

УДК 004.056.5

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ СТЕГАНОАНАЛИЗА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

А.В. Сивачев<sup>а</sup>, Н.Н. Прохожев<sup>а</sup>, О.В. Михайличенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: 19791109@list.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 28.08.17, принята к печати 30.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-113-121

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Сивачев А.В., Прохожев Н.Н., Михайличенко О.В. Повышение точности методов стеганоанализа путем оптимизации параметров вейвлет-преобразования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 113–121. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-113-121

### Аннотация

**Предмет исследования.** Проведено исследование в области повышения точности методов стеганоанализа, используемых при обнаружении встраивания в область дискретного вейвлет-преобразования. **Методы.** В работе рассмотрены причины недостаточной точности методов обнаружения факта встраивания в область дискретного вейвлет-преобразования, предложенных Gireesh Kumar, Hany Farid, Changxin Liu, Yun Q. Shi. В основу этих методов стеганоанализа положено использование статистических моментов, полученных для областей LL, HL, LH и HH при дискретном вейвлет-преобразовании, и дополнительных параметров изображения, составляющих опорный вектор. **Основные результаты.** Проанализированы причины неэффективности современных методов стеганоанализа при обнаружении факта встраивания в области LH и HL – примерно 65% и 70% верно классифицированных изображений соответственно. Рассматриваемые методы стеганоанализа используют такие параметры, как статистические моменты, которые обладают большой степенью разброса значений, что затрудняет однозначную классификацию изображений. Предложена методика повышения точности стеганоанализа за счет проведения оценки и учета погрешности параметров, используемых методами стеганоанализа, с помощью специализированного вейвлета. С использованием предложенной методики повышения точности стеганоанализа разработан метод, позволяющий добиться повышения точности классификации оригинальных изображений на 2,5–7,0%. **Практическая значимость.** Результаты работы полезны специалистам в области защиты информации в задачах обнаружения и противодействия скрытым каналам передачи данных. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем стеганоанализа.

### Ключевые слова

стеганография, стеганоизображение, пассивное противодействие, скрытый канал передачи, система и методы стеганоанализа, бинарная классификация, дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), двумерное вейвлет-преобразование, вейвлет Хаара

## ACCURACY INCREASE FOR STEGANALYSIS METHODS BY OPTIMIZATION OF WAVELET TRANSFORM PARAMETERS

A.V. Sivachev<sup>a</sup>, N.N. Prokhozhev<sup>a</sup>, O.V. Mikhailichenko<sup>a</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: 19791109@list.ru

### Article info

Received 28.08.17, accepted 30.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-113-121

Article in Russian

**For citation:** Sivachev A.V., Prokhozhev N.N., Mikhailichenko O.V. Accuracy increase for steganalysis methods by optimization of wavelet transform parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 113–121 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-113-121

### Abstract

**Subject of Research.** We have performed the study for accuracy increase of steganalysis methods used for detection of information hidden in wavelet domain. **Methods.** The methods proposed by Gireesh Kumar, Hany Farid, Changxin Liu, Yun Q. Shi demonstrate low efficiency when detecting the fact of embedding into the discrete wavelet transform domain. The paper considers the reasons for this fact. The basis of these methods is application of statistical moments for LL, HL, LH, HH domains obtained by wavelet transformation and additional image parameters making up a support vector. **Main Results.** We

have analyzed the reasons for low efficiency of modern steganalysis methods in tasks of embedding fact detection in LH and HL domains that represents about 65% and 70% of correctly qualified images, respectively. The analyzed methods of steganalysis use such parameters as statistical moments, which have a high degree of variability that makes it difficult to classify images uniquely. We propose the technique for steganalysis accuracy increase by evaluation and taking account of the parameters' error used by steganalysis methods by means of the specialized wavelet. The proposed technique gives the possibility to increase classification accuracy of images by 2.5–7.0 %. **Practical Relevance.** The results of work are useful for specialists in the field of information security in tasks of detection and countermeasures for the hidden transmission channels. The obtained results can be useful for development of steganalysis systems.

#### Keywords

steganography, stego image, passive resistance, hidden transmission channel, steganalysis system and methods, binary classification, discrete wavelet transform, two-dimensional wavelet transform, Haar wavelet

### Введение

Использование стеганографических методов защиты информации позволяет скрытно хранить и (или) передавать конфиденциальную информацию. В то же время есть проблема утечки конфиденциальной информации по скрытым каналам связи, а также и выявления скрытого канала передачи противоправной информации. На сегодняшний день активно используются стеганографические методы скрытия информации в цифровых изображениях [1]. Различными авторами предложено множество методов, позволяющих встроить информацию в цифровое изображение [2]. Значительный прогресс наблюдается в области разработки стеганографических методов, использующих дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Увеличение интереса к встраиванию информации в область ДВП изображения связано с распространением формата сжатия изображений JPEG 2000, который основан на использовании ДВП. Для противодействия противоправному использованию стеганографии [3] к настоящему времени разработаны методы стеганоанализа [4], направленные на выявление факта стеганографического воздействия на область ДВП цифровых изображений. Большинство современных методов стеганоанализа, например, [5–8], основаны на методах машинного обучения [9]. Универсальных методов стеганоанализа не существует, и, несмотря на высокую точность методов стеганоанализа [10, 11], точность обнаружения встраивания в область ДВП не позволяет гарантировать абсолютную успешность пассивного противодействия [12]. Например, согласно данным, приведенным авторами [5], точность метода стеганоанализа составляет 80% корректно классифицированных изображений при 20%-м объеме встраивания от максимальной пропускной способности контейнера. Другими словами, около 20% изображений классифицируются неверно, а если снизить объем встраиваемой информации, то процент неверно классифицированных изображений неизбежно возрастет. Таким образом, исследования, направленные на повышение точности обнаружения факта встраивания в область ДВП изображения, являются актуальными.

