УДК 004.415.24; 519.22

Л.Л. Никитенко

ОБРАТНЫЕ МЕТОДЫ СТЕГАНОАНАЛИЗА НА ОСНОВЕ χ^2-КРИТЕРИЯ

Введение

За бурным развитием методов компьютерной стеганографии должно следовать развитие методов стеганоанализа, первая и основная цель которого — обнаружение присутствия встроенной информации. Встраивание дополнительной информации в цифровые сигналы может осуществляться в исходный сигнал до применения каких-либо преобразований, в преобразованный сигнал, до сжатия/кодирования, в процессе сжатия/кодирования или после этого [1–5]. Чтобы испортить или удалить из файла встроенную информацию, часто достаточно применить к нему разные типы сглаживающей фильтрации, обрезку или сжатие с потерями. Для изъятия встроенной информации, как правило, стеганоаналитику нужно знать, как и куда была встроена дополнительная информация. Задача стеганоаналитика упрощается, если он может каким-то образом получить некоторые дополнительные данные о контейнере: например оценку гистограммы. В этом случае появляется возможность более эффективно использовать статистический стеганоанализ.

Статистический стеганоанализ — одно из важнейших направлений стеганоанализа. Он требует построения математических моделей стеганосистемы и формальных доказательств возможности применения статистических критериев в рамках этих моделей. Чаще всего в статистическом стеганоанализе решается задача разделения принятых файлов на контейнеры и стеганограммы (задача о двух гипотезах). В математической статистике существует несколько критериев для решения задачи о разделении двух гипотез, одним из них является χ^2-критерий. В стеганоанализе χ^2-критерий используется в ситуациях, когда в стего-изображения дополнительная информация встроена в наименьшие значащие биты (НЗБ) пикселов или коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП), используемого в формате JPEG [6–8]. В этих методах основной гипотезой служит гипотеза о принятой стеганограмме (далее на эти методы будем ссылаться как на методы χ^2). В данной работе в качестве основной гипотезы рассматривается гипотеза о принятом пустом контейнере (далее на эти методы будем ссылаться как на обратные методы χ^2).

Теоретическая база для обратных методов на основе χ^2-критерия

В обратных методах стеганоанализа на основе χ^2-критерия в качестве основной гипотезы о принятом сигнале (в нашем случае — изображения) выбрана гипотеза о принятом пустом контейнере. Альтернативная гипотеза соответственно — это гипотеза о принятом стего. Если метод стеганоанализа строится на основе χ^2-критерия, то возникает необходимость определить теоретическое распределение контейнера (его еще называют гипотетическим или предполагаемым распределением). В χ^2-критерии

 ISSN 0572-2691

теоретическое распределение контейнера определяется из исходных данных, т.е. из распределения принятого сигнала, с использованием некоторых априорных предположений. Предположим, что вся встроенная информация удаляется из стего с помощью усредняющей фильтрации. При этом применение усредняющей фильтрации к принятому сигналу действует так, что распределение отфильтрованного стего практически совпадает с распределением контейнера, а распределение отфильтрованного контейнера почти не меняется. Воспользоваться таким предположением можно тогда, когда встраивание дополнительной информации осуществлялось методами замены НЗБ.

Далее нам потребуются определения некоторых понятий, которыми оперирует матстатистика.

Статистическими характеристиками [9] называют все подлежащие определению величины: вероятности событий, числовые характеристики, распределения случайных величин и т. д.

Оценка [9] статистической характеристики θ называется состоятельной, если она сходится по вероятности к θ при неограниченном числе опытов.

Частота события является **состоятельной оценкой** [9] вероятности события (теорема Якова Бернулли). Эта оценка также несмещенная. Частота события в нашем случае — не что иное, как гистограмма изображения.

Следующая теорема создает основу для создания такой математической модели стеганосистемы, что применение усредняющей фильтрации к стего и контейнерам обеспечит выполнение вышеуказанных требований.

