

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО СТЕГОАНАЛИЗА БИНАРНЫХ И ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.А. Митекин

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

Аннотация

Проведен анализ стеганографической стойкости алгоритмов встраивания «цифровых водяных знаков», использующих контроль визуального качества изображения. Разработаны модифицированные алгоритмы статистического стегоанализа для случаев бинарных и полутонных изображений. Проведено исследование эффективности разработанных алгоритмов.

Введение

Алгоритм внедрения «цифровых водяных знаков (далее ЦВЗ)» в бинарные и полутонные изображения, использующий контроль визуального качества изображения-контейнера, как усовершенствованный вариант алгоритмов DHST (Data Hiding Self-Toggling) [1] и DHSPT (Data Hiding by Smart Pair-Toggling) [2] был впервые предложен в [3]. Основной целью разработки алгоритма являлась минимизация визуальных искажений изображения-контейнера при встраивании ЦВЗ.

Целью данной работы является анализ стойкости алгоритма встраивания ЦВЗ авторов [3], [4], [5], разработка алгоритма статистического стегоанализа для изображений данного вида и исследование его эффективности.

В частности, показано, что класс алгоритмов встраивания ЦВЗ, использующих контроль визуального качества, не может быть признан надежным с точки зрения стеганографической стойкости.

1. Методы внедрения ЦВЗ

Стеганографическим встраиванием называется процесс встраивания информации в произвольный естественный контейнер (например, изображение), при котором сам факт наличия встроенной информации не может быть обнаружен.

Под стойкостью стеганографического алгоритма в данном случае понимается его способность скрывать факт передачи сообщений, а также способность противостоять попыткам нарушителя разрушить или исказить сообщение.

1.1. Метод внедрения ЦВЗ в бинарное изображение с контролем визуального качества

Данный метод является модификацией алгоритмов DHST (Data hiding by single toggling) и DPST (Data hiding by pair toggling), предложенных в [1], [2]. Метод ориентирован, прежде всего, на сохранение визуального качества изображения при условии меньших, чем в упомянутых методах, объемов встраиваемой информации.

Рассматриваемый метод основан на кодировании встраиваемой информации количеством темных или светлых пикселей в блоке фиксированного размера. В данном случае используется кодирование одного бита встраиваемой информации битом четности блока 3×3 пикселя.

Предположим, что имеется бинарное изображение размера $M \times N$ пикселей. Разделим его на мно-

жество непересекающихся блоков B_i , каждый размера 3×3 , где $1 \leq i \leq (M \times N) / (3 \times 3)$. В каждый из этих блоков будет внедрен бит информации s_i . Двумерный генератор псевдослучайных точек выбирает блок для внедрения. Решение о необходимости изменения бита в данном блоке принимается на основе формулы «контроля четности»:

$$H = \begin{cases} 0 & s_i = \sum_{j=1}^9 p_j \pmod{2} \\ 1 & s_i \neq \sum_{j=1}^9 p_j \pmod{2} \end{cases}, \quad (1)$$

где p_j – значение функции яркости пикселя в рассматриваемом блоке B_i .

Если внедряемый бит соответствует биту четности H данного блока, то считается, что бит информации уже внедрен. Иначе необходимо инвертировать один пиксел в блоке. Выбор пикселя-кандидата для внедрения бита ЦВЗ основан на преобладающем цвете в блоке.

$$\text{Цветкандидата} = \begin{cases} \text{черный, если } N_B < 4, \\ \text{белый, если } N_B \geq 7, \\ \text{любой, если } 4 \leq N_B < 7, \end{cases} \quad (2)$$

где N_B – количество темных пикселей в выбранном блоке.

Предположим, что существует L кандидатов в блоке, из которых нужно выбрать один. На окрестность каждого кандидата наложим матрицу веса размерностью 5×5 , с помощью которой чего рассчитаем «вес» каждого кандидата.

Определение. Наиболее подходящим кандидатом будем называть пиксел-кандидат с наибольшим весом (так называемая CS-схема).