В данной работе приводится описание разработанного метода стеганоанализа, использующего специализированный вейвлет и позволяющего добиться повышения точности обнаружения факта встраивания в область ДВП-изображения.

### Исследования предметной области

Существующие методы стеганоанализа [5–8], используемые для обнаружения факта встраивания в область ДВП-изображения, основываются на машине опорных векторов. Машина опорных векторов использует:

- статистические моменты областей коэффициентов (LL, LH, HL, HH), получаемые в результате применения двумерного ДВП-изображения, на значения которых оказывает влияние стеганографическое встраивание в область ДВП;
- параметры изображения, например, такие как градиентная энергия, энтропия и другие.

Значения статистических моментов имеют значительный разброс, что не всегда дает возможность однозначно классифицировать предъявляемое изображение.

Экспериментальным путем обнаружено, что влияние, которое оказывает стеганографическое воздействие на значения статистических моментов, получаемых при ДВП, зависит от используемых низко- и высокочастотных коэффициентов конкретного вейвлета. На рис. 1 и 2 приведены гистограммы значений первого статистического момента HL области при использовании вейвлета Хаара и вейвлета со случайно выбранными коэффициентами. При использовании вейвлета Хаара (рис. 1, а) заметна значительная разница между гистограммами для оригинальных и стеганоизображений, в то время как при использовании вейвлета с произвольно выбранными коэффициентами (рис. 1, б) гистограммы имеют заметно большую область пересечения. Таким образом, есть вейвлеты, при использовании которых стеганографическое воздействие влияет на значения статистических моментов, а есть вейвлеты, для которых значения статистических моментов нечувствительны к этому воздействию. При этом значения статистических моментов, получаемые при использовании двух разных вейвлетов, имеют зависимость между собой.

Суть предлагаемого метода повышения точности стеганоанализа состоит в том, чтобы дополнить опорный вектор значениями статистических моментов, получаемых при ДВП с использованием «нечув-

ствительного» вейвлета. Для этой цели необходимо определить специализированный вейвлет (набор низко- и высокочастотных коэффициентов), удовлетворяющий следующим критериям.

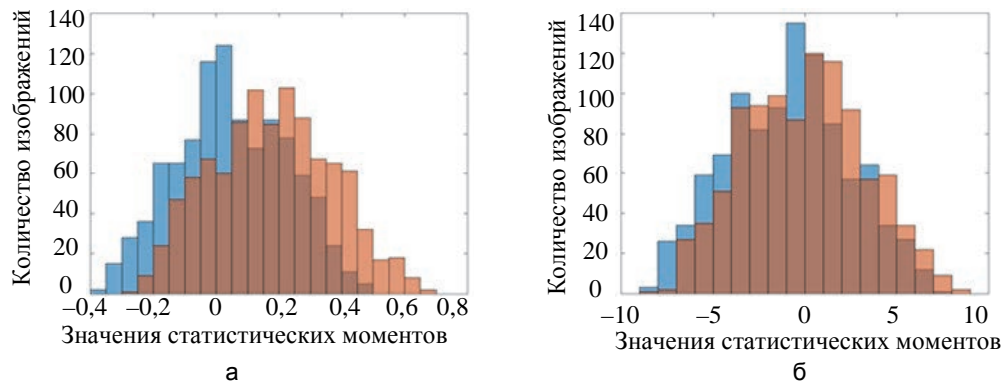


Рис. 1. Гистограмма значений первого статистического момента для LH области оригинальных (синий) и стегано- (оранжевый) изображений с использованием: вейвлета Хаара (а); вейвлета с произвольно выбранными низко- и высокочастотными коэффициентами (б) (коричневый – область пересечения гистограмм)

Критерий 1 – значения статистических моментов, получаемых при использовании специализированного вейвлета, не подвержены существенному влиянию (т.е. погрешность значения статистического момента вследствие стеганографического встраивания крайне мала, и ею можно пренебречь в рамках задачи стеганоанализа) со стороны стеганографического воздействия на область ДВП.

Критерий 2 – при использовании специализированного вейвлета значения статистических моментов связаны со значениями, получаемыми при использовании вейвлета Хаара.

Критерий 3 – значения статистических моментов, получаемые с использованием специализированного вейвлета, имеют значительный разброс для уменьшения влияния случайных факторов на значения статистических моментов. Под «значительным разбросом» понимается разброс больше, чем при использовании вейвлета Хаара.