Теорема 1 [10]. Пусть X — последовательность целых чисел длиной *M*, принимающих конечное число значений $s_t \in S, t = 1, ..., T,$ и пусть для $x \in X$ почти всегда выполняется условие: для любого четного числа $2m \le \frac{M}{2},$ если $x_{2m} = k,$ то $x_{2m+1} = k, x_{2m}, x_{2m+1} \in X$ в том смысле, что

$$\forall \varepsilon > 0 \;\; P(x_{2m+1} \ne k | x_{2m} = k) < \varepsilon \;\text{ при }\; M \to \infty. \tag{1}$$

Создадим из X последовательность целых чисел X^*, для элементов которой выполняется условие*

$$x_{2m}^* = x_{2m+1}^* = \left\lceil \frac{x_{2m} + x_{2m+1}}{2} \right\rceil.$$

Вероятности P_k и P_k^* определим как

$$P((x \in X) \cup (x = k)) = P_k,$$
$$P((x^* \in X^*) \cup (x^* = k)) = P_k^*.$$

Тогда вероятность P_k^* сходится по вероятности к P_k при $M \to \infty,$ т.е. выполняется условие

$$\forall \varepsilon_0 > 0 \;\; P(\left| P_k - P_k^* \right| \ge \varepsilon_0) \to 0 \;\; \text{\textit{при}} \;\; M \to \infty. \tag{2}$$

Доказательство. Разделим каждое из множеств X и X^* на два подмножества:

$$\begin{gathered} X1 = \{x \in X : \forall x_{2m} = l \Rightarrow x_{2m+1} = l\}, \\ X2 = \{x \in X : \forall x_{2m} = l \Rightarrow x_{2m+1} \ne l\}, \\ X1^* = \{x^* \in X^* : \forall x_{2m}^* = l \Rightarrow (x_{2m} \in X1) \cup (x_{2m} = l)\}, \\ X2^* = \{(x^* \in X^*) \cup (x^* \notin X1^*)\}. \end{gathered} \tag{3}$$

* Имеется в виду целочисленное деление.

Из условия (1) следует, что

$$\forall \varepsilon > 0 \;\; P2_k = P((x = k) \cup (x \in X2)) < \varepsilon \;\text{ при }\; M \to \infty,$$

поскольку именно в $X2$ попали все элементы, не имеющие равного по значению соответствующего соседнего элемента в последовательности X. Согласно способу разделения X и X^* на два подмножества (3) любой элемент из множества $X1$ попадет в $X1^*$ и не изменит своей величины:

$$P1_k^* = P((x^* = k) \cup (x^* \in X1^*)) = P((x = k) \cup (x \in X1)) = P1_k.$$

Любой элемент из множества $X2$ попадет в $X2^*$, часть их изменит свое значение в меньшую или большую сторону. В общем случае

$$P2_k^* = P((x^* = k) \cup (x^* \in X2^*)) \neq P((x = k) \cup (x \in X2)) = P2_k.$$

Любой элемент множества $X2$ мог иметь одно из T возможных значений. В самом худшем случае все элементы множества $X2^*$ будут иметь одно единственное значение, поэтому

$$P2_k^* \leq \sum_{s_t \in S} P2_{s_t} < T\varepsilon \;\text{ при }\; M \to \infty.$$

Итак,

$$\left|P_k - P_k^*\right| = \left|P1_k + P2_k - P1_k^* - P2_k^*\right| = \left|P2_k - P2_k^*\right| < T\varepsilon \;\text{ при }\; M \to \infty.$$

Отсюда следует, что неравенство $\left|P_k - P_k^*\right| \geq \varepsilon_0$ может выполняться только тогда, когда $\varepsilon_0 > T\varepsilon$, теперь условие (2) можно переписать:

$$\forall \varepsilon_0 > 0 \quad P(\left|P_k - P_k^*\right| \geq \varepsilon_0) \leq P(T\varepsilon \geq \varepsilon_0) \;\text{ при }\; M \to \infty.$$

Поскольку по условию теоремы при $M \to \infty$ можно выбрать ε как угодно малым, а значит, всегда можно взять такие ε и ε_0, чтобы выполнялось неравенство $T\varepsilon \geq \varepsilon_0$, в этом случае $P(T\varepsilon \geq \varepsilon_0) \equiv 0$. Следовательно, выполняется и условие (1):

$$\forall \varepsilon_0 > 0 \;\; P(\left|P_k - P_k^*\right| \geq \varepsilon_0) \to 0 \;\text{ при }\; M \to \infty.$$

