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2, \quad (9)$$

где P_i - значения амплитуд исходного сигнала,

а Q_i – амплитуды сигнала после фильтрации;

2. Корень среднеквадратичной ошибки MSE ($RMSE$) или пиковое отношение сигнала к шуму ($PSNR$), вычисляющееся по формуле:

$$PSNR = 20 \log^* \max_i |P_i| / RMSE. \quad (10)$$

Схожесть между двумя сигналами определяется уменьшением значения $RMSE$ (увеличением $PSNR$);

3. Отношение сигнал/шум (*signal to noise ratio*, SNR), подсчитываемое как

$$SNR = 20 \log \frac{\sqrt{n \sum_{i=1}^n P_i^2}}{RMSE}. \quad (11)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что фильтрация анализируемых сигналов должна проходить по локальной схеме жесткого порогового отсечения с выделением адаптивных порогов, минимизирующих риск (7) и потери качества сигналов по критерию (11). Выделенные таким образом максимумы вейвлет-преобразования локализуют резкие изменения пространственной формы сигнала, а также особенные его точки, что делает возможным их использование в качестве исходных данных на этапе идентификации устройства формирования медиа-сигнала.

В исследовании проводилась экспериментальная оценка и анализ реакции стандартных процедур классификации на особенности представления данных в предложенной процедуре обнаружения, их зависимость от характеристик обрабатываемых сигналов, представленных в виде многомасштабных структур декомпозиции и обработанных средствами вейвлет-анализа [11].

При выполнении исследований проведено выделение аддитивного шума характерного для ряда цифровых фотоаппаратов на основе рассмотренного алгоритма. Результатом выполненного исследования явились характер-

ные графические паттерны и карты особых точек, присущие устройству формирования изображения.

Для вейвлет-обработки данных был выбран порог отсечения коэффициентов детализации, близкий к оптимальному и эффективная глубина декомпозиции равная 4-м.

Проверка алгоритма поиска особых точек в медиа-сигнале присущих устройству его формирования осуществлялась на основе следующих этапов:

1. Получение множества изображений с фотокамеры, формирующих выборку для

построения отпечатка камеры.

2. Этап получения отпечатка камеры на основе множества изображений с идентифицируемой фотокамеры отпечатка фотокамеры. Этап заключается в выделении из отпечатка паттерна камеры при помощи описанного алгоритма фильтрации и её усреднении по всем отпечаткам из выборки, предназначенной для формирования вектора признаков.

3. Этап идентификации изображения по отпечатку камеры (рис. 1).

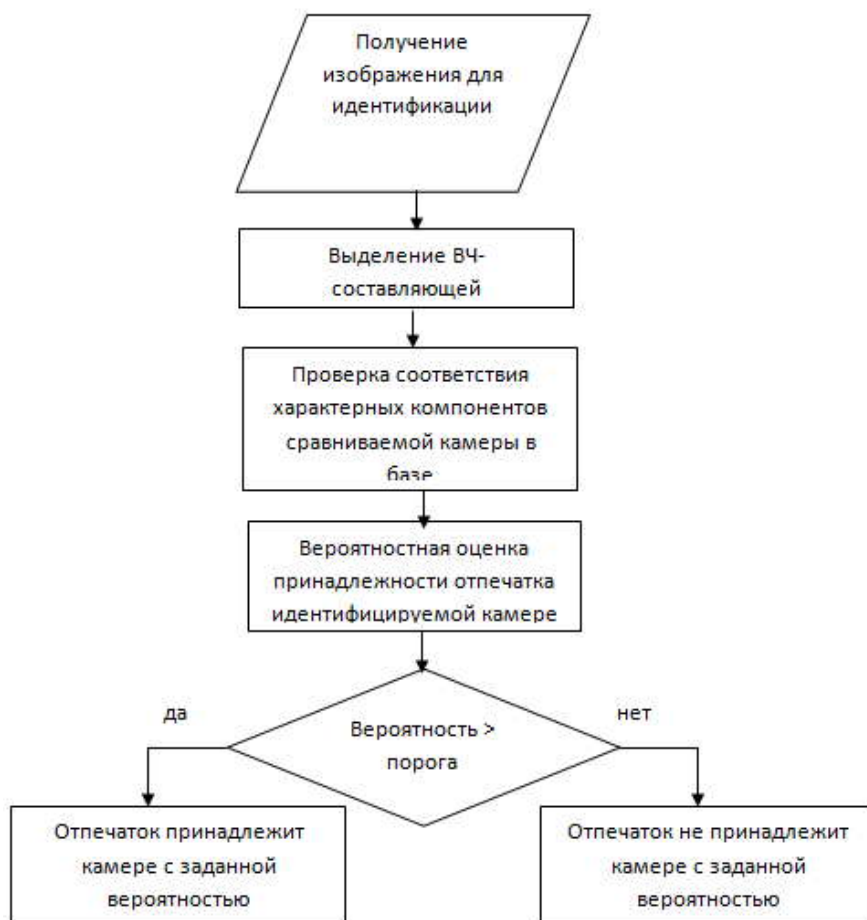


Рис. 1. Алгоритм идентификации камеры по сформированному отпечатку

Для экспериментальной проверки предложенного алгоритма использовались по пять фотоаппаратов серий *Canon 600D* и *Nikon D5100*. Для получения отпечатков камер выполнена съемка 50 фотографий с каждой камеры. После выделения особых точек сравнивалось соотношение количества совпадений этих точек с паттерном, полученным с камеры (рис. 2, рис. 3).