Далее под специализированным вейвлетом будет иметься в виду вейвлет, который максимально удовлетворяет вышеперечисленным трем критериям.

Для нахождения специализированного вейвлета, удовлетворяющего вышеперечисленным критериям, необходимо численно оценить степень его соответствия каждому из критериев.

1. Оценка «чувствительности» вейвлета (чувствительности статистических моментов областей LL, HL, LH, NH) к факту встраивания в область ДВП-изображения.

Зависимость значений статистических моментов, получаемых при использовании вейвлета, от факта стеганографического воздействия должна характеризовать степень отличия стеганоизображений от оригинальных изображений. Также необходимо учитывать величину разброса значений статистических моментов, так как разброс значений статистического момента влияет на значимость (вес) разницы между оригинальными и стеганоизображениями. Таким образом, для получения численной оценки «чувствительности» конкретного вейвлета предлагается следующая формула:

$$G_1 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - M'_i|}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}}$$

где  $M_i$  – значение статистического момента для области ДВП  $i$ -го оригинального изображения ( $M'_i$  – стеганоизображение) из коллекции изображений;  $\bar{M}$  – среднее значение статистического момента для массива изображений;  $N$  – общее количество изображений. Для абсолютно «нечувствительного» вейвлета значения  $M_i$  и  $M'_i$  будут равны – и, соответственно, значение  $G_1$  будет равно 0. Чем больше значение  $G_1$ , тем более «чувствителен» вейвлет к факту встраивания.

2. Оценка взаимосвязи между значениями статистических моментов, получаемых посредством вейвлета Хаара и специализированного вейвлета.

Взаимосвязь между значениями статистических моментов, полученных с помощью вейвлета Хаара ( $M^{haar}$ ) и специализированного вейвлета ( $M^{special}$ ), можно представить в виде функции, которая представляет собой типичное уравнение кривой [13]:

$$M^{haar'} = f(M^{special}), \tag{1}$$

где  $M^{haar'}$  – значение  $M^{haar}$ , предсказанное на основе  $M^{special}$ . Коэффициенты взаимосвязи между значениями статистических моментов функции (1) могут быть определены посредством метода наименьших квадратов. Оценить взаимосвязь между значениями  $M^{haar}$  и  $M^{special}$  можно как среднеарифметическую разницу между значениями  $M^{haar'}$  и  $M^{haar}$  по следующей формуле:

$$G_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i^{haar} - M_i^{haar'}|,$$

где  $M_i^{haar}$  – значение статистического момента области ДВП (LL, HL, LH, HH), полученного с использованием вейвлета Хаара ( $M_i^{special}$  – с использованием специализированного вейвлета) для  $i$ -го оригинального изображения.

Для идеально взаимосвязанных значений значения  $M^{haar}$  и  $M^{special}$  и значения  $M^{haar}$  и  $M^{haar'}$  будут равны, а оценка взаимосвязи  $G_2$ , будет равна 0. Чем больше значение  $G_2$ , тем меньше взаимосвязь между статистическими моментами.

3. Оценка разброса значений статистических моментов для областей LL, HL, LH, HH.

Для оценки разброса значений статистических моментов использовалось значение среднеквадратичного отклонения, позволяющее оценить степень разброса случайного значения:

$$G_3 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2},$$

где  $M_i$  – значение статистического момента для области ДВП  $i$ -го оригинального изображения;  $\bar{M}$  – среднее значение статистического момента для массива изображений. Чем больше разброс значений статистического момента, тем больше будет значение  $G_3$ .

Из пространства поиска коэффициентов ДВП, при помощи генетического алгоритма, который использовал в качестве генома вейвлет-коэффициенты, а в качестве функции приспособленности – значения трех вышеописанных критериев, был определен оптимум, удовлетворяющий критериям 1–3. Низко- и высокочастотные коэффициенты, описывающие специализированный вейвлет, представлены в таблице.

Низкочастотные коэффициенты	Высокочастотные коэффициенты
0,417; 0,916; 0,011; 0,389; 0,579; 0,527; 1,007	0,417; 0,916; 0,011; -0,389; 0,579; -0,527; -1,007

Таблица. Низко- и высокочастотные коэффициенты, описывающие специализированный вейвлет

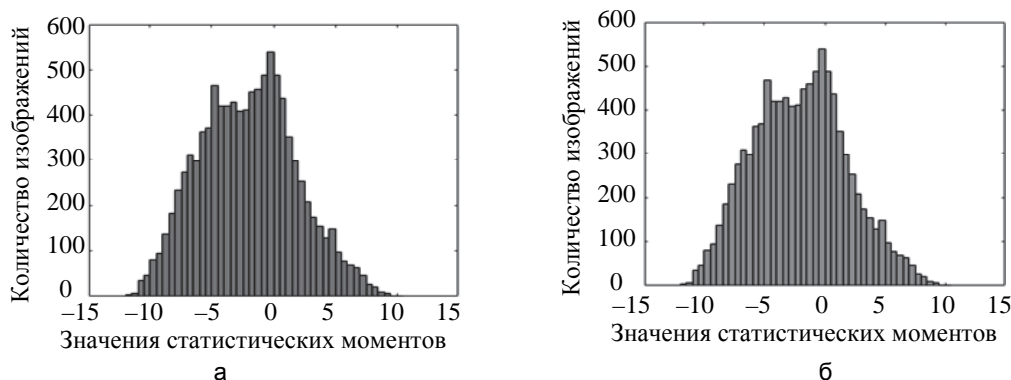


Рис. 2. Гистограмма значений первого статистического момента для LH области оригинальных (а) и стеганоизображений (б) (встраивание в LH область с 20% полезной нагрузкой) с использованием специализированного вейвлета