Теорема доказана**.**

Смысл теоремы можно объяснить так: пусть принят пустой контейнер *X*. В результате применения к нему сглаживающего фильтра, работающего на основе усреднения соседних пикселов, получим изображение, гистограмма которого будет состоятельной оценкой распределения пустого контейнера. Состоятельная оценка распределения пустого контейнера позволяет применить χ^2-критерий

Модель стеганосистемы. Есть последовательность целых чисел X длиной M (т.е. контейнер), для которых почти всегда выполняется условие: для любого четного числа $2m \leq \frac{M}{2}$, если $x_{2m} = k$, то практически всегда $x_{2m+1} = k$, x_{2m}, $x_{2m+1} \in X$ в том смысле, что

$$\forall \varepsilon > 0 \;\; P(x_{2m+1} \neq k \,|\, x_{2m+1} = k) < \varepsilon \;\text{ при }\; M \to \infty.$$

Есть последовательность чисел m длиной L, которые равномерно распределены на множестве $\{0; 1\}$ (т.е. сообщение).

Из L последовательно берутся элементы m_j, для каждого из них случайным образом из последовательности X выбирается элемент x_s, после чего происходит замена НЗБ x_s на элемент m_j. Полученную последовательность целых чисел обозначим XS (стеганограмма).

Оценивание распределения контейнера (т.е. гипотетического распределения). Создадим из X последовательность целых чисел X^*, для элементов которой выполняется условие

$$x_{2m}^* = x_{2m+1}^* = \left\lceil \frac{x_{2m} + x_{2m+1}}{2} \right\rceil. \tag{4}$$

Обозначим

$$P((x \in X) \cup (x = k)) = P_k,$$

$$P((x^* \in X^*) \cup (x^* = k)) = P_k^*.$$

Возможность применения χ^2-критерия [2]**.** Согласно доказанной теореме, если был принят пустой контейнер, то вероятность P_k^* сходится по вероятности к P_k при $M \to \infty$, т.е. выполняется условие

$$\forall \varepsilon_0 > 0 \;\; P(\left|P_k - P_k^*\right| \geq \varepsilon_0) \to 0 \;\text{ при }\; M \to \infty.$$

Поскольку гипотетическое распределение X^* сходится по вероятности к истинному распределению X, оценка гипотетического распределения при неограниченном увеличении числа опытов является состоятельной. Для такой оценки расхождение экспериментальных данных с гипотетическим распределением можно оценивать по значениям χ^2-распределения при $M \to \infty$.

Если было принято стего, то сглаживание (4) фактически выбросит всю встроенную информацию (если встраивалось в НЗБ) и сходимости по вероятности между распределением стего и распределение сглаженного стего не будет, соответственно χ^2 - критерий даст негативный результат.

Теперь задача сводится к нахождению такого контейнера, чтобы после применения к нему сглаживающего фильтра (4) гистограммы до и после сглаживания практически совпадали. При сжатии изображений (в том числе и видео), основанном на большой избыточности, используются такие преобразования, как ДКП, ДПФ, вейвлет-преобразование с разными видами квантования и округления данных. Применение этих преобразований частично отбрасывает избыточную информацию без какого-либо заметного ухудшения перцепционного качества изображения. Обратные методы стеганоанализа на основе χ^2-критерия могут использовать любое из этих преобразований для преобразования цифровой матрицы принятого сигнала к такому виду, чтобы к ней можно было применить условия доказанной теоремы. Далее рассмотрим два возможных варианта создания обратных методов без использования преобразований и с использованием ДКП.