Предположим, что кандидат имеет координаты (m, n) . Тогда вес r рассчитывается следующим образом:

$$r(m, n) = \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 [w(i, j) \times I_{mn}(i, j)],$$

$$I_{mn}(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } O(m, n) = O(m+i, n+j), \\ 1, & \text{если } O(m, n) \neq O(m+i, n+j), \end{cases}$$

где

$O(m, n)$ – значение функции яркости пикселя исходного изображения с координатами (m, n) ;

$$W = (w_{i,j}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – матрица веса.}$$

Вес $r(m,n)$ является мерой, характеризующей взаимосвязь кандидата и его соседних пикселей. Если найдено несколько кандидатов с одинаковым весом, выбирается любой из них. В результате встраивания значение кандидата с наибольшим весом изменяется на противоположное. Таким образом, один блок содержит один бит ЦВЗ.

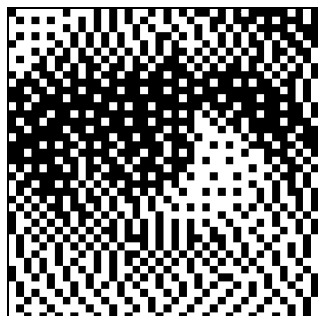


Рис. 1. Оригинальное изображение

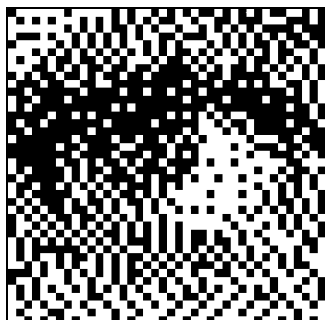


Рис. 2. Модифицированное изображение

На рис. 1 представлен увеличенный фрагмент оригинального изображения. На рис. 2 представлен фрагмент того же самого изображения после внедрения ЦВЗ объемом 40 бит.

Данный метод кодирования является наиболее широко распространенным для встраивания ЦВЗ в бинарные изображения. На его основе разработан ряд модифицированных алгоритмов, описанных в [1], [4], [6], [7].

1.2. Метод внедрения ЦВЗ в полутоновые изображения

Метод предложен в [5] и основан на представлении полутонового изображения в виде совокупности битовых «слоев», каждый из которых представляет изображение с глубиной цвета 1 бит. Таким образом, данный алгоритм применяется для одного или нескольких выбранных «слоев». Выбранный битовый слой изображения-контейнера модифицируется в соответствии с представленным выше методом. Результатом встраивания ЦВЗ является изображение той же глубины цвета, что и исходное.

2. Методы статистического стегоанализа

В разделе 2.1 рассмотрен базовый алгоритм статистического стегоанализа полноцветных изображений, предложенный в [8]. В разделах 2.2 и 2.3 представлены описания авторских результатов, являющихся модификацией базового алгоритма для случая бинарных и полутоновых изображений.

2.1. Метод статистического стегоанализа, основанный на статистике «пар значений»

Рассмотрим метод стегоанализа на основе анализа статистики «пар значений». Данный метод, как показано в [8], может быть эффективно использован для стегоанализа наиболее распространенного метода встраивания в «наименьший значащий бит» (LSB), когда младший бит цветовой компоненты каждого пиксела контейнера-изображения заменяется битом скрываемого сообщения. Метод основан на поиске закономерности в вероятностях появления значений яркости в естественных изображениях и изображениях со встроенным ЦВЗ. При замене младшего бита цветовой компоненты очередного пиксела изображения на очередной бит предварительно зашифрованного или сжатого ЦВЗ, значение яркости пиксела модифицированного изображения либо равно значению яркости пиксела контейнера, либо изменяется на единицу с вероятностью $\sim 1/2$. Для поиска следов встраивания был предложен метод анализа закономерностей в частотах появления «соседних» значений яркости. Такие пары значений («Pair of Values») различаются только значением наименее значащего бита (далее LSB, НЗБ). Значение яркости, двоичное представление которого заканчивается нулевым битом 1, назовем «левым» (L), а соседнее с ним значение яркости, двоичное представление которого заканчивается единичным битом – «правым» (R). Пусть цветовая гамма исходного контейнера включает 8 цветов. Следовательно, при встраивании сообщения в НЗБ цветовой компоненты пикселей необходимо исследовать статистические характеристики в 4 парах номеров цвета. На рис. 3 слева показана одна из типичных гистограмм вероятностей появления «левых» и «правых» номеров цвета в естественных контейнерах. Справа показана гистограмма вероятностей появления «левых» и «правых» значений яркости в изображении, полученном при встраивании ЦВЗ. На диаграмме хорошо видно, что вероятности появления левых и правых номеров цвета в естественных контейнерах, существенно различаются между собой во всех парах, а в изображении со встроенным ЦВЗ эти вероятности равны. Это является явным признаком наличия скрываемой информации. Заметим, что среднее значение вероятностей для каждой пары в модифицированном изображении не изменилось по сравнению с исходным контейнером (показано на рис. 3 пунктирной линией).