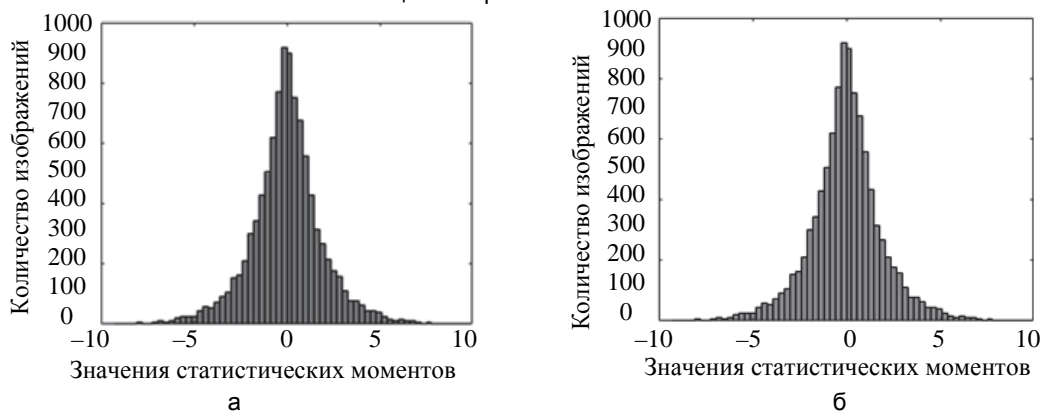


Рис. 3. Гистограмма значений первого статистического момента для HL области оригинальных (а) и стеганоизображений (б) (встраивание в HL область с 20%-й полезной нагрузкой) с использованием специализированного вейвлета

На рис. 2–4 приведены гистограммы, иллюстрирующие выполнение критерия 1 для специализированного вейвлета. Значения статистических моментов для оригинальных и стеганоизображений практи-

чески полностью совпадают. Для построения гистограмм использована коллекция изображений BOWS2 [14], на основе которой получены массивы – оригинальные и стеганоизображения с 20%-й полезной нагрузкой в соответствующей области.

Взаимосвязь значений статистических моментов (критерий 2), получаемых посредством вейвлета Хаара и специализированного вейвлета, приведена на рис. 5–7. Выполнение критерия 3 хорошо видно, если сравнить область разброса значений статистических моментов на рис. 1 (вейвлет Хаара) и рис. 2 (специализированный вейвлет).

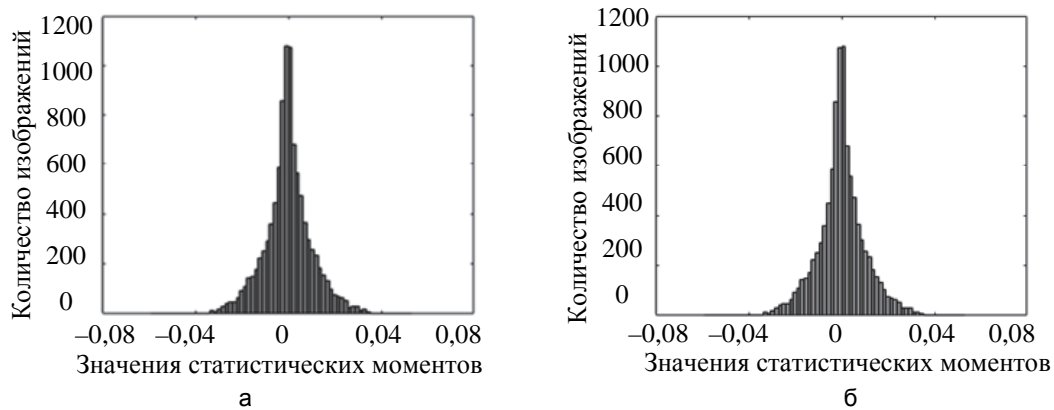


Рис. 4. Гистограмма значений первого статистического момента для НН области оригинальных (а) и стеганоизображений (б) (встраивание в НН область с 20%-й полезной нагрузкой) с использованием специализированного вейвлета