Первый обратный χ^2-метод

Основу для создания первого обратного χ^2-метода дают многочисленные методы сжатия цифровых изображений в формате BMP с применением разных видов сглаживающей и усредняющей фильтрации, квантования и обрезки наименьших значащих битов значений пикселов. В работах [11–13] рассмотрены исследования Jeremiah J. Harmsen, William A. Pearlman [11] и Andrew D. Ker [12], которые проводились в целях создания датчиков обнаружения встроенной информации с использованием центра масс характеристической функции гистограммы (ЦМ ХФГ) как меры распределения энергии. Чтобы получить оценку ЦМ ХФГ для пустого контейнера, Andrew D. Ker [12] исследовал целочисленный выход низкочастотного фильтра:

$$\bar{I}_{i,\,j} = \left\lfloor (I_{2i,\,2j} + I_{2i+1,\,2j} + I_{2i,\,2j+1} + I_{2i+1,\,2j+1})/4 \right\rfloor. \qquad (5)$$

где $\bar{I}$ — целочисленный выход низкочастотного фильтра принятого изображения I (калиброванное изображение — downsampled image) с соответствующими величинами пикселов. Он высказал предположение, что процедура калибровки будет менять контейнер незначительно в силу того, что НЗБ соседних пикселов часто совпадают. В стего НЗБ совпадают значительно реже, поэтому калибровка вызовет более заметные изменения. Правильность этого предположения он подтвердил экспериментально [12].

Применение усредняющего фильтра (4) является не более жесткой процедурой усреднения, чем калибровка Кера (5). Усреднение производится только в одном (горизонтальном или вертикальном) направлении. Деление нацело с округлением в большую или меньшую сторону не кажется принципиальным. Предположение Кера, что усреднение будет менять контейнер незначительно в силу того, что НЗБ соседних пикселов часто совпадают, в данном случае тоже оправдывается.

Лабораторные исследования, проведенные на нескольких изображениях в формате BMP, полностью подтвердили работоспособность метода. Для встраивания сообщения использовался метод замены НЗБ значений пикселов, выбранных случайным образом (метод типа OutGess 0,1). Норма встраивания менялась от 20 % до 100 %, под нормой встраивания понимается отношение количества измененных пикселов к общему числу пикселов, пригодных для встраивания. Значение функции χ^2 в паре контейнер–фильтрованное стего оказалось в несколько раз меньшим, чем значение функции χ^2 в паре фильтрованное стего–стего. Причем, значения функции χ^2 в паре фильтрованное стего–стего мало отличались от значений функции χ^2 в паре контейнер–стего. Более того, оказалось, что метод работает тем эффективнее, чем меньше норма встраивания.

Второй обратный χ^2-метод

Для создания второго обратного χ^2-метода используем гистограмму коэффициентов ДКП. Будем считать, что изображение поделено на блоки 8x8 пикселов, а затем к каждому блоку применено ДКП (так же, как это делается в формате JPEG). Основное предположение метода состоит в том, что для многих типов изображений (или их частей) коэффициенты ДКП, находящиеся в одних и тех же позициях соседних блоков, очень часто одинаковы или близки по значениям. Рассмотрим два соседних блока ДКП изображения-контейнера: блок A и блок B. Пусть блоки уже просканированы зигзагообразно и представлены как последовательности из 64 элементов:

$$A = [a_0, a_1, ..., a_{63}], \;\; B = [b_0, b_1, ..., b_{63}].$$

Переупорядочим коэффициенты ДКП двух соседних блоков изображения следующим образом:

$$AB = \{a_0, b_{0,}\; a_1, b_1 ..., a_{63}, b_{63}].$$

Понятно, что при выполнении предположения о равенстве коэффициентов ДКП, находящихся в одних и тех же позициях соседних блоков, контейнер, представленный как последовательность AB, будет обладать нужным нам свойством.

Обоснованием целесообразности предположения о равенстве коэффициентов ДКП, находящихся в одних и тех же позициях соседних блоков, может быть следующее. На практике пользователи стеганографических средств обычно используют в качестве изображений-контейнеров фотографии, полученные с помощью цифровых камер или отсканированные изображения. Большинство сканеров и цифровых камер по умолчанию используют алгоритмы сжатия типа JPEG.