При замещении битами внедряемого сообщения младших битов яркостной компоненты пикселей контейнера-изображения проявляются аналогичные статистические различия.

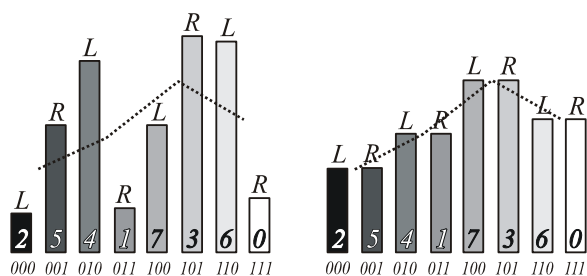


Рис. 3. Гистограмма частот появления левых и правых номеров цвета, слева – до встраивания ЦВЗ, справа – после

Степень различия между вероятностными распределениями элементов естественных контейнеров и изображений с встроенным ЦВЗ может быть использована для оценки вероятности наличия ЦВЗ в изображении. Данную вероятность удобно определять с использованием критерия согласия χ^2 [8], [9]. Согласно критерию определяется, насколько распределение исследуемой последовательности близко к характерному для изображений с ЦВЗ распределению. В исследуемой последовательности подсчитывается, сколько раз n_i ее элемент x_i принял рассматриваемые значения, при общем количестве элементов k . Например, в гистограмме левых и правых номеров цвета в левой части рис. 3 номер цвета 000 появился 2 раза ($n_0^* = 2$), а номер 001 – 5 раз ($n_1^* = 5$). При встраивании очередных битов скрываемого сообщения в НЗБ этой пары номер цвета 000 должен появляться в среднем n_0 раз, где $n_0 = (n_0^* + n_1^*) / 2$.

Так как общее число n появления всех элементов исследуемой последовательности известно, легко подсчитать ожидаемую вероятность появления этих элементов в изображении с ЦВЗ по правилу: $p_i = n_i / n$. Соответственно, для исследуемой последовательности вероятности равны $p_i^* = n_i^* / n$.

Величина χ^2 , для сравниваемого распределения исследуемой последовательности и ожидаемого распределения изображения с ЦВЗ, равна

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^v \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i},$$

$$v = k - m,$$

где v – число степеней свободы;

m – число независимых условий, наложенных на вероятность p_i^* .

2.2. Модифицированный алгоритм статистического стегоанализа для полутоновых изображений

Согласно работам [8, 9], описанный метод статистического анализа полноцветных изображений не может быть с достаточной степенью эффективности применен для анализа бинарных изображений, так как основан на статистическом анализе «пар

значений» для величины яркости конкретных точек изображения. В случае с бинарными изображениями существует всего два значения яркости пиксела, что делает описанный статистический анализ на основе критерия согласия χ^2 неэффективным. Покажем, что метод может быть модифицирован и для случая бинарных изображений.



Рис. 4. Изображение 1 класса

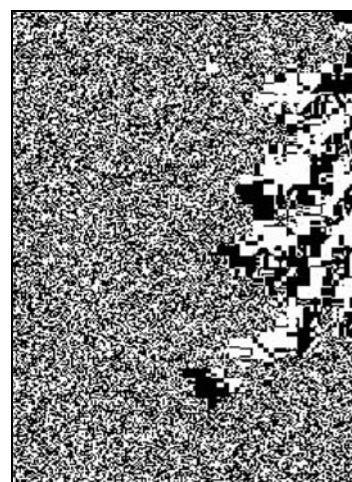


Рис. 5. Изображение 2 класса

Так как при использовании описанного алгоритма встраивания ЦВЗ изменения вносятся не в конкретный пиксел изображения, а в выбранный по определенному закону пиксел из заданного блока 3×3 , то можно считать, что данный алгоритм изменяет количество блоков с заданным N_B в изображении. Определим характер распределения данной величины (количество блоков) для оригинальных изображений и для изображений со встроенным ЦВЗ.