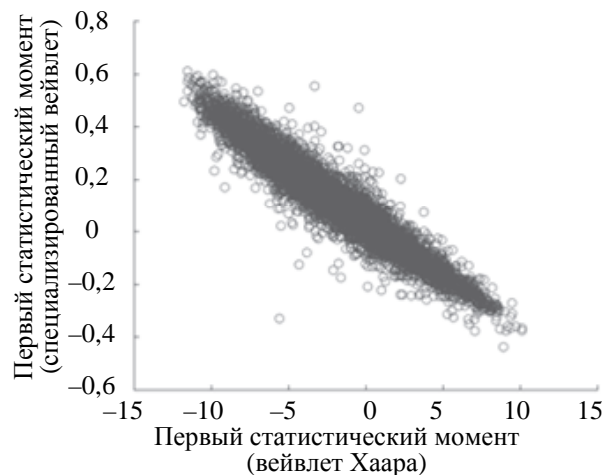


Рис. 5. График зависимости первого статистического момента для LH области для вейвлета Хаара и специализированного вейвлета



Рис. 6. График зависимости первого статистического момента для HL области вейвлета Хаара и специализированного вейвлета



Рис. 7. График зависимости первого статистического момента для НН области для вейвлета Хаара от третьего статистического момента для специализированного вейвлета

### Описание предлагаемого метода

Предлагаемый в настоящей работе метод стеганоанализа, позволяющий добиться повышения точности стеганоанализа для областей LH и HL, основывается на использовании статистических моментов областей LL, HL, LH, HH, полученных с помощью вейвлета Хаара, которые используются в методах [5–8]. Значения статистических моментов областей LL, HL, LH и HH обладают чувствительностью к факту встраивания и имеют достаточно большую погрешность. В дополнение к этим значениям предлагается использовать значения статистических моментов областей LL, HL, LH, HH, полученных в результате ДВП-изображения с использованием набора коэффициентов специализированного вейвлета (см. таблицу), для оценки и учета погрешности статистических моментов, полученных с помощью вейвлета Хаара. Для анализа изображения на наличие встроенной информации используются (1–4)-й статистические моменты ( $M_1, M_2, M_3, M_4$ ) LL, HL, LH, HH областей. Значения  $M_1, M_2, M_3, M_4$  рассчитываются по следующим формулам, которые используются также в других методах стеганоанализа (в том числе и в [4–7]):

$$M_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad M_2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |x_i - M_1|^2; \quad M_3 = \frac{E(x-M_1)^3}{\sqrt{M_2}^3}; \quad M_4 = \frac{E(x-M_1)^4}{\sqrt{M_2}^4};$$

где  $x_i$  – значение вейвлет-коэффициента из соответствующей области (LL, HL, LH, HH);  $E(x - M_1)$  – математическое ожидание величины  $(x - M_1)$ .

В итоге набор параметров, который предлагается подавать на вход машине опорных векторов, состоит из:

- (1–4)-го статистических моментов для областей LL, HL, LH, HH, используемых в методах [4–7] – всего 16 параметров;
- (1–4)-го статистических моментов для областей LL, HL, LH, HH, полученных с помощью описанного в работе специализированного вейвлета (см. таблицу) – всего 16 параметров. Использование статистических моментов позволяет оценить разброс значений статистических моментов, полученных посредством вейвлета Хаара.

### Сравнительная оценка точности предлагаемого метода стеганоанализа

**Условия проведения экспериментов.** Оценка эффективности методов проводилась на тестовой коллекции изображений BOWS2 (10000 изображений, разрешение 512×512) [14]. Коллекция находится в открытом доступе и часто используется разными авторами [15, 16]. Для сравнения эффективности предлагаемого метода с другими были выбраны следующие наиболее известные и часто цитируемые методы, предложенные Gireesh Kumar и др. [5], Nany Farid [6], Changxin Liu и др. [7], Yun Q. Shi и др. [8].

Для моделирования стеганографического воздействия производилась модификация значений младших бит коэффициентов одной из соответствующих областей (HL, LH, HH), полученных с использованием одноуровневого ДВП на основе вейвлета Хаара. Встраивание в LL область не производилось, так как встраивание в нее оказывает наибольшее влияние на исходное изображение и может привести к визуализации артефактов встраивания.

**Методика проведения экспериментов.** На основе имеющейся тестовой коллекции изображений BOWS2 [14] были созданы коллекции стеганоизображений с объемом встраивания 15% от полной пропускной способности одной из областей ДВП-изображения: HL, LH, HH. В итоге было получено 3 коллекции стеганоизображений, каждая из которых содержала встраивание в соответствующую область ДВП-изображения.



Для обучения машины опорных векторов использовалась обучающая выборка, состоящая из 20% оригинальных изображений коллекции и 20% стеганоизображений со встраиванием в соответствующую область (HL, LH, HH). Оставшиеся 80% каждой коллекции использовались в качестве тестовой выборки. Полученные результаты классификации использовались для оценки точности метода стеганоанализа.

**Способ оценки точности методов стеганоанализа.** Результатом работы машины опорных векторов для предлагаемого метода стеганоанализа и методов [5–8] является бинарная классификация изображения: изображение содержит встроенную информацию или нет. Идеальный метод стеганоанализа позволяет безошибочно обнаруживать факт встраивания информации в изображение, т.е. такой метод должен классифицировать 100% оригинальных изображений как не содержащие встроенную информацию, а 100% стеганоизображений как изображения, содержащие встроенную информацию. При этом проценты ложноположительных и ложноотрицательных классификаций должны равняться нулю. Таким образом, метод стеганоанализа тем точнее, чем ближе он к результатам работы идеального метода.