Для представления изображений в формате JPEG [14] изображение из формата RGB переводится в пространство YCbCr (яркость и две компоненты цвета) с помощью следующего выражения:

$$\begin{vmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0{,}299 & 0{,}578 & 0{,}144 \\ 0{,}5 & -0{,}4187 & -0{,}0813 \\ 0{,}1687 & -0{,}3313 & 0{,}5 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{vmatrix}.$$

Обратное преобразование легко получается умножением обратной матрицы на вектор $[Y, Cb, Cr]^{\mathrm{T}} - [0, 128, 128]^{\mathrm{T}}$, который по существу является пространством YUV:

$$\begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1{,}402 \\ 1 & -0{,}34414 & -0{,}71414 \\ 1 & 1{,}772 & 0 \end{vmatrix} \left(\begin{vmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{vmatrix} \right).$$

Для цветности и светимости формируется своя цифровая матрица, при этом для каждой компоненты отводится по 8 бит. Далее каждая матрица делится на блоки 8х8, и к каждому блоку применяется преобразование ДКП. После этого все 64 коэффициента ДКП блока квантуются в целые числа с использованием таблиц квантования (рисунок) [14]. При этом высокочастотные коэффициенты квантуются намного жестче, чем низкочастотные, это хорошо видно из таблиц квантования. Квантованные коэффициенты зигзагообразно сканируются и сжимаются кодером (чаще используется кодер Хаффмана или арифметическое кодирование).

Декомпрессия работает в обратном порядке. Битовый поток JPEG распаковывается, и квантованные коэффициенты восстанавливаются (умножаются на соответствующие элементы таблиц квантования). Понятно, что при квантовании допускаются некоторые потери, т.е. значения коэффициентов до JPEG сжатия и после него несколько отличаются.

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	58	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

Светимость

17	18	10	24	47	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

Цветность

После применения ДКП основная энергия блока сосредотачивается в низкочастотных коэффициентах.

Если частички изображения, заключенные в два соседних блока 8×8, в пространственном представлении похожи, то коэффициенты ДКП в низкочастотной и среднечастотных зонах тоже будут похожими (особенно после применения процедуры квантования). Высокочастотные элементы будут отличаться гораздо чаще, но они несут малую часть энергии (они просто обнуляются при квантовании). Эти рассуждения и позволили высказать предположение, что коэффициенты ДКП, находящиеся в одних и тех же позициях соседних блоков, будут иметь равные или близкие значения. Применение сглаживающего фильтра (усреднения соседних значений) (4) к преобразованному стего удалит встроенную в НЗБ информацию, приближая гистограмму преобразованного стего к гистограмме преобразованного контейнера.

Для второго обратного метода тоже были проведены лабораторные исследования на нескольких изображениях (природных и искусственных), которые полностью подтвердили работоспособность метода. Для встраивания сообщения использовался метод замены наименьших значащих бит (НЗБ) значений коэффициентов ДКП, выбранных случайным образом (метод OutGess 0.1). Норма встраивания менялась от 20 до 100 %. Так же, как и для первого метода, значение функции χ^2 в паре контейнер–фильтрованное стего оказалось в несколько раз меньшим, чем значение функции χ^2 в паре фильтрованное стего–стего. Причем значения функции χ^2 в паре фильтрованное стего–стего мало отличались от значений функции χ^2 в паре контейнер–стего. Более того, оказалось, что метод работает тем эффективнее, чем меньше норма встраивания. Как и следовало ожидать, работоспособность метода на искусственном изображении оказалась существенно лучшей, чем для природных изображений.

Заключение

Настоящая публикация посвящена разработке теоретической базы для создания стеганоаналитических методов на основе χ^2-критерия. Главная особенность разрабатываемых методов — предположение, что принятый сигнал является пустым контейнером, такие методы названы обратными χ^2-методами. Доказана теорема, выполнение условий которой дает возможность получения состоятельной оценки распределения пустого контейнера из принятого сигнала с помощью усредняющей фильтрации. Построена математическая модель стеганосистемы и доказана правомочность применения χ^2-критерия. Возможность получения оценки гистограммы пустого контейнера из принятого сигнала сама по себе важна для улучшения работы существующих методов стеганоанализа.

Предложены два обратных χ^2-метода стеганоанализа для изображений, один из них работает в пространственной области (в формате BMP), а другой — в области ДКП (в формате JPEG). Численные исследования, проведенные на нескольких изображениях разного типа (природных и искусственных), показали, что во всех случаях оба метода позволяют четко разделять контейнеры и стеганограммы.