Далее будем рассматривать два класса тестовых изображений:

1. Непосредственно бинарные изображения.
2. Бинарные изображения, полученные из полутонных путем выделения «младшего» битового слоя.

Определим характер распределения количества блоков с заданным N_B для оригинальных изображе-

ний из каждого класса и для тех же изображений с ЦВЗ, встроенным в 100% блоков изображения.

На рис. 6-9 приведены распределения, полученные экспериментальным путем для изображений 1 класса (рис. 6, 7) и 2 класса (рис. 7, 8), до и после встраивания ЦВЗ.

Из проведенных вычислительных экспериментов следует, что для оригинальных изображений класса 2 распределение является близким к биномиальному распределению с $p=0,5$, при условии, что блоки $N_B=0$ и $N_B=9$ не учитываются. В то же время, распределение для модифицированных изображений класса 2 не является таковым.



Рис. 6. Распределение величины N_B для изображений класса 1, оригинальные изображения

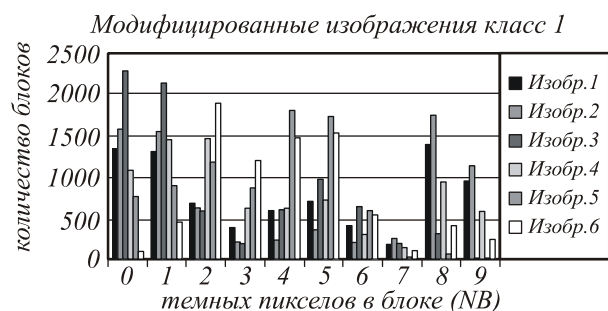


Рис. 7. Распределение величины N_B для изображений класса 1 со встроенным ЦВЗ

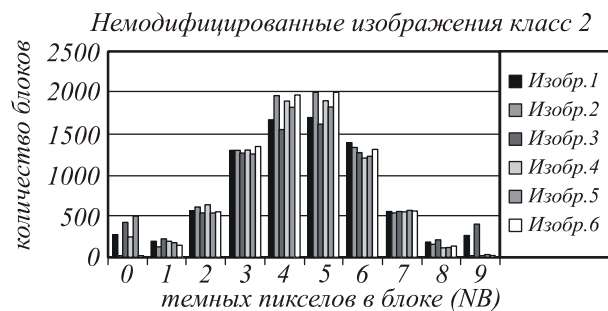


Рис. 8. Распределение величины N_B для изображений класса 2, оригинальные изображения

Следовательно, статистический анализ для класса 2 (то есть фактически для полутоновых изображений) можно свести к проверке распределения заданной величины N_B . В случае, если распределение не является биномиальным с $p=0,5$, с определенной достоверностью можно говорить о том, что изображение содержит встроенный ЦВЗ.

Основываясь на гипотезе о биномиальном распределении величины N_B для оригинальных изображений, опишем алгоритм статистического стегоана-

лиза для полутоновых изображений следующим образом.

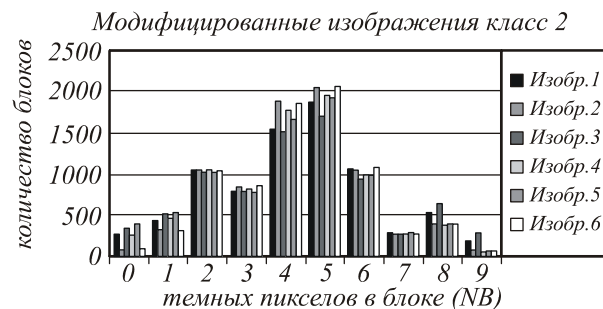


Рис. 9. Распределение величины N_B для изображений класса 2 со встроенным ЦВЗ

Шаг 1. Рассмотреть распределение величины N_B (количество темных пикселей в блоке), не учитывая значения $N_B=0$ и $N_B=9$.

Шаг 2. Использовать критерий согласия χ^2 при заданном α для сравнения полученной выборки и выборки, сгенерированной по биномиальному закону распределения с $p=0,5$.

Шаг 3. На основании проверки критерия сделать вывод о наличии или отсутствии в изображении встроенного ЦВЗ.

Для изображений класса 1 (бинарные изображения) характер распределения величины N_B неизвестен и в случае оригинального изображения, и в случае изображения со встроенным ЦВЗ. Описанный выше метод анализа не может быть применен для этого класса изображений без соответствующих модификаций.