**Результаты эксперимента.** Результаты сравнения точности предлагаемого метода стеганоанализа и методов [4–7], представлены на рис. 8–10. Используются следующие обозначения количества классифицированных изображений: TN – истинно отрицательные, TP – истинно положительные, FP – ложноположительные, FN – ложноотрицательные;  $T = (TN+TP)/2$  – среднее количество корректно классифицированных изображений,  $F = (FN+FP)/2$  – среднее количество некорректно классифицированных изображений для каждой из возможных областей встраивания (LH, HL, HH).

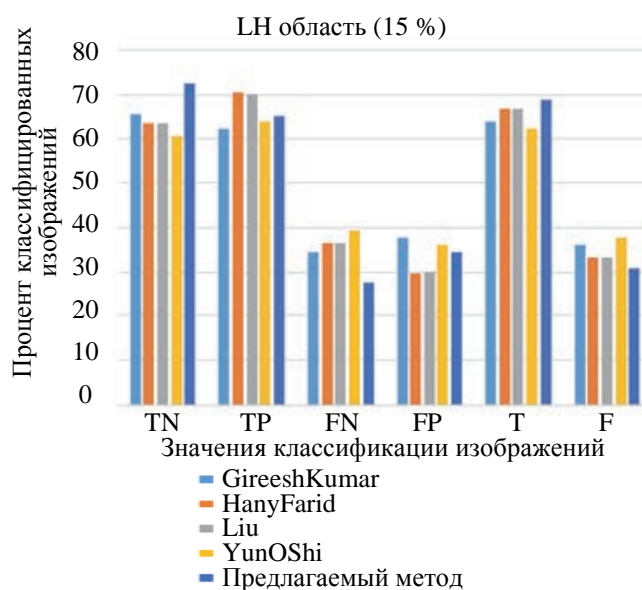


Рис. 8. График соотношения TN, TP, FP, FN при встраивании в LH область (полезная нагрузка 15%)

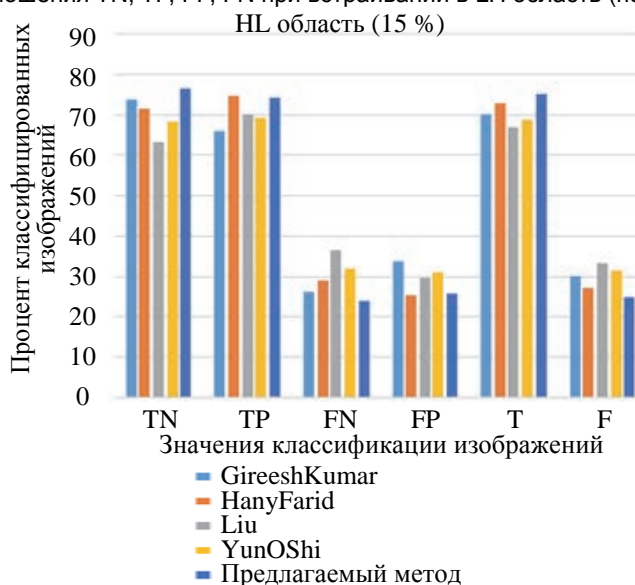


Рис. 9. График соотношения TN, TP, FP, FN при встраивании в HL область (полезная нагрузка 15%)

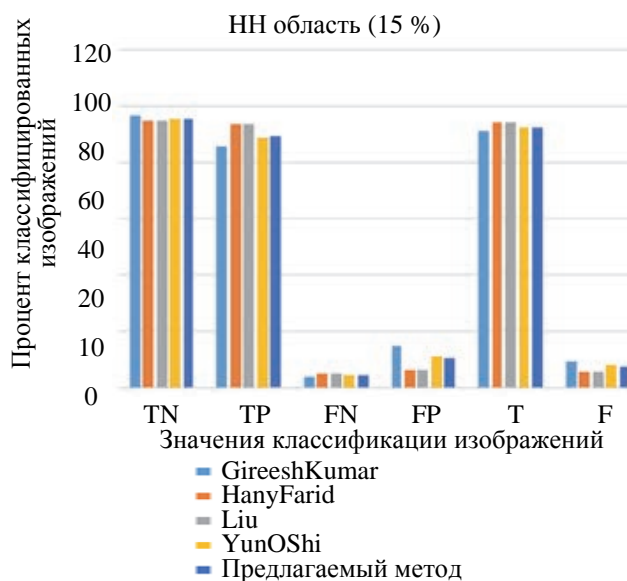


Рис. 10. График соотношения TN, TP, FP, FN при встраивании в НН область (полезная нагрузка 15%)

Из рис. 8–10 видно, что точность классификации оригинальных изображений существующими методами стеганоанализа [5–8] составляет 65,52% для ЛН области. В то же время точность предлагаемого метода составила 72,57%, таким образом, улучшение точности классификации оригинальных изображений для ЛН области составило 7,05%, а общее увеличение точности для ЛН области составило 2,1.