Л.Л. Нікітенко

ЗВОРОТНІ МЕТОДИ СТЕГАНОАНАЛІЗУ НА ОСНОВІ χ^2-КРИТЕРІЮ

Запропоновано два методи стеганоаналізу для розрізнення прийнятих зображень на контейнери й стеганограми. Методи призначено для виявлення інформації, вкрапленої в найменші значущі біти зображення. Розподіл прийнятих зображень відбувається за правилами χ^2-критерію. Основною гіпотезою вважа-

 ISSN 0572-2691

ється гіпотеза про прийнятий пустий контейнер. Доказано теорему про можливість отримання спроможної оцінки розподілу пустого контейнера з прийнятого зображення за допомогою усереднювальної фільтрації. Теоретичною базою для створення методів є математична модель стеганосистеми, для якої доказано правомірність застосування χ^2-критерію при виконанні умов теореми.

L.L. Nikitenko

THE RETURN STEGANOANALYSIS METHODS ON A BASIS OF χ^2-CRITERION

Two steganoanalysis methods are offered for division of the accepted images into containers and stego. Methods are intended for detection of the information embedding in the least meaningful bits of the image. The division of the accepted images occurs by the rules of χ^2-criterion. The hypothesis about the accepted empty container is considered as the basic one. The theorem about the possibility of obtaining consistent estimation of distribution of the empty container from the accepted image by means of an averaging filtration is proved. As the theoretical base for the methods development the mathematical stegosystem model is used for which it is proved the legitimacy of using χ^2-criterion on satisfaction of the theorem conditions.

1. *Задирака В.К., Никитенко Л.Л.* К вопросу стойкости стеганосистемы при пассивных атаках // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». — 2009. — № 2. — С. 132–138.
2. *Никитенко Л.Л.* Анализ методов кодирования MPEG-4 видео для поиска возможностей встраивания цифровых водяных знаков. Часть 1 // Там же. — 2012. — № 2. — С. 146–154.
3. *Никитенко Л.Л.* Анализ методов кодирования MPEG-4 видео для поиска возможностей встраивания цифровых водяных знаков. Часть 2 // Там же. — 2012. — № 3. — С. 149–156.
4. *Никитенко Л.Л.* Встраивание данных в видео. Часть 1 // Там же. — 2013. — № 1. — С. 145–154.
5. *Никитенко Л.Л.* Встраивание данных в видео. Часть 2 // Там же. — 2013. — № 2. — С. 148–156.
6. *Provos N., Honeyman P.* Hide and seek: introduction to steganography // IEEE security and privacy. — 2003. — **1**, N 3. — P. 32–44.
7. *Westfeld A., Pfitzmann A.* Attacks on steganographic systems // Proc. Information Hiding. — 3rd Int'l Workshop. — London : Springer-Verlag. 1999. — P. 61–76.
8. *Никитенко Л.Л.* Применение расширенного метода χ^2 для обнаружения встроенной информации // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». — 2014. — № 2. — С. 138–143.
9. *Пугачев В.С.* Теория вероятностей и математическая статистика. — М. : Наука. — 1979. — 496 с.
10. *Никитенко Л.Л.* Состоятельная оценка распределения значений в цифровых изображениях // Праці міжнародної наукової конференції «Питання оптимізації обчислень ПОО–XL». — Кацивелі, 2013. — С. 192–193.
11. *Jeremiah J. Harmsen and William A. Pearlman.* Steganalysis of additive noise modelable information hiding // Proc. SPIE. 5022. — 2003. — P. 131–142.
12. *Andrew D.* Ker, Steganalysis of LSB matching in grayscale images // IEEE Signal Processing Letters. — 2005. — **12**, N 6. — P. 441–444.
13. *Никитенко Л.Л.* «Методы стеганоанализа по технологии калибровки гистограмм» // Искусственный интеллект. — 2013. — № 4. — С. 211–223.
14. *Научная* библиотека избранных естественно-научных изданий «научная-библиотека.рф». — http://www.sernam.ru/cod_15.php.

Получено 05.06.2014

Статья представлена к публикации академиком НАН Украины В.К. Задиракой.