2.3. Модифицированный алгоритм статистического стегоанализа для бинарных изображений

Из описания алгоритма встраивания ЦВЗ известно, что наиболее подходящим кандидатом для внедрения бита информации является пиксел блока 3×3 с наибольшим «весом». Для нахождения веса используется маска 5×5 пикселей с матрицей \mathbf{W} , являющаяся упрощенным вариантом «объективной меры визуальных искажений» [10].

Исходя из этого, можно считать, что встраивание ЦВЗ в изображение повлечет за собой наиболее значительное изменение количества пикселей с максимальным весом, вне зависимости от значения величины N_B в данном блоке. Таким образом, встраивание ЦВЗ должно повлечь за собой наиболее значительные изменения в количестве пикселей с максимальным и близким к максимальному весом.

Далее, введем следующие категории пикселей изображения:

1. «Пиксел-кандидат» – пиксел, имеющий максимальный вес в данном блоке 3×3 , (этот пиксел будет с наибольшей вероятностью изменен при встраивании).

2. «Подозреваемый пиксел» – пиксел, имеющий максимальный вес при условии его инвертирования. Таким образом, пиксел является подозреваемым, если при инвертировании он имеет максимальный вес

в блоке. Данный пиксел с наибольшей вероятностью уже был использован для встраивания ЦВЗ, если таковое производилось.

Пусть N_{2x} и N_{1x} – общее количество пикселей заданного веса x , принадлежащих, соответственно, к 1 или 2 категории. Рассмотрим распределение величины $(N_{2x}-N_{1x})$ для оригинального изображения (рис. 10) и изображения со встроенным ЦВЗ (рис. 11).



Рис. 10. Распределение величины $(N_{2x}-N_{1x})$ для оригинальных изображений



Рис. 11. Распределение величины $(N_{2x}-N_{1x})$ для изображений со встроенным ЦВЗ

Из проведенных вычислительных экспериментов следует, что распределение данной величины до и после встраивания значительно различаются только для значений x , близких к максимальному и минимальному весу. Для оригинальных изображений эти значения могут быть оценены. Для модифицированных изображений эти значения значительно превышают соседние и, соответственно, существенно превышают построенные оценки.

Опишем алгоритм статистического стегоанализа для бинарных изображений.

Шаг 1. Рассмотреть распределение величины $(N_{2x}-N_{1x})$, где N_{2x} и N_{1x} – общее количество соответствующих пикселей заданного веса. Построить линейные аппроксимации $(N_{2x}-N_{1x})_{\text{аппрокс}}$ величин $(N_{2x}-N_{1x})$ методом наименьших квадратов, на основе 4-5 значений, например для $x_{\text{max}}-7 < x < x_{\text{max}}-2$ и $x_{\text{min}}+2 < x < x_{\text{min}}+7$, где x_{max} – максимальный и x_{min} – минимальный вес пикселя. Результатом будут являться два уравнения вида $y=a+bx$

Шаг 2. Рассмотреть две выборки независимых случайных величин:

- величины $|(N_{2x}-N_{1x})_{\text{аппрокс.}} - (N_{2x}-N_{1x})|$, где x принимает минимальное ($x_1=x_{\text{max}}$) и максимальное значение ($x_2=x_{\text{min}}$).
- величины $|(N_{2x}-N_{1x})_{\text{аппрокс.}} - (N_{2x}-N_{1x})|$, где x принимает значения $x_3=\text{max}-1$ и $x_4=\text{min}+1$, $x_5=\text{max}-2$ и $x_6=\text{min}+2$.

Шаг 3. Основываясь на предположении, что для оригинальных изображений рассмотренные выборки будут иметь одинаковое математическое ожидание, используем t-критерий Уэлча для проверки при заданном α гипотезы о равенстве мат. ожиданий двух независимых выборок с неизвестным законом распределения.

Шаг 4. На основании проверки данной гипотезы сделать вывод о наличии ЦВЗ (математические ожидания выборок не равны) или его отсутствии (математические ожидания равны).

2.4. Стегоанализ для алгоритмов встраивания «изображения в изображение»

При анализе стеганографических алгоритмов принято полагать, что встраиваемая информация (ЦВЗ) может быть с достаточной точностью описана моделью «белого шума» [8, 9]. Данное предположение обосновывается тем фактом, что перед встраиванием ЦВЗ предварительно подвергается декоррелирующему преобразованию (например, шифрованию).