Максимальная точность методов стеганоанализа [5–8] для НЛ при классификации оригинальных изображений составила 73,9%, а предложенный метод показал точность в 76,36%, т.е. на 2,46% для данной области, а общая точность классификации изображений для ЛН области увеличилась на 2,2%.

Для НН области существующие методы стеганоанализа продемонстрировали общую точность в диапазоне от 91,01% до 94,24%. Предлагаемый метод показал для НН области общую точность в 92,46%, что является не самым плохим результатом, но проигрывает 2,08% по сравнению с наилучшим результатом. Снижение точности для НН области может быть объяснено тем, что в целях снижения вычислительной сложности обучения и использования машинных векторов в предлагаемом методе стеганоанализа использовался не весь перечень параметров, приведенных [5–8].

### Заключение

Повышение точности методов стеганоанализа при обнаружении факта встраивания в области НЛ и ЛН ДВП изображения может быть достигнуто за счет использования дополнительных параметров, добавляемых к опорному вектору, таких как статистические моменты, получаемые с помощью специализированного вейвлета.

Использование в предложенном методе стеганоанализа дополнительных параметров позволяет добиться увеличения верно классифицированных изображений для областей НЛ и ЛН на 2,5–7,0% по сравнению с существующими методами стеганоанализа [5–8], а общее увеличение точности классификации изображений составило 2,0–2,5%.

Дальнейшие исследования, направленные на повышение точности методов стеганоанализа, могут быть продолжены в следующих направлениях:

- повышение точности оценки погрешности значений статистических моментов за счет использования специальных вейвлетов, не чувствительных к встраиванию;
- поиск специальных вейвлетов, обладающих большой чувствительностью к встраиванию;
- исследование эффективности использования различных дополнительных параметров, используемых в других методах стеганоанализа (в том числе [5–8]), совместно с предлагаемым методом стеганоанализа для получения максимального процента обнаружения факта встраивания.

### Литература

1. Евсютин О.О., Негачева Е.В. Стеганографическое встраивание информации в цифровые изображения, сжатые с помощью блочных клеточных автоматов // Доклады ТУСУР. 2013. № 4(30). С. 130–135.
2. Gayathri C., Kalpana V. Study on image steganography techniques // International Journal of Engineering and Technology. 2013. V. 5. N 2. P. 572–577.
3. SPYCRAFT: The Secret History of the CIA's Spytchs from Communism to Al-Qaeda [Электронный ресурс]. Режим

### References

1. Evsutin O.O., Negacheva E.V. Steganographic embedding of information into digital images compressed with the use of block cellular automata. *Proceedings of TUSUR*, 2013, no. 4, pp. 130–135. (In Russian)
2. Gayathri C., Kalpana V. Study on image steganography techniques. *International Journal of Engineering and Technology*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 572–577.
3. *SPYCRAFT: The Secret History of the CIA's Spytchs from*