Как было установлено, при проведении экспериментальных исследований подобные закономерности распределения совпадающих точек в паттерне камеры сохраняются для всех исследованных камер. Таким образом, на основании соотношения совпадений может быть сделано вероятностное заключение о принадлежности исследуемой фотографии конкретному устройству формирования изображения.

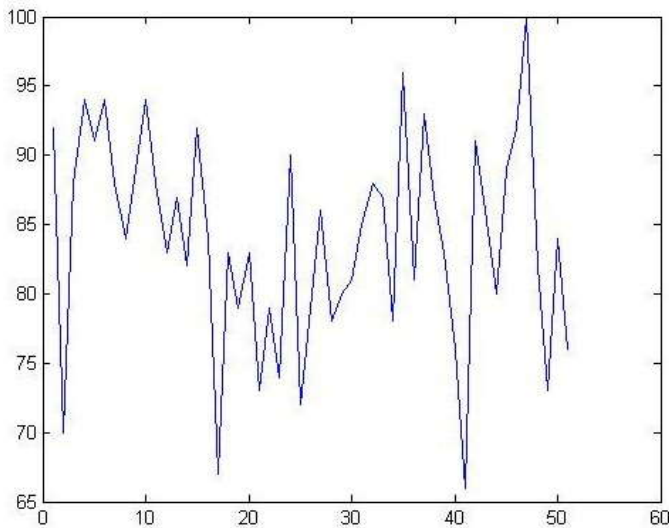


Рис. 2. Количество совпадающих контрольных точек в паттерне камеры D5100/1 и сравниваемых фотографий этой же камеры

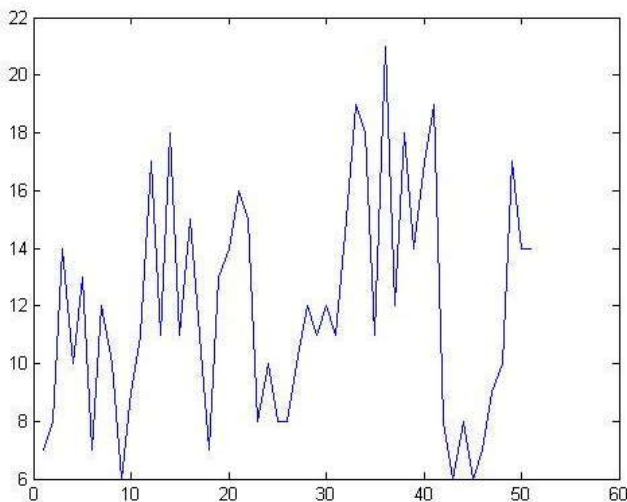


Рис. 3. Количество совпадающих контрольных точек в паттерне камеры D5100/1 и сравниваемого набора фотографий других камер

Выводы

Выполненное исследование позволило осуществить выделение и идентификацию образований в графическом медиа-сигнале, присутствующих устройству формирования сигнала. Оценка достоверности идентификации устройства на основе предлагаемого алгоритма является удовлетворительной, но не достаточной для использования данного алгоритма в качестве части доказательной базы. В связи с этим в качестве дальнейших исследований необходимо рассмотреть пути совершенствования предложенного алгоритма.

Список литературы

1. M. Kharrazi Blind source camera identification / M. Kharrazi, H. Sencar, N. Memon // Proc. ICIP, International Conference on Image Processing, – 2004. – Vol. 1. – P. 709-712.
2. S. Bayram Source camera identification based on cfa interpolation / S. Bayram, H.T. Sencar, N. Memon, I. Avcibas // Proc. ICIP, International Conference on Image Processing, – 2005. – Vol. 3. – P. 69-72.
3. M. Chen Source digital camcorder identification using sensor photo response non-uniformity / M. Chen, J. Fridrich, M. Goljan, J. Lukac // Proc. of SPIE Electronic Imaging, – 2007. – Vol. 6505. – P. 1G-1H.
4. K. Kurosawa Ccd fingerprint method – identification of a video camera from videotaped images / K. Kurosawa, K. Duroki, N. Saitoh // Proc. of ICIP, International Conference on Image Processing, – 1999. – Vol. 1. – P. 537-540.
5. X. Xue An image identification system of seal with fingerprint based on cmos image sensor / X. Xue, S. Zhang, Y. Guo // Proc. of SPIE, – 2006. – Vol. 6027 (3) A. – P. 1-8.
6. Harten A. Discrete multi-resolution analysis and generalized wavelets / A. Harten // J. App. Num. Math, – 1993. – Vol. 12. – P. 153-193.
7. Белозеров Е.В., Рибальский О.В., Соловьев В.И., Брюханова Я.А. Методология проверки подлинности сигналограмм выделением самоподобных структур // Інформаційна безпека. – 2010. – № 2. – С. 35-49.
8. Белозеров Е.В., Соловьев В.И., Брюханова Я.А. Метод оценки аутентичности изображений на основе анализа их спектральных характеристик // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2010. – № 4 (146). – ч. 1. – С. 179-184.
9. Беспалов Д.А. Естественный параллелизм быстрых алгоритмов вейвлет-преобразования // Известия ТРТУ. – 2006. – 200 с.
10. Starck, Jean-Luc, Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform // IEEE Trans. Image Process. – 2003. – Vol. 6 – P. 706-717.
11. Белозьоров Є.В. Метод виявлення модифікацій цифрових медіа-даних на основі використання адаптивної вейвлет-фільтрації // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2011. – № 7 (161). – ч. 1. – С. 15-21.