Принципиально отличным является случай, когда декоррелирующее преобразование не используется и ЦВЗ внедряется в изображение контейнер без каких-либо модификаций. Наиболее распространенным подходом в данном случае является встраивание «изображения в изображение», где в качестве изображения-ЦВЗ может выступать, к примеру, логотип или подпись владельца. Данный подход к встраиванию ЦВЗ подробно рассмотрен и реализован в [11]. Суть его заключается в замене младших бит изображения-контейнера старшими битами изображения-ЦВЗ, что обеспечивает минимальные визуальные искажения изображения-контейнера. Более подробная схема алгоритма изображена на рис. 12.

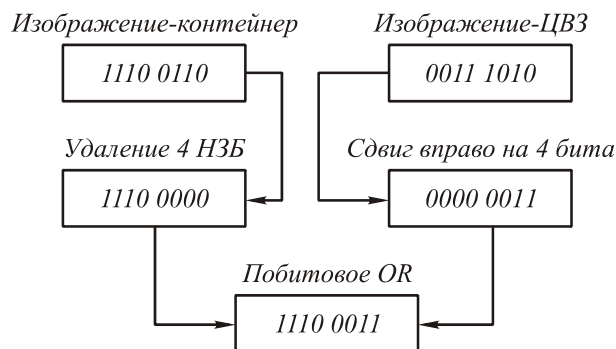


Рис. 12. Схема встраивания «изображения в изображение»

Метод статистического анализа «пар значений», описанный в [8], не может быть эффективно применен для стегоанализа в данном случае, так как основан именно на предположении о «случайности» встраиваемого ЦВЗ.

Исследуем эффективность разработанных методов применительно к алгоритму встраивания «изображения в изображение». Рассмотрим пример распределения величины N_b для младшего (рис. 13) и старшего (рис. 14) битовых слоев полутоновых (8 бит/пиксел) изображений.

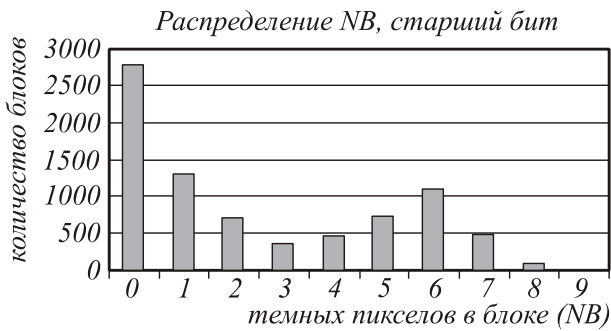


Рис. 13. Распределение величины N_B , старшие значащие биты изображения

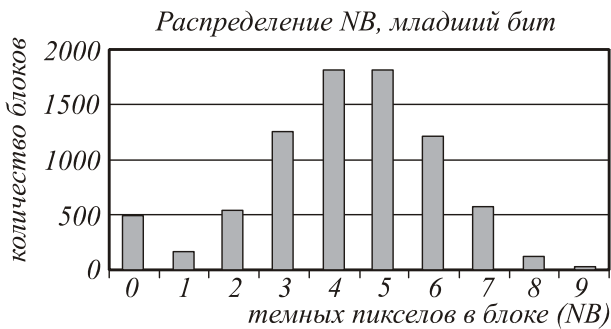


Рис. 14. Распределение величины N_B , младшие значащие биты изображения

Как уже было отмечено в разделе 2.2, распределение величины N_B для младшего битового слоя является близким к биномиальному распределению с $p=0,5$, при условии, что блоки $N_B=0$ и $N_B=9$ не учитываются. Проведенный вычислительный эксперимент позволяет утверждать, что для старшего битового слоя такое распределение не наблюдается. Исходя из этого, можно предположить, что разработанный метод стегоанализа для полутоновых изображений применим и для обнаружения встраивания «изображения в изображение».

3. Результаты экспериментальных исследований

Для исследования эффективности разработанных алгоритмов был проведен следующий эксперимент.

1. Пятьдесят изображений каждого из классов (бинарные и полутоновые) были приведены к разрешению 640×480 пикселей.

2. Для каждого из классов случайным образом были выбраны по 25 изображений, в которые были внедрены ЦВЗ заданного объема.

3. Изображения каждого класса обрабатывались с помощью описанных алгоритмов. Для каждого изображения был получен детерминированный результат «наличие ЦВЗ/отсутствие ЦВЗ».

4. Для каждого из классов изображений было подсчитано количество ошибок 1 типа (пропущенное изображение с ЦВЗ) и 2 типа (ложно опознанное изображение без ЦВЗ).

Данные операции были независимо повторены для ЦВЗ, встроенного в 50%, 25% и 10% блоков изображения (соответственно, объем ЦВЗ был равен 50%, 25% и 10% от максимального). Были получены следующие результаты (см. таблицы).

Таблица 1. Результаты анализа. Бинарные изображения

Объем ЦВЗ, %	Обнаружено, %	Ложные срабатывания, %
50	96	4
25	84	8
10	80	8

Таблица 2. Результаты анализа. Полутоновые изображения

Объем ЦВЗ, %	Обнаружено, %	Ложные срабатывания, %
50	92	8
25	88	8
10	84	8

Заключение

В результате проведенного исследования было показано, что использование рассматриваемого метода стеганографии вносит характерные искажения в статистические характеристики несущего изображения и, следовательно, факт применения данного метода может быть обнаружен средствами статистического стегоанализа. На основе полученных экспериментальных данных было выдвинуто предположение о характере распределения величин N_B и $(N_{2x}-N_{1x})$, что позволило создать метод стегоанализа для рассматриваемого класса изображений, используя стандартный t-критерий Уэлча.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод об эффективности разработанного метода стегоанализа при объеме встраиваемого ЦВЗ более 10% от максимально возможного. Кроме того, данный метод может быть применен для стегоанализа всего класса стеганографических алгоритмов, использующих при встраивании критерий визуального качества изображений.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что класс алгоритмов встраивания ЦВЗ, использующих контроль визуального качества, не может быть признан надежным с точки зрения стеганографической стойкости.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, правительства Самарской области и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF Project SA-014-02) в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRNE), а также при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1007.2003.01.

Литература

1. Fu M.S., Au O.C. Data hiding in halftone image by pixel toggling // Proc. of SPIE Conference on Security and Watermarking of Multimedia Contents, California, USA, Jan. 2000. Vol. 3971. P. 228-236.

2. Fu M.S., Au O.C. Data hiding by smart pair toggling for halftone images // Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Istanbul, Turkey, 2000. Vol. 4. P. 2318-2321.
3. Fu M.S., Au O.C. Halftone Image Data Hiding with Intensity Selection and Connection Selection // Signal Processing: Image Communication, 2001. Vol. 16. No. 10. P. 909-930.
4. Tseng Y.-C., Chen Y.-Y., Pan H.-K. A Secure Data Hiding Scheme for Binary Images // IEEE Trans. on Communications, (SCI, EI). Aug. 2002. Vol. 50. № 8. P. 1227-31.
5. Hae Yong Kim, Amir Afif, A secure authentication watermarking for halftone and binary images // <http://www.lps.usp.br/~hae/ijist04.pdf>
6. Fu M.S. [Ming Sun], Au, O.C. Data hiding watermarking for halftone images // IEEE Trans. Image Processing, 2002. № 4. P. 477-484.
7. Yu-Chee Tseng and Hsiang-Kuang Pan. Secure and invisible data hiding in 2-color images // INFOCOM 2001: P. 887-896.
8. Goljan M., Soukal D., Fridrich J. Higher-order statistical steganalysis of palette images // Security and Watermarking of Multimedia Contents V. Edited by Delp, Edward J., III; Wong, Ping W. Proceedings of the SPIE, Volume 5020, 2003. P. 178-190.
9. Westfeld A., Pfitzmann A. Attacks on Steganographic Systems // Proceedings of the Third International Workshop on Information Hiding, September 29-October 01, 1999. P. 61-76.
10. Jun Cheng and Alex C. Kot, Objective distortion measure for binary images // <http://www.ntu.edu.sg/eee/cis/biwmr/publications/A-355.pdf>
11. Alkhraisat Habes, 4 least Significant Bits Information Hiding Implementation and Analysis // GVIP 05 Conference, 19-21 December 2005, CICC, Cairo, Egypt <http://www.icgst.com/GVIP05/papers/P1150535121.pdf>