- доступа: <https://www.cia.gov/library/center-for-the-study-of-intelligence/csi-publications/csi-studies/studies/vol52no2/spycraft-the-secret-history-of-the-cia2019s.html> (Дата обращения 01.11.2017)
4. Nissar A., Mir A.H. Classification of steganalysis techniques: a study // *Digital Signal Processing: A Review Journal*. 2010. V. 20. N 6. P. 1758–1770. doi: 10.1016/j.dsp.2010.02.003
  5. Gireesh Kumar T., Jithin R., Shankar D.D. Feature based steganalysis using wavelet decomposition and magnitude statistics // *Proc. Int. Conf. on Advances in Computer Engineering*. Bangalore, India, 2010. P. 298–300. doi: 10.1109/ACE.2010.33
  6. Hany F. Detecting Steganographic Messages in Digital Images. Technical Report TR2001-412, Dartmouth College, 2001.
  7. Liu C., Ouyang C., Guo M., Chen H. Image steganalysis based on spatial domain and DWT domain features // *Proc. 2<sup>nd</sup> int. Conf. on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*. 2010. V. 1. P. 329–331. doi: 10.1109/NSWCTC.2010.271
  8. Shi Y.Q., Xuan G., Yang C., Gao J., Zhang Z., Chai P., Zou D., Chen C., Chen W. Effective steganalysis based on statistical moments of wavelet characteristic function // *Proc. Int. Conf. on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'05)*. Las Vegas, USA, 2005. V. 2. P. 768–773.
  9. Schaathun H.G. *Machine Learning in Image Steganalysis*. Wiley-IEEE Press, 2012. 290 p.
  10. Прохожев Н.Н., Михайличенко О.В., Башмаков Д.А., Сивачев А.В., Коробейников А.Г. Исследование эффективности применения статистических алгоритмов количественного стеганоанализа в задаче детектирования скрытых каналов передачи информации // *Программные системы и вычислительные методы*. 2015. № 3. С. 281–292. doi: 10.7256/2305-6061.2015.3.17233
  11. Prokhozhev N., Mikhailichenko O., Sivachev A., Bashmakov D., Korobeynikov A.G. Passive steganalysis evaluation: reliabilities of modern quantitative steganalysis algorithms // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. V. 451. P. 89–94. doi:10.1007/978-3-319-33816-3\_9
  12. Сивачев А.В., Прохожев Н.Н., Михайличенко О.В., Башмаков Д.А. Эффективность стеганоанализа на основе методов машинного обучения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 3. С. 457–466. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-457-466
  13. Смирнов В.И. *Курс высшей математики*. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. Т. 1. 614 с.
  14. BOWS2 the 10 000 original images [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bows2.ec-lille.fr/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.07.2016) *BOWS2 the 10 000 original images*. Available at: <http://bows2.ec-lille.fr/> (accessed 17.07.2016).
  15. Walia R. Steganography based on neighborhood pixels // *Proc. 2<sup>nd</sup> Conf. on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. Mysore, India, 2013. P. 203–206. doi: 10.1109/ICACCI.2013.6637171
  16. Qin J., Xiang X., Deng Y., Li Y., Pan L. Steganalysis of highly undetectable steganography using convolution filtering // *Information Technology Journal*. 2014. V. 13. N 16. P. 2588–2592. doi: 10.3923/itj.2014.2588.2592
  4. Nissar A., Mir A.H. Classification of steganalysis techniques: a study. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 2010, vol. 20, no. 6, pp. 1758–1770. doi: 10.1016/j.dsp.2010.02.003
  5. Gireesh Kumar T., Jithin R., Shankar D.D. Feature based steganalysis using wavelet decomposition and magnitude statistics. *Proc. Int. Conf. on Advances in Computer Engineering*. Bangalore, India, 2010, pp. 298–300. doi: 10.1109/ACE.2010.33
  6. Hany F. Detecting Steganographic Messages in Digital Images. *Technical Report TR2001-412*, Dartmouth College, 2001.
  7. Liu C., Ouyang C., Guo M., Chen H. Image steganalysis based on spatial domain and DWT domain features. *Proc. 2<sup>nd</sup> int. Conf. on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, 2010, vol. 1, pp. 329–331. doi: 10.1109/NSWCTC.2010.271
  8. Shi Y.Q., Xuan G., Yang C., Gao J., Zhang Z., Chai P., Zou D., Chen C., Chen W. Effective steganalysis based on statistical moments of wavelet characteristic function. *Proc. Int. Conf. on Information Technology: Coding and Computing, ITCC'05*. Las Vegas, USA, 2005, vol. 2, pp. 768–773.
  9. Schaathun H.G. *Machine Learning in Image Steganalysis*. Wiley-IEEE Press, 2012, 290 p.
  10. Prokhozhev N.N., Mikhailichenko O.V., Bashmakov D.A., Sivachev A.V., Korobeynikov A.G. Software Study the effectiveness of statistical algorithms of quantitative steganalysis in the task of detecting hidden information channels. *Systems and Computational Methods*, 2015, no. 3, pp. 281–292. (In Russian) doi: 10.7256/2305-6061.2015.3.17233
  11. Prokhozhev N., Mikhailichenko O., Sivachev A., Bashmakov D., Korobeynikov A.G. Passive steganalysis evaluation: reliabilities of modern quantitative steganalysis algorithms. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, vol. 451, pp. 89–94. doi:10.1007/978-3-319-33816-3\_9
  12. Sivachev A.M., Prokhozhev N.N., Mikhailichenko O.V., Bashmakov D.A. Effectiveness of steganalysis based on machine learning methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 457–466 (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-457-466
  13. Smirnov V.I. *A Course of Higher Mathematics*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2008, vol. 1, 614 p.
  14. BOWS2 the 10 000 original images. Available at: <http://bows2.ec-lille.fr/> (accessed 17.07.2016).
  15. Walia R. Steganography based on neighborhood pixels. *Proc. 2<sup>nd</sup> Conf. on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI*. Mysore, India, 2013, pp. 203–206. doi: 10.1109/ICACCI.2013.6637171
  16. Qin J., Xiang X., Deng Y., Li Y., Pan L. Steganalysis of highly undetectable steganography using convolution filtering. *Information Technology Journal*, 2014, vol. 13, no. 16, pp. 2588–2592. doi: 10.3923/itj.2014.2588.2592

### Авторы

**Сивачев Алексей Вячеславович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57190251278, ORCID ID: 0000-0002-2984-1642, sivachev239@mail.ru

**Прохожев Николай Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57190261721, ORCID ID: 0000-0002-1940-4094, Jesaul1@yandex.ru

**Михайличенко Ольга Викторовна** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57190246177, ORCID ID: 0002-6732-0450, 19791109@list.ru

### Authors

**Alexey V. Sivachev** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57190251278, ORCID ID: 0000-0002-2984-1642, sivachev239@mail.ru

**Nikolay N. Prokhozhev** – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57190261721, ORCID ID: 0000-0002-1940-4094, Jesaul1@yandex.ru

**Olga V. Mikhailichenko** – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57190246177, ORCID ID: 0002-6732-0450, 19791109@list